

М.М. Климаш, В.О. Пелішок, П.М. Михайленич

ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗПРОВІДНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Рекомендовано до друку
Вченою Радою Національного університету “Львівська Політехніка”
(протокол № від 2007 року)

Рецензенти:

Климаш М.М., Пелішок В.О., Михайленич П.М.
Технології безпроводного зв'язку. – Львів, 2007. – 818с.

Роботу присвячено дослідженню радіомереж коміркового зв'язку стандартів GSM-900/1800, IS-95, cdma2000, WCDMA та інших безпроводних технологій, а саме: Bluetooth, ZigBee, IEEE 802.11x, WiMax, TETRA, DECT. Основну увагу приділено фізичному рівню, на якому формуються швидкості передачі, кількість каналів зв'язку, завадозахищеність. Також розглянуто основні методи забезпечення модуляції, розширення спектру, кодування сигналів та особливості систем множинного доступу з кодовим розділенням каналів.

У роботі приведено ряд моделей радіомереж стандартів CDMA, створених за допомогою системи MATLAB. Розглянуто можливості дослідження впливу характеристик каналів зв'язку на ймовірність появи бітових помилок при передачі даних. Приведено ряд моделей окремих вузлів радіомереж.

Книга розрахована на інженерно-технічних та наукових працівників, студентів і аспірантів інститутів телекомунікацій і зв'язку, а також всіх, хто цікавиться безпроводними технологіями.

Зміст

Вступ	11
Частина 1. Основи теорії цифрових систем радіозв'язку	17
1. Канальне кодування	18
1.1. Модель цифрової системи зв'язку	18
1.2. Моделі каналів для канального кодування	21
1.3. Надлишкове кодування	24
1.3.1. Принципи надлишкового кодування	25
1.3.2. Ефективність надлишкового кодування	28
1.3.3. Типи захисту від помилок	30
1.4. Класифікація кодів	33
1.5. Блочні коди	34
1.6. Згорткові коди	37
1.7. Перемежування	43
1.8. Каскадне кодування	45
1.9. Турбо-кодування	47
2. Цифрова модуляція	50
2.1. Загальні зауваження	50
2.2. Двопозиційні та багатопозиційні види маніпуляції	54
2.3. Фазова модуляція	56
2.4. Ефективність модуляції	63
3. Методи розділення каналів та множинного доступу	75
3.1. Виділені частоти	75
3.2. Типи каналів зв'язку	76
3.3. Методи дуплексної передачі даних	79
3.4. Методи множинного доступу до каналів зв'язку	84
3.5. Розширюючі кодові послідовності	102
3.5.1. m -послідовності	103
3.5.2. Послідовності Голда та Касамі	106
3.5.3. Послідовності Уолша	107
4. Моделювання систем CDMA	112
4.1. Загальні зауваження	112
4.2. Моделі системи IS-95	113
4.3. Модель системи cdma2000	120
4.4. Моделі системи WCDMA	123
Частина 2. Системи коміркового зв'язку	127
5. Основні поняття і принципи побудови коміркових мереж GSM	128
5.1. Коротка історична довідка	130
5.2. Елементи коміркової мережі	136
5.3. Обслуговування абонентів	139
5.3.1. Локалізація рухомого абонента	139

5.3.2. Виклик рухомого абонента телефонної мережі загального користування.....	142
5.3.3. Виклик стаціонарного абонента з коміркової мережі.....	146
5.3.4. Автоматичне перемикання розмов між комірками.....	150
5.3.5. Роз'єднання розмов в коміркової мережі.....	154
5.3.6. Заключення.....	158
5.4. Поверхневі структури коміркових мереж.....	159
5.4.1. Форми комірок в коміркових мережах.....	161
5.4.2. Принципи проектування коміркових мереж.....	164
5.4.3. Спільноканальні інтерференційні завади.....	171
5.4.4. Інтерференційні завади і ємність мережі.....	177
5.5. Техніко-економічні аспекти практичної реалізації.....	182
5.5.1. Антени базових станцій.....	184
5.5.2. Локалізація антенних щогл базових станцій.....	185
5.5.3. Максимальний радіус комірок.....	187
5.5.4. Мінімальний радіус комірки.....	189
6. Цифрова система коміркового зв'язку GSM-900/1800.....	198
6.1. Архітектура системи GSM.....	202
6.1.1. Функціональний поділ системи GSM.....	202
6.1.1.1. Ансамбль базових станцій.....	203
6.1.1.2. Комутаційно-мережна частина.....	204
6.1.1.3. Рухомі станції.....	208
6.1.1.4. Комплект експлуатації та обслуговування.....	209
6.1.1.5. Стикування системи GSM із зовнішнім світом.....	209
6.1.2. Просторова структура мережі GSM.....	210
6.1.3. Нумерація.....	212
6.2. Комутаційно-мережна частина.....	227
6.2.1. Комутаційна станція MSC і реєстр чужих станцій VLR.....	227
6.2.1.1. Комутаційно-мережна частина комутаційної станції MSC.....	227
6.2.1.2. Підсистема рухомої телефонії MTS.....	228
6.2.1.3. Комутаційно-транзитна станція GMSC.....	234
6.2.2. Реєстр власних станцій HLR.....	234
6.2.3. Центр ідентифікації AuC.....	235
6.2.4. Зміна положень рухомими станціями.....	238
6.2.4.1. Процедура уточнення інформації про місце перебування рухомої станції.....	238
6.2.4.2. Перехід рухомої станції з вимкненого стану до ввімкненого.....	241
6.2.4.3. Почасове підтвердження стану очікування.....	244
6.2.4.4. Встановлення з'єднання, що надходить до рухомої станції.....	244
6.2.4.5. Встановлення з'єднання від рухомої станції.....	247
6.2.4.6. Перемикання каналів.....	248
6.3. Рухома станція.....	252

6.3.1. Класи рухомих станцій.....	252
6.3.2. Архітектура і функції рухомих станцій.....	255
6.3.2.1. Архітектура рухомої станції.....	255
6.3.2.2. Функції рухомої станції.....	259
6.3.2.3. Електричні параметри рухомої станції.....	260
6.3.3. Модуль SIM.....	263
6.4. Ансамбль базових станцій.....	266
6.4.1. Архітектура ансамблю базових станцій.....	266
6.4.2. Базова станція BTS.....	268
6.4.2.1. Функції базових станцій.....	268
6.4.2.2. Електричні параметри базових станцій.....	272
6.4.3. Блок керування базовими станціями.....	274
6.4.4. Модуль транскодера.....	277
6.4.5. Функції ансамблю базових станцій.....	281
7. Системи коміркового зв'язку і принципи їх функціонування.....	285
7.1. Організація радіоканалів.....	285
7.1.1. Смуга частот.....	285
7.1.1.1. Система GSM900.....	286
7.1.1.2. Система DCS1800.....	287
7.1.1.3. Система E-GSM.....	290
7.1.1.4. Система PCS1900.....	290
7.1.2. Фізичні канали.....	291
7.1.2.1. Частотно-часові інтервали.....	291
7.1.2.2. Імпульсна передача.....	292
7.1.2.3. Типи пакетів.....	293
7.1.2.4. Цикли вищого рівня.....	299
7.1.3. Логічні канали.....	303
7.1.3.1. Типи логічних каналів.....	303
7.1.3.2. Розташування логічних каналів в фізичних каналах.....	307
7.1.3.3. Приклади процедур, що використовують логічні канали.....	315
7.2. Трансмісія в радіоканалі.....	320
7.2.1. Кодування мови, каналне кодування та модуляція.....	320
7.2.1.1. Кодування мови.....	322
7.2.1.2. Канальне кодування сигналу мови.....	329
7.2.1.3. Переплітання.....	331
7.2.1.4. Захист сигналів даних від помилок.....	333
7.2.1.5. Модуляція.....	334
7.2.1.6. Приймач GMSK.....	336
7.2.2. Ефективне використання радіозасобів.....	339
7.2.2.1. Скакання по частотах.....	340
7.2.2.2. Керування потужністю.....	344
7.2.2.3. Передача з випередженням.....	346
7.2.2.4. Передача з перериванням.....	350
7.2.3. Вимірювання, що проводяться рухомою станцією.....	351

7.3. Протоколи та сигналізація.....	354
7.3.1. Система GSM, як реалізація моделі ISO/OSI.....	354
7.3.2. Фізичний рівень.....	356
7.3.3. Рівень даних.....	357
7.3.4. Мережевий рівень.....	365
7.3.5. Загальна архітектура сигналізації в системі GSM.....	371
8. Система базової станції.....	376
8.1. Основні поняття системи базової станції.....	376
8.1.1. Форми комірок в коміркових мережах.....	376
8.1.2. Підвищення доступності до коміркової мережі.....	377
8.1.3. Повторне використання частот.....	379
8.1.4. Субкоміркові структури.....	381
8.1.5. Нумерація в BSS.....	382
8.1.6. Мережеві компоненти системи базової станції та зв'язок між ними.....	386
8.2. Радіоінтерфейс.....	391
8.2.1. Частотний план стандарту GSM.....	391
8.2.2. Типи каналів в GSM.....	395
8.2.2.1. Канали управління.....	395
8.2.2.2. Канали інформаційних потоків.....	397
8.2.3. Структура радіоінтерфейсу.....	397
8.2.4. Сигналізація на радіо інтерфейсі.....	398
8.3. Базова станція.....	401
8.3.1. Багатопроменеве поширення радіохвиль та методи боротьби з ним.....	401
8.3.2. Функції базової станції.....	404
8.3.2.1. Канальне кодування та переміщення.....	405
8.3.2.2. Шифрування.....	409
8.3.2.3. Форматування пакетів.....	414
8.3.2.4. Гаусівська маніпуляція з мінімальним зсувом.....	418
8.3.2.5. Рознесений прийом.....	423
8.3.2.6. Стрибки по частоті.....	425
8.3.2.7. Обробка часового випередження.....	426
8.3.2.8. Перервна передача.....	428
8.3.2.9. Вирівнювання.....	431
8.3.2.10. Звітування контролеру базових станцій.....	433
8.3.3. Архітектура базової станції.....	435
8.4. Контролер базових станцій.....	441
8.4.1. Архітектура контролера базових станцій.....	441
8.4.2. Функції контролера базових станцій.....	455
8.4.2.1. Визначення каналу.....	455
8.4.2.2. Диференціальне визначення каналу.....	457
8.4.2.3. Динамічне керування потужністю мобільної станції.....	459
8.4.2.4. Динамічне керування потужністю базової станції.....	463
8.4.2.5. Передача обслуговування.....	465

8.4.2.6. Виділення каналів при передачі обслуговування.....	482
8.5. Транскодер.....	483
8.6. Система базової станції з точки зору систем третього покоління.....	485
8.6.1. Стратегії переходу до послуг третього покоління.....	485
8.6.2. Еволюція мереж GSM.....	489
8.6.3. Високошвидкісна передача даних з комутацією каналів HSCSD.....	490
8.6.4. Послуга передачі даних GPRS.....	491
8.6.5. Система радіодоступу EDGE.....	497
9. Стандарт IS-95 (cdmaOne) покоління 2G.....	502
9.1. Версії радіоінтерфейсу IS-95.....	502
9.2. Структура системи IS-95.....	507
9.3. Формування каналу трафіку в прямому каналі.....	512
9.3.1. Перетворення голосового повідомлення.....	514
9.3.2. Блок кодування.....	516
9.3.3. Передавач.....	518
9.4. Додаткові канали передавача BTS.....	522
9.5. Канал приймача AC.....	525
9.6. Передача даних в зворотному каналі.....	525
9.6.1. Канал трафіку в зворотному каналі.....	526
9.6.2. Канал доступу передавача AC.....	530
9.7. Переключення абонентів.....	530
9.8. Регулювання потужності.....	532
9.9. Взаємодія абонентської та базової станцій.....	536
10. Системи cdma2000 1x та cdma2000 3x.....	539
10.1. Загальні зауваження.....	539
10.2. Прямий канал.....	543
10.2.1. Блок кодування.....	543
10.2.2. Передавач.....	544
10.2.3. Швидкість передачі каналу трафіку.....	546
10.3. Передавальна частина зворотного каналу.....	549
10.4. Швидкість передачі в зворотному каналі.....	550
10.5. Фізичні канали системи.....	551
10.6. Інші стандартні функції системи cdma2000.....	554
10.7. Особливості радіоінтерфейсу cdma2000 1x EV-DO.....	554
10.8. Система CDMA 450.....	557
11. Системи WCDMA FDD.....	563
11.1. Концепція побудови.....	563
11.2. Радіозв'язок між базовою та абонентськими станціями.....	565
11.3. Формування кодованого потоку даних.....	580
11.4. Структура кадрів UTRAN.....	590
11.5. Системна архітектура мережі UMTS.....	591
12. Системи WCDMA TDD.....	594
12.1. Концепція побудови.....	594
12.2. Режим UTRA TDD.....	595

12.3. Призначення та структура пакетів в режимі UTRA TDD.....	598
12.4. Передача даних в режимі UTRA TDD.....	599
Частина 3. Системи радіодоступу стандартів IEEE 802.1x.....	605
13. Персональні мережі стандартів IEEE 802.15.x.....	606
13.1. Загальні зауваження.....	606
13.2. Стандарт 802.15.1.....	607
13.2.1. Фізичний рівень Bluetooth 1.1, 1.2.....	624
13.2.2. Фізичний рівень Bluetooth 2.0 EDR.....	624
13.3. Високошвидкісні мережі стандартів IEEE 802.15.3/3a.....	630
13.3.1. Мережі стандарту IEEE 802.15.3.....	630
13.3.2. Мережі стандарту IEEE 802.15.3a.....	633
13.4. Стандарт 802.15.4 (ZigBee).....	637
14. LAN мережі стандартів IEEE 802.11x.....	647
14.1. Загальні зауваження.....	647
14.2. Технології DSSS та HR-DSSS.....	651
14.2.1. Коди Баркера.....	655
14.2.2. Комплементарні ССК-послідовності.....	656
14.2.3. Згорткові коди PBCC.....	660
14.3. OFDM модуляція.....	667
14.4. Фізичний рівень.....	668
15. MAN мережі стандартів IEEE 802.16 з модуляцією однієї несучої....	672
15.1. Загальні зауваження.....	672
15.2. Фізичний рівень стандартів IEEE 802.16.....	681
15.3. Режим WirelessMAN-SC.....	693
15.4. Режим WirelessMAN-SC2.....	700
16. MAN мережі стандартів IEEE 802.16 з OFDM модуляцією.....	702
16.1. Режим WirelessMAN-OFDM.....	702
16.2. Режим WirelessMAN-OFDMA.....	720
16.3 Адаптивні антенні системи.....	727
16.4. MAC-рівень стандартів 802.16.....	732
Частина 4. Транкінгові та радіотелефонні системи радіозв'язку.....	745
17. Особливості транкінгових систем.....	746
17.1. Загальні зауваження.....	746
17.2. Архітектура транкінгових мереж.....	750
17.3. Класифікація транкінгових мереж.....	756
18. Аналогові транкінгові системи.....	758
18.1. Система SmartTrunk II.....	758
18.2. Системи протоколу 1327.....	760
19. Цифрова транкінгова система TETRA.....	764
19.1. Загальні зауваження.....	764
19.2. Технічні особливості системи TETRA.....	768
19.3. Опис системної моделі.....	774
20. Connect 2000.....	783

21. Цифрова безпроводна телефонія DECT.....	789
21.1. Загальні зауваження.....	789
21.2. Структура системи радіодоступу.....	791
21.3. Фізичний рівень DECT.....	793
21.4. Принцип роботи.....	797
Додатки.....	799
1. Моделювання систем безпроводного зв'язку.....	799
2. Моделювання окремих складових систем безпроводного зв'язку.....	803
Література.....	813

Вступ

В даний час мобільні системи радіозв'язку бурхливо розвиваються порівняно з іншими сегментами ринку радіозасобів. Мікромініатюризація аналогових НВЧ мікросхем та застосування мікропроцесорів якісно змінили апаратуру радіозв'язку, яка стало доступною масовому споживачу.

В останні роки в центрі уваги промислових та академічних дослідних центрів опинився метод множинного доступу з кодовим розділенням каналів (англ. Code Division Multiple Access – CDMA), що привело до розвитку комунікаційних систем з множинним доступом на основі технології розширення спектру, в яких кожний користувач має свою індивідуальну розширюючу послідовність. В даний час CDMA вважається домінуючим методом множинного доступу в системах рухомого зв'язку третього покоління (3G). В основі більшості пропозицій для сімейства стандартів IMT-2000 (International Mobile Telecommunications) міжнародного союзу електрозв'язку (ITU) лежить метод множинного доступу CDMA. Тому є актуальним розгляд технології CDMA, аналіз її переваг та недоліків.

Аналогічна увага приділяється стандарту коміркового зв'язку GSM та іншим безпроводним технологіям: IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16, DECT. Все частіше в побуті та рекламі звучать терміни WiFi, WiMAX, Bluetooth, TETRA. Наприклад, на 4 Літній міжнародній конференції «Безпроводні технології та безпека», що відбувалась в Києві 26 червня 2007 р., розглядались саме згадані технології. Також зверталось увагу, що для забезпечення безпеки проведення в Україні чемпіонату з футболу Євро-2012, необхідно запровадити в силових структурах системи мобільного зв'язку TETRA. Сучасні технології мобільного зв'язку впливають на розвиток суспільства, навіть кардинально змінюють його, як у випадку масового користування мобільними телефонами стандартів GSM, CDMA.

При розгляді та вивченні складних процесів, що відбуваються в сучасних системах цифрового зв'язку, бажано мати можливість:

- швидкого вибору необхідної готової моделі, яка відповідає даній тематиці;
- запуску вибраної моделі на ПК та дослідження її функціонування, визначення необхідних параметрів та характеристик;
- оперативного створення необхідної моделі, у випадку її відсутності, на базі існуючих подібних моделей;
- вивести створенні моделлю сигнали з ПК для взаємодії з реальним обладнанням, наприклад з метою його діагностики;
- ввести в ПК сигнали з реальної системи з метою їх подальшої обробки.

Наприклад, при вивченні систем зв'язку з застосуванням технології CDMA бажано мати такі моделі:

- систем IS-95, cdma2000, WCDMA;
- окремих вузлів, наприклад, генератора кодів Уолша, згорткового кодера, фільтра з характеристикою типу припіднятого косинуса і т.д.

В даній книзі в якості засобу моделювання та створення ілюстраційних прикладів вибрана система MATLAB, створена фірмою MathWorks Inc., яка являється світовим стандартом в області наукових та технічних розрахунків. Дана система вирішує всі вищезгадані питання моделювання та дослідження. Популярності системи MATLAB сприяє її потужне розширення, яке надає користувачу прості та зручні засоби, в тому числі об'єктно-орієнтованого програмування, для блочного моделювання лінійних та нелінійних динамічних систем. Наприклад, в розширенні Simulink наявні наступні блоки:

- CDMA Reference Blockset.
- Communications Blockset.
- Signal Processing Blockset.

Згадані блоки містять більше 10 моделей стандартів зв'язку, що використовують технологію CDMA, Wi-Fi, Bluetooth, а також багато моделей

окремих функціональних вузлів системи.

Моделювання із застосуванням засобів пакету Communication Blockset здатне вирішувати серйозні завдання в області створення реальних комунікаційних засобів. Очевидно, таке моделювання ніколи не замінить реальної (фізичної) побудови таких пристроїв та їх тестування. Але воно здатне різко скоротити високо-затратні та працесмні етапи створення нових телекомунікаційних пристроїв. Можна вважати, що математичне моделювання таких пристроїв перед їх реальним створенням являється в наші дні обов'язковою нормою проектування. Це також відноситься до вивчення моделювання в технічних вузах та університетах відповідного профілю.

В першому розділі розглядається каналне кодування. Канальне кодування є потужним інструментом, який використовується для реалізації різних компромісів в системі зв'язку. Застосування коректуючих кодів дозволяє працювати системам зв'язку при малих відношеннях сигнал/шум, забезпечуючи задану якість послуг.

Другий розділ присвячений цифровій модуляції. В даному розділі розглянуте призначення модуляції та її типи. Велику увагу при розгляді цифрової модуляції звернуто на фазову маніпуляцію та ефективність амплітудної модуляції.

Третій розділ. В даному розділі приведено опис та аналіз способів організації каналів зв'язку та методів множинного доступу, які використовуються в зв'язку.

В четвертому розділі приведено короткий опис моделей CDMA системи MATLAB.

В п'ятому розділі розглянуто основні поняття та основи побудови коміркових мереж GSM.

Шостий розділ містить опис цифрової системи GSM-900/1800: архітектура системи GSM, комутаційно-мережна частина, ансамблі базових станцій.

В сьомому розділі приведено пояснення принципів функціонування коміркових мереж GSM.

Восьмий розділ містить опис базових станцій, радіоінтерфейсу, контролера базових станцій стандарту GSM.

Дев'ятий розділ. В цьому розділі розглянуто стандарт зв'язку IS-95 (cdmaOne), який відноситься до стандартів 2G. Стандарт базується на використанні технології множинного доступу CDMA. В розділі описані версії радіоінтерфейсів IS-95, основні параметри та структура системи зв'язку. Далі, міститься аналіз роботи прямого і зворотного каналів зв'язку. Також розглянуто призначення додаткових підканалів, які використовуються в системі, регулювання потужності, хендовер, а також взаємодія абонентської та базової станцій.

Десятий розділ. Наступним етапом розвитку IS-95 є стандарт cdma2000 1x. Стандарт cdma2000 1x також еволюціонував в новий - cdma2000 3x, оскільки швидкість передачі даних залишалася меншою 2 Мбіт/с. Шостий розділ присвячений розгляду стандартів cdma2000 1x та cdma2000 3x. В розділі описано основні параметри системи, проведено аналіз роботи прямого та зворотного каналів, розглянуто призначення додаткових підканалів.

Одинадцятий розділ. Цей розділ містить короткий опис системи WCDMA FDD: структура системи, параметри радіоінтерфейсу, формування швидкостей передачі даних, робота прямого та зворотного каналів.

Дванадцятий розділ. Розділ містить продовження розгляду системи WCDMA, а саме режим TDD.

Опис двох відомих стандартів Bluetooth та ZigBee PAN-мереж приведений в тринадцятому розділі.

Чотирнадцятий розділ містить опис стандартів IEEE 802.11x локальних безпроводних мереж.

Пятнадцятий та шістнадцятий розділи присвячені розгляду стандартів IEEE 802.16 з модуляцією однієї несучої та OFDM модуляцією.

У **сімнадцятому** розділі містяться загальні зауваження щодо транкінгових системи радіозв'язку, розглянуто архітектуру та приведена їхня класифікація.

Вісімнадцятий розділ містить загальний опис аналогових транкінгових

систем SmarTrunk II та MPT 1327.

В **дев'ятнадцятому** розділі розглянуто цифрову транкінгову систему TETRA.

Короткі характеристики пристрою управління і комутації для створення транкінгових радіотелефонних систем на базі радіотелефонів “SENAO” - Connect 2000, розглянуто у **двадцятому** розділі.

Двадцять перший розділ містить опис системи зв'язку DECT, орієнтованої на безпроводну телефонію.

В Додатку приведено опис деяких блоків пакету Simulink для дослідження роботи безпроводних систем зв'язку.

Частина 1.

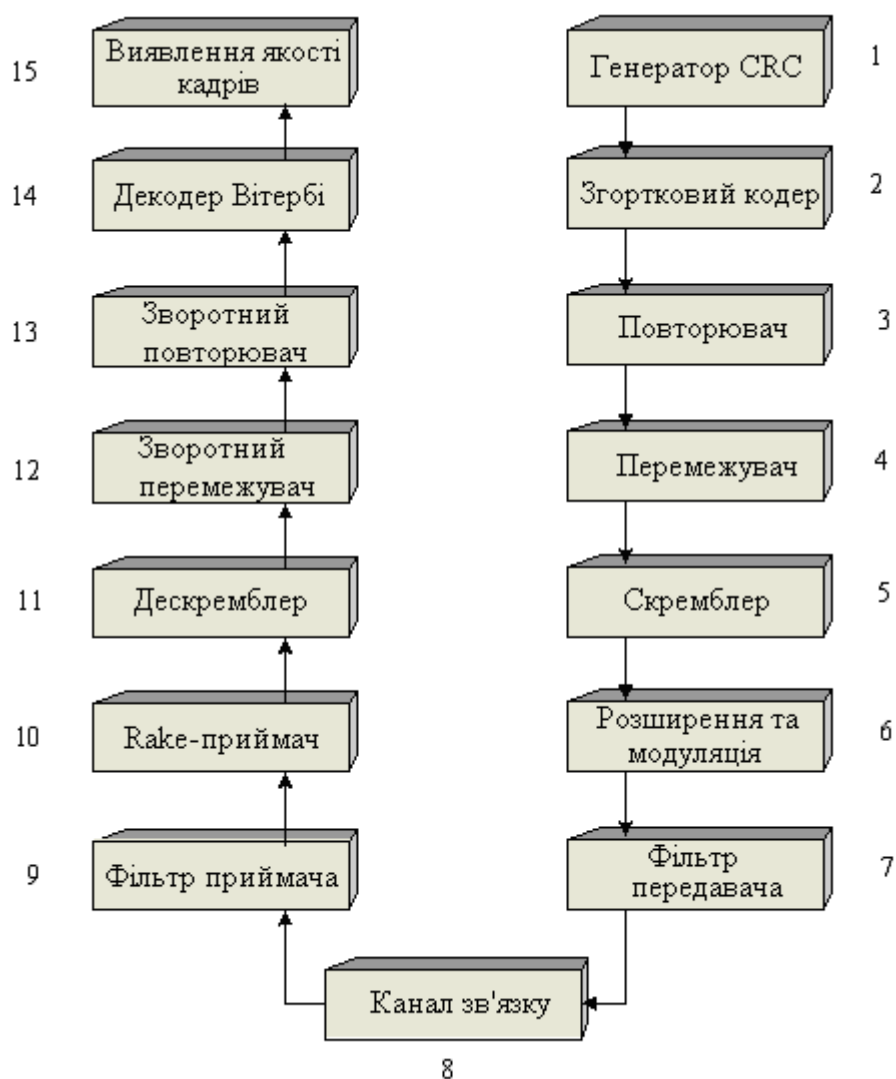
Основи теорії цифрових систем радіозв'язку

1. КАНАЛЬНЕ КОДУВАННЯ

1.1. Модель цифрової системи зв'язку

Розглянемо загальну модель цифрової системи зв'язку, приведену на рис.

1.1.



1 - CRC-генератор, 2 - згортковий кодер, 3 – повторювач, 4 – перемишувач, 5 – скремблер, 6 – розширення та модуляція, 7 - фільтр передавача, 8 - канал зв'язку, 9 - фільтр приймача, 10 - RAKE-приймач, 11 – дескремблер, 12 – перемишувач (функція зворотна до 4), 13 – повторювач (функція зворотна до 3), 14 - декодер Вітербі, 15 - декодер якості кадрів.

Рис.1.1 Модель цифрової системи зв'язку

На вхід даної моделі подаються цифрові дані. Вони можуть утворюватись при перетворенні аналогового сигналу в цифровий, або від іншого джерела інформації в цифровому вигляді.

Канальний кодер

Деякі фізичні явища, що відбуваються в каналах зв'язку, приводять до виникнення помилок в приймачі. Такі помилки можна представити різницею між переданою та відновленою з прийнятого сигналу двійковою послідовністю. Для того щоб виправити або, в крайньому випадку, виявити помилки, застосовують канальний кодер (блоки 1-5) в передавачі і канальний декодер (блоки 11-15) в приймачі. До інформаційних блоків додається певна кількість вибраних особливим чином додаткових бітів. Значення цих бітів розраховуються шляхом додавання за модулем два інформаційних бітів, підібраних таким чином, щоб між ними існував алгебраїчний взаємозв'язок, який дозволяє скоректувати, або хоча б виявити можливі помилки. Тоді, при виявленні помилки, неправильно прийнята послідовність являється індикатором необхідності повторної передачі повідомлення. Виявлення та корекція помилок широко застосовуються в системах мобільного зв'язку.

Модулятор

В модуляторі генерується гармонічний сигнал (несуча частота) параметри якого (в CDMA системах найчастіше фаза) являються функціями поданої на його вхід цифрової послідовності. В результаті модуляції несучий інформацію сигнал переноситься у відповідну частину радіодіапазону з чітко сформованими спектральними параметрами. При цьому необхідно ефективно використовувати спектральні ресурси, щоб не спотворити сигнали, які передаються іншими користувачами в сусідніх областях спектру. Кожна система повинна використовувати максимально можливу кількість своїх власних каналів у виділеному їй частотному діапазоні.

Ширина спектру каналу зв'язку, як правило, є обмеженою. Такі обмеження

встановлюються як відповідними органами всередині держави, так і міжнародними домовленостями.

Поняття множинного доступу до середовища передачі (FDMA, TDMA, CDMA) тісно пов'язане з властивостями каналу та методами модуляції сигналу. Можливі також різні комбінації згаданих методів множинного доступу. Очевидно, що згідно тематики даної книги, в ній найбільшу увагу приділено розгляду методу CDMA.

В склад модулятора також входить високочастотний блок, який підсилює радіосигнал до потрібного рівня. Ширина смуги сигналу залежить від вибраного типу модуляції та методу множинного доступу. Звичайною вимогою до підсилювача високої частоти являється обмежене енергоспоживання. Наприклад мобільний телефон повинен споживати якомога менше енергії для того, щоб збільшити час роботи між перезарядкою акумуляторів. Тому підсилювач високої частоти повинен мати великий динамічний діапазон та вимушений функціонувати в нелінійній області своїх характеристик. Прямим наслідком даного факту стає вибір методів цифрової модуляції. Наприклад, компенсувати нелінійні спотворення, які вносяться підсилювачем високої частоти, дозволяє застосування методів модуляції з постійною огинаючою, або такою, що змінюється в незначних межах.

Канал зв'язку

В системах мобільного зв'язку передавач випромінює сигнал в навколишній простір за допомогою антени. Властивості каналу тісно пов'язані з типами передавальної та приймальної антен. Особливо важливу роль відіграють параметри спрямованості та підсилення антени.

Характеристики антени також визначають робочий діапазон системи та її ефективність.

Приймач

Перетворення, які здійснюються в приймачі, мають зворотну відповідність

процесам, що здійснюються в передавачі. Після підсилення та фільтрації у високочастотному блоці прийнятий сигнал демодулюється. Характер перетворень залежить від методу модуляції, який використовується та параметрів каналу. Значний вплив на вибір типу модулятора має фактор вартісної реалізації приймача. Основне завдання демодулятора - виділити послідовність імпульсів з модульованого сигналу, отриманого після високочастотної обробки. На основі цих імпульсів детектор виділяє з прийнятого сигналу передані символи даних і перетворює їх в двійкові послідовності.

Канальний декодер

Канальний декодер, використовує додані каналним кодером резервні біти, а також додаткову інформацію про достовірність прийнятого сигналу, визначає кодову послідовність. З отриманої кодової послідовності виділяється двійкова інформаційна складова. Власне вона і являється основною метою декодування.

1.2. Моделі каналів для каналного кодування

Застосування прямого випрямлення помилок (англ. Forward Error Correction-FEC) являється одним з найважливіших засобів для забезпечення достовірності передачі цифрових даних. В даному розділі розглядаються основні правила кодування. Спочатку розглянемо прості моделі каналу, що описують процеси, які відбуваються між кодером та декодером [8].

На рис. 1.2 приведена базова модель каналів, яка використовується для аналізу каналного кодування.

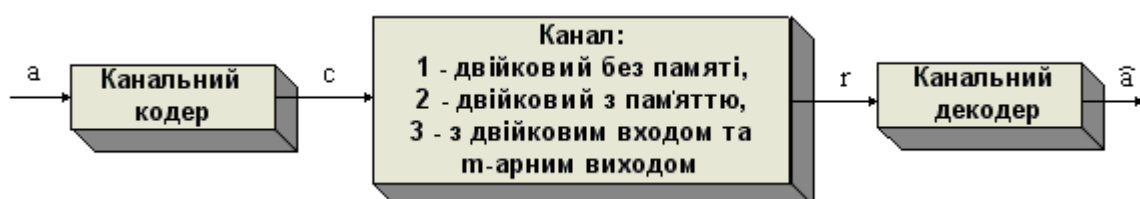


Рис.1.2 Моделі каналів зв'язку при розгляді каналного кодування

Найбільш простою являється модель 1 каналу, яка також називається двійковим симетричним каналом без пам'яті. Передані та прийняті блоки даних зберігають побітовий порядок як на вході так і на виході моделі каналу. Кожен біт кодованої послідовності приходить на вихід каналу в незмінному вигляді з ймовірністю $1-p$, а з ймовірністю p біти, які передаються інвертуються, тобто виникають бітові помилки. Декодер приймає рішення про передану закодовану послідовність на основі прийнятої закодованої послідовності. Відсутність в даній моделі пам'яті приводить до того, що помилки статистично являються взаємозалежними, тобто виникнення помилок в попередні моменти часу ніяк не впливає на ймовірність появи помилок в даний момент. Але реально небагато каналів можуть вважатися такими, що не мають пам'яті. В більшості випадків виникають пакетні помилки.

З іншої сторони існує множина алгоритмів декодування, розроблених спеціально для виправлення випадкових помилок, тобто орієнтованих на канал без пам'яті. З метою забезпечення високої ефективності корекції помилок застосовуються додаткові заходи для розбиття пакетів помилок в приймачі, зокрема перемежування даних (англ. Data Interleaving) (блок 4, рис. 1.1).

Друга модель каналу враховує пакетну природу помилок, які виникають в каналі передачі даних. Це означає, що поява одної помилки в конкретний момент часу збільшує ймовірність появи помилки в наступний момент часу. Тобто, вважається, що такому каналу властива пам'ять про свої попередні стани. Для таких каналів також розроблені спеціальні коди та алгоритми декодування.

Модель 3 каналу, аналогічно моделі 1, їй також не властива пам'ять, але вона відображає ситуацію, коли на вихід каналу поступає не тільки двійкова інформація. Це означає, що декодер використовує не тільки відомості про алгебраїчні співвідношення між окремими бітами, але і додаткову інформацію, що поступає з каналу та дозволяє оптимізувати процес декодування. На рис. 1.3 приведено один з найпростіших прикладів такої моделі.

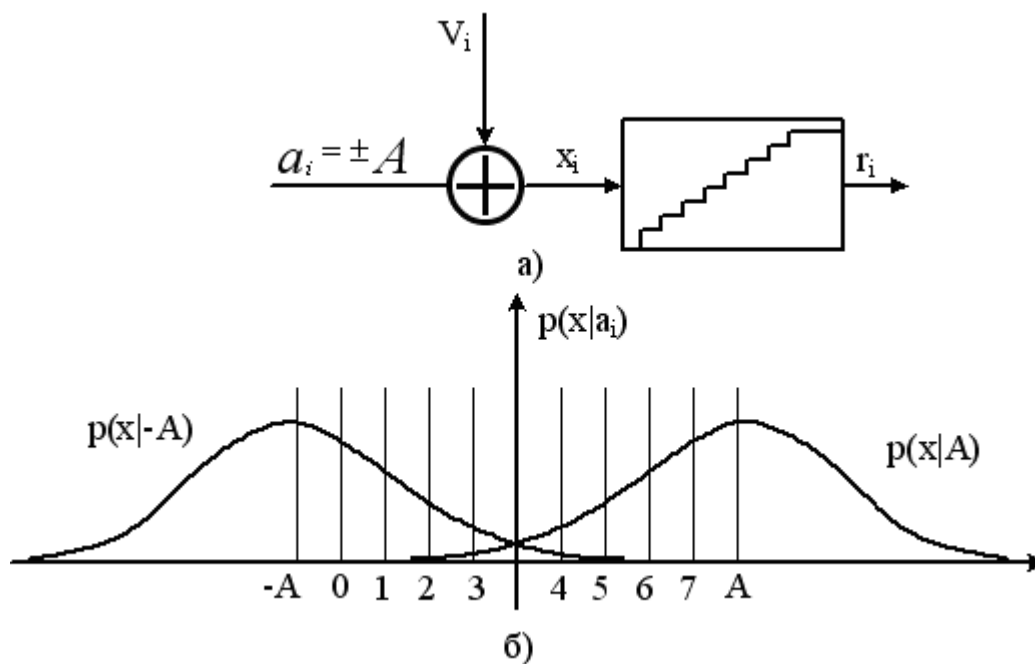


Рис.1.3 Декодування з м'яким рішенням

Двійкові символи представлені біполярними імпульсами з амплітудою $+A$ (для 1), або $-A$ (для 0). Але вони попередньо спотворюються додатковими статистично незалежними відліками гаусового шуму (рис. 1.3,а). Відлік x представляється у вигляді суми імпульсу та шуму, причому йому властива густина розподілу ймовірності, обумовлена символом, який передається: $+A$, або $-A$ (рис. 1.3,б). В приймачі відлік x квантується в M -рівневому квантувачі, який видає на виході сигнал r . Якщо кожному можливому рівню квантування поставити число від 1 до $M-1$, отримаємо модель каналу з двійковим входом та m -арним виходом. Очевидно, що в даному випадку сигнал на виході каналу вимірюється більш точно, порівняно з моделлю двійкового каналу. Це дозволяє використати додаткову інформацію, яка міститься в прийнятому символі, для підвищення якості декодування, тобто знизити ймовірність прийняття неправильного рішення про прийняту кодовану послідовність. Ступінчата лінія на рис. 1.3,б позначає послідовні рівні квантування. Декодування, при якому використовується додаткова інформація каналу, називається декодуванням з м'яким рішенням. Декодування тільки з використанням інформації двійкових

символів називається декодуванням з жорстким рішенням [8].

В більшості алгоритмів, які використовуються в сучасній цифровому комірковому зв'язку, використовуються м'які рішення.

1.3. Надлишкове кодування

Внаслідок різних спотворень та дії завад, шумів приймача прийнятий сигнал може суттєво відрізнятись від переданого, що приведе до появи помилок при відтворенні приймачем повідомлень. Неідеальність передавальної функції системи приводить до розмиття символів, або міжсимвольної інтерференції, яка також впливає на появу помилок. Всі ці причини зумовлюють використання ряду заходів щодо покращення якості зв'язку. Серед них є завадостійке кодування. Щоб передати повідомлення без помилок необхідно використовувати таке кодування, яке дозволило б в гіршому випадку виявляти помилки, а в кращому виправляти їх.

На відміну від звичайного кодування (кодування джерела повідомлень), яке використовується для представлення вхідної інформації, або її стиснення, завадостійке кодування (канальне кодування) дозволяє виявляти та виправляти помилки в прийнятих кодових комбінаціях [43].

Завадостійке кодування для виявлення помилок передбачає додавання до пакету даних спеціального поля. Таке поле називається CRC (англ. Cyclic Redundancy Check – циклічний надлишковий контроль). На основі аналізу вмісту такого поля приймач може встановити чи є помилки в прийнятому пакеті. Характеристика поля CRC повинна бути такою, щоб виявити хоча б одну помилку. Проте, навіть при використанні механізму виявлення помилок за допомогою поля CRC існує дуже мала імовірність невиявлення помилки. Тому протоколи зв'язку вищих рівнів (наприклад, IP, Ethernet) використовують власні механізми виявлення помилок зменшуючи ймовірність невиявлення помилки практично до нуля.

Якщо використовується завадостійке кодування з виправленням помилок FEC (англ. Forward Error Corection – пряме виявлення помилок) декодер

приймача може виправити певну кількість помилок в пакеті на основі властивостей коду [43].

1.3.1. Принципи надлишкового кодування

Під час каналного кодування до інформаційної послідовності додаються надлишкові біти. Нехай кодується k -бітна послідовність a . Припустимо, що джерело інформації може генерувати будь-яку комбінацію бітів в k -бітному блоці. Таким чином, існує 2^k різних інформаційних послідовностей. Додаючи до k -бітних інформаційних блоків $n-k$ додаткових бітів, ми отримуємо n -бітові послідовності. Існує всього 2^n різних двійкових послідовностей довжиною n , проте з них вибираються тільки 2^k послідовностей.

Як вже наголошувалося, завадостійкість кодування забезпечується за рахунок введення надлишковості в кодові комбінації. Це означає, що з n символів кодової комбінації для передачі інформації використовується $k < n$ символів. Отже, із загального числа $N_0 = 2^n$ можливих кодових комбінацій для передачі інформації використовується тільки $N = 2^k$ комбінацій. Відповідно до цього вся множина $N_0 = 2^n$ можливих кодових комбінацій ділиться на дві групи. До першої групи входить множина $N = 2^k$ дозволених комбінацій, друга група включає множину $N_0 - N = 2^n - 2^k$ заборонених комбінацій.

Якщо на приймальній стороні встановлено, що прийнята комбінація відноситься до групи дозволених то вважається, що сигнал прийшов без спотворень. Інакше робиться висновок, що прийнята комбінація спотворена. Проте, це справедливо лише для таких перешкод, коли виключена можливість переходу одних дозволених комбінацій в інші.

У загальному випадку кожна з N дозволених комбінацій може трансформуватися в будь-яку з N_0 можливих комбінацій, тобто всього є $N \cdot N_0$ можливих варіантів передачі, із них N варіантів безпомилкової передачі (на рис. 1.4. позначені жирними лініями), $N \cdot (N-1)$ варіантів переходу в інші дозвалені комбінації (на рис. 1.4. позначені пунктирними лініями) та $N \cdot (N_0 - N)$ варіантів переходу в заборонені комбінації (на рис. 1.4. позначені

штрихпунктирними лініями).

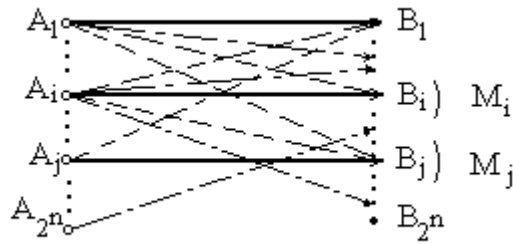


Рис.1.4 Можливі трансформації кодових комбінацій

Таким чином, не всі спотворення можуть бути виявлені. Частка помилкових комбінацій, що виявляються, складає:

$$\frac{N \cdot (N_0 - N)}{N \cdot N_0} = 1 - \frac{N}{N_0}. \quad (1.1)$$

Для використання коду як коректуючого, множину заборонених кодових комбінацій розбивають на N непересічних підмножин M_k . Кожна з підмножин M_k ставиться у відповідність одній з дозволених комбінацій.

Якщо прийнята заборонена комбінація належить підмножині M_i , то вважається, що передана комбінація A_i (рис. 1.4).

Помилка буде виправлена в тих випадках, коли одержана комбінація дійсно утворилася з комбінації A_i . Таким чином, помилка виправляється в $N_0 - N$ випадках, рівних кількості заборонених комбінацій. Частка помилкових комбінацій, що виправляються, від загального числа помилкових комбінацій, що виявляються, складає:

$$\frac{N_0 - N}{N \cdot (N_0 - N)} = \frac{1}{N}. \quad (1.2)$$

Спосіб розбиття на підмножини залежить від того, які помилки повинні

виправлятися даним кодом.

Для оцінки ступеня відмінності між двома довільними комбінаціями коду використовується характеристика, яка називається кодова відстань (відстань Хеммінга). Найменша відстань між дозволеними кодовими комбінаціями d_{\min} – дуже важлива характеристика коду, оскільки саме вона визначає його коректуючі здатності [21].

Побудувати код, що виявляє всі помилки кратністю t і нижче – означає із множини N_0 можливих, вибрати N дозволених комбінацій так, щоб будь-яка з них в сумі по модулю два з будь-яким вектором помилок з вагою $\omega \leq t_{\text{вияв}}$ не дала б в результаті ніякої іншої дозволеної комбінації. Для цього необхідно, щоб виконувалася умова для найменшої кодової відстані:

$$d_{\min} \geq t_{\text{вияв}} + 1. \quad (1.3)$$

У загальному випадку для виправлення помилок кратності $t_{\text{випр}}$ для кодової відстані повинна виконуватися умова:

$$d_{\min} \geq 2 \cdot t_{\text{випр}} + 1. \quad (1.4)$$

Для виправлення всіх помилок кратності не більше $t_{\text{випр}}$ і одночасного виявлення всіх помилок кратності не більше $t_{\text{вияв}}$ (при $t_{\text{вияв}} \geq t_{\text{випр}}$) для кодової відстані повинна виконуватися умова:

$$d_{\min} \geq t_{\text{вияв}} + t_{\text{випр}} + 1. \quad (1.5)$$

Зазвичай на практиці коди будуються так: спочатку вибирається кількість інформаційних символів k , далі забезпечується необхідна завадостійкість коду (задана кількість виявлених, або виправлених символів) шляхом додавання надлишкових символів.

1.3.2. Ефективність надлишкового кодування

В аналоговому зв'язку існує критерій якості, який називають відношенням середньої потужності сигналу до середньої потужності шуму S/N . В цифровому зв'язку критерієм якості є нормовано версія $S/N - E_b/N_0$; E_b – це енергія біта, яка визначається добутком потужності сигналу S на тривалість біта T_b . N_0 – спектральна густина потужності шуму, яку можна знайти як відношення потужності шуму N до ширини смуги частот W . Оскільки, час тривалості біта T_b та швидкість передачі бітів R_b взаємно обернені, отримаємо таку формулу:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S \cdot T_b}{N/W} = \frac{S/R_b}{N/W}, \quad (1.6)$$

після перетворень:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \cdot \left(\frac{W}{R} \right). \quad (1.7)$$

Оцінювати цифровий сигнал по критерію якості – відношення S/N недоцільно, оскільки миттєвий відлік аналогового сигналу може бути представлений 8-ма чи 12-ма розрядами, що приведе до зміни імовірності появи помилки [43].

Однією із найважливіших метрик в системах цифрового зв'язку є залежність імовірності появи помилкового біта P_b від E_b/N_0 . На рис. 1.5 зображено типову залежність P_b від E_b/N_0 :

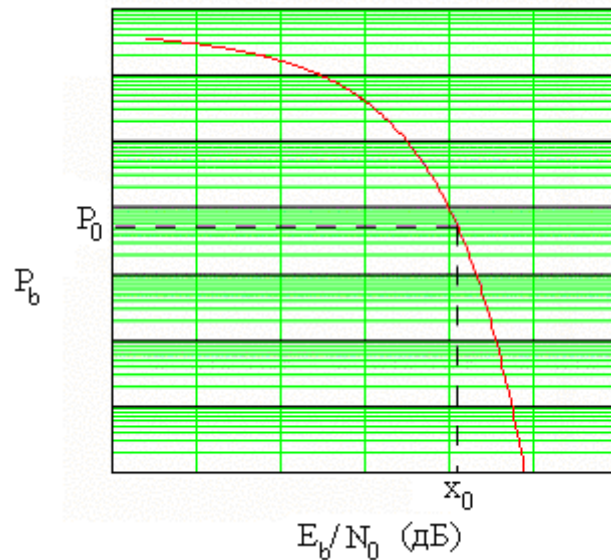


Рис.1.5. Загальний вигляд залежності P_b від E_b/N_0

Необхідне відношення E_b/N_0 можна розглядати як метрику, що дозволяє порівнювати якість різних систем: чим менше необхідне відношення E_b/N_0 тим ефективнішим є процес детектування при заданій імовірності помилок.

Застосування завадостійких кодів дозволяє виявляти, або виправляти помилки. Виникає питання: який результат дає застосування завадостійких кодів в системі зв'язку (крім можливості виявити помилки, або їх виправити).

Ефективність кодування показує наскільки застосування завадостійкого кодування дозволяє зменшити відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму при забезпеченні незмінної достовірності передачі. Ефективність кодування визначається за формулою:

$$G = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{нк}} - \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{к}} \quad (\text{дБ}), \quad (1.8)$$

де $(E_b/N_0)_{\text{нк}}$ – відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму без завадостійкого кодування; $(E_b/N_0)_{\text{к}}$ – відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму при використанні завадостійкого кодування рис. 1.6.

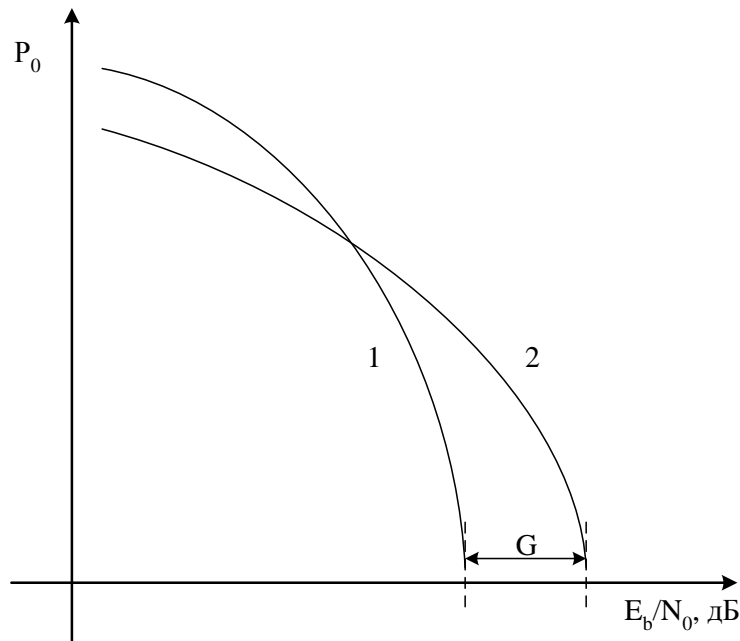


Рис.1.6 Ефективність кодування.

1 – з кодуванням, 2 – без кодування

Кодування з корекцією помилок можна розглядати як потужний інструмент, що реалізовує різні компроміси системи. Так, наприклад, використання кодування дозволяє зменшити ймовірність появи помилок в пакетах, покращити якість зв'язку, збільшити кількості користувачів, збільшити відстань на якій забезпечується задана якість зв'язку, зменшити потужність передавача та ін. Проте, негативною стороною таких покращень є збільшення необхідної смуги частот.

1.3.3. Типи захисту від помилок

Якщо захист від помилок полягає тільки в їх виявленні, система зв'язку повинна забезпечити засоби попередження передавача про те, що була виявлена помилка і потрібна повторна передача.

Подібні процедури захисту від помилок відомі як методи автоматичного запиту повторної передачі (Automatic Repeat Request – ARQ). На рис. 1.7 показані три найбільш поширені процедури ARQ. На кожній схемі вісь часу направлена зліва направо. Перша процедура ARQ, запит ARQ із зупинками

(stop-and-wait ARQ), показана на мал. 1.7, а. Її реалізація вимагає тільки напівдуплексного з'єднання, оскільки передавач перед початком наступної передачі чекає підтвердження про успішний прийом (acknowledgement — ACK) попередньої. В прикладі, приведеному на рисунку, переданий третій блок даних прийнятий з помилкою. Отже, приймач передає негативне підтвердження прийому (negative acknowledgement — NAK); передавач повторює передачу третього блоку повідомлення і лише після цього передає черговий блок даних. Друга процедура ARQ, неперервний запит ARQ із поверненням (continuous ARQ with pullback), показана на мал. 1.7, б. Тут необхідне повнодуплексне з'єднання. Два кінцеві пристрої починають передачу одночасно: передавач відправляє інформацію, а приймач передає підтвердження про прийом даних. Слід зазначити, що кожному блоку переданих даних привласнюється порядковий номер. Крім того, номери кадрів ACK і NAK повинні бути узгоджені; інакше кажучи, затримка розповсюдження сигналу повинна бути відомою апріорі, щоб передавач знав, до якого блоку повідомлення відноситься даний кадр підтвердження прийому. У прикладі на рис. 1.7,б час підібрано так, що між відправленим блоком повідомлення і одержаним підтвердженням про прийом існує постійний інтервал в чотири блоки. В блоці 4, 7 є помилка - передається сигнал NAK. При використанні процедури ARQ передавач “повертається” до повідомлення з помилкою і знову передає всю інформацію, починаючи з пошкодженого повідомлення. Третя процедура називається неперервним запитом ARQ із вибірковою повторенням (continuous ARQ with selective repeat) показана на рис 1.7, в. Тут, як і в другій процедурі потрібне повнодуплексне з'єднання. Втім, в цій процедурі повторно передається тільки спотворене повідомлення; потім передавач продовжує передачу з того місця, де вона перервалася, не виконуючи повторної передачі правильно прийнятих повідомлень [43].

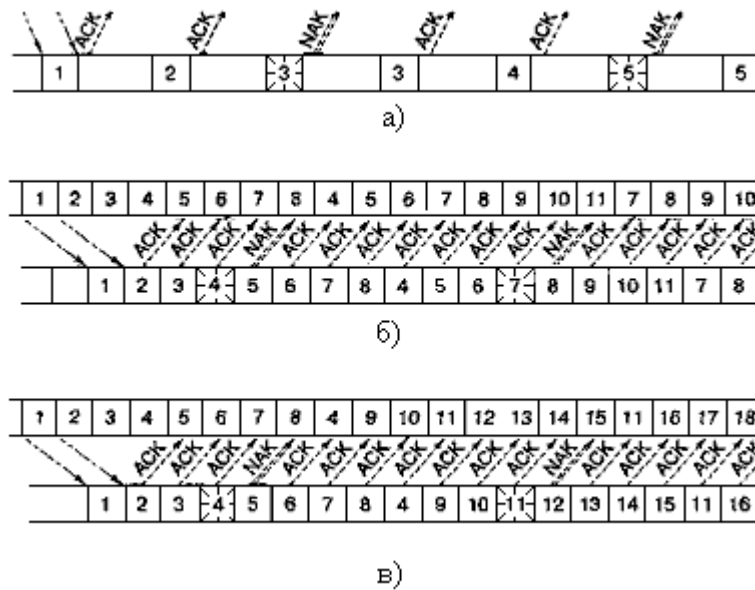


Рис.1.7 Автоматичний запит повторної передачі

а) запит ARQ із зупинками, б) неперервний запит ARQ з поверненням, в) неперервний запит ARQ із вибіркоvim повторенням

Вибір конкретної процедури ARQ є компромісом між вимогами ефективності застосування ресурсів зв'язку і необхідністю повно-дуплексного зв'язку. Напівдуплексний зв'язок вимагає менших витрат, ніж повнодуплексний зв'язок, в цей же час він є менш ефективним, що можна визначити по кількості пустих часових інтервалів. Більш ефективніша робота, показана на рис. 1.7,б вимагає дорожчого повнодуплексного зв'язку.

Головна перевага схем ARQ перед схемами прямого виправлення помилок (forward error correction – FEC) полягає в тому, що виявлення помилок вимагає більш простих декодуючих пристроїв і меншої надлишковості, ніж корекція помилок. Крім цього, ця схема є більш гнучкою: інформація передається повторно тільки за виявлення помилки.

Метод FEC передбачає, що декодер на основі властивостей коду сам виправить помилки, які виникли під час передачі. Цей метод в певних ситуаціях може виявитися більш зручним, ніж ARQ через декілька причин:

- зворотній канал недосяжний;
- алгоритм зворотної передачі неможливо реалізувати зручним способом;

- за очікуваної кількості помилок необхідно виконати багато повторних передач.

1.4. Класифікація кодів

Існує декілька критеріїв класифікації каналних кодів [8]. Перший з них – функція, яку вони виконують. За цією ознакою каналні коди діляться на:

- коди виправлення помилок;
- коди виявлення помилок.

Різниця між цими двома категоріями пояснювалася вище.

Другий критерій – це спосіб утворення кодів. Коди можуть бути:

- блочними – до k -бітного блоку додаються r перевірочних розрядів утворюючи кодову комбінацію довжиною n ;
- згортковими, якщо кодове слово c_j є функцією поточного інформаційного блоку a_j і декількох попередніх блоків $a_{j-1}, a_{j-2}, \dots, a_{j-i}$.

Кодер з блочним кодуванням може бути реалізований на логічних елементах, а кодер із згортковим кодуванням є автоматом і вимагає наявності елементів пам'яті. Термін “згортковий код” виник завдяки тому, що двійкову послідовність на виході кодера можна рахувати дискретною згорткою вхідного двійкового потоку з імпульсним відгуком кодера. Під поняттям “імпульсний відгук кодера” мається на увазі відгук кодера на одну “одиницю”, після якої слідує потік “нулів”.

Третій критерій класифікації базується на кількості різних символів, з яких будуються кодові слова. Символи, в основному, двійкові. Код, в якому кодові слова складаються з двійкових символів, називається двійковим кодом. Всі операції над елементами кодових слів проводяться на полі алгебри, що складається з двох елементів - нуля і одиниці. Таким чином, операція підсумовування представляє собою додавання по модулю 2, а операція перемножування – логічну кон'юнкцію.

У деяких випадках використовуються недвійкові коди. Для представлення кодових слів використовується кілька символів, навідміну від двійкових кодів з двома символами “0”, “1”. Типовий приклад застосування недвійкових кодів - це виправлення потоку двійкових даних, спотвореного пакетом помилок. Символи, що складають кодове слово недвійкового коду, вибираються з набору цифр $\{0, \dots, (2^m - 1)\}$. Кодове слово будується так, щоб складові його і наступні один за одним символи представлялися m -бітними блоками. В цьому випадку операція підсумовування - додавання по модулю 2^m , а операція перемножування - кон'юнкція по модулю 2^m . Якщо розмір пакету помилок не перевищує t бітів, будуть спотворені не більше двох наступних недвійкових кодових слів. Тобто для того, щоб виправити всі пакети помилок довжиною t бітів, досить застосувати недвійковий код, здатний виправити, принаймні, два помилкові символи.

1.5. Блочні коди

Яскравими представниками класу блочних кодів є коди Хемінга та циклічні коди [50].

Код Хеммінга (Hamming code) - це простий клас блокових кодів, який має наступну структуру:

$$(n, k) = (2^m - 1, 2^m - 1 - m), \quad (1.9)$$

де $m = 2, 3, \dots, Z$. Мінімальна кодова відстань для цього коду дорівнює 3, тому він здатний виправляти всі однократні помилки, або визначати всі моделі помилки з двох або меншого числа помилок в блоці. Хоча код Хеммінга не є дуже потужним, він належить до дуже обмеженого класу блокових кодів, які називаються досконалыми. Хеммінгом була визначена границя, яка встановлює співвідношення між кількістю перевірочних бітів та можливостями коду щодо корекції помилок кратності t :

$$2^{n-k} - 1 \geq C_1^n + C_2^n + \dots + C_t^n. \quad (1.10)$$

Для досконалих кодів ця нерівність перетворюється у рівність.

Якщо n та k мають великі значення, на практиці зручніше записати метод генерації кодових комбінацій в поліноміальному представленні. Кожна кодова комбінація записується у вигляді поліному.

$$C(x) = c_{n-1}x^{n-1} + c_{n-2}x^{n-2} + \dots + c_1x^1 + c_0. \quad (1.11)$$

Представлення кодових комбінацій у формі (1.11) дозволяє виконувати дії з кодовими комбінаціями так само як із многочленами. Додавання многочленів зводиться до сумування по модулю два коефіцієнтів при рівних степенях; множення відбувається за звичайним правилом множення степеневих функцій та додаванням за модулем два отриманих коефіцієнтів при рівних степенях; ділення відбувається за правилом ділення степеневих функцій із операцією додаванням за модулем два, що замінює операцію віднімання.

Циклічні коди одержали широке застосування завдяки їхній ефективності при виявленні і виправленні помилок. Схеми кодуючих та декодуючих пристроїв для цих кодів прості і будуються на основі звичайних регістрів зсуву.

Назва цих кодів походить від їх властивості, яка полягає в тому, що частина, або всі дозволені кодові комбінації можуть бути одержані шляхом циклічної перестановки символів комбінації, котра належить до цього ж коду. Якщо кодова комбінація $c_0, c_1, c_2, \dots, c_{n-1}$ є дозволеною кодовою комбінацією, тоді комбінація $c_{n-1}, c_0, c_1, c_2, \dots, c_{n-2}$ також є дозволеною.

Побудова циклічних кодів базується на використанні породжуючих (генераторних) поліномів - $g(x)$, які використовуються для знаходження дозволених кодових комбінацій. Породжуючим називають поліном, який не ділиться без остачі на інші поліноми, крім самого себе та одиниці.

Ідея корекції помилок в циклічних кодах базується на тому, що дозволені

кодові комбінації діляться без остачі на деякий породжуючий поліном. Якщо в прийнятій кодовій комбінації наявна помилка, після ділення на породжуючий поліном остача буде відмінна від нуля. Коректуючі здатності циклічного коду визначаються породжуючим поліномом.

Отримати дозволена кодову комбінацію циклічного коду можна перемноживши інформаційну комбінацію на породжуючий поліном. Таким чином, можна отримати всі необхідні кодові комбінації. При використанні такого методу точно вказати розташування інформаційних та перевірочних бітів буде складно. Отримаємо кодові комбінації в неканонічній формі представлення.

$$C(x) = a(x) \cdot g(x). \quad (1.12)$$

При використанні іншого способу побудови кодових комбінацій поліном повідомлення множиться на одночлен виду x^{n-k} , а після цього ділиться на породжуючий поліном $g(x)$ для знаходження остачі від ділення. Результат таких операцій можна представити в такому вигляді:

$$\frac{x^{n-k} a(x)}{g(x)} = q(x) + \frac{p(x)}{g(x)}, \quad (1.13)$$

де $p(x)$ – остача від ділення; $q(x)$ – частка від ділення.

Помноживши праву та ліву частини на $g(x)$ отримаємо:

$$x^{n-k} a(x) = q(x)g(x) + p(x). \quad (1.14)$$

Додаючи $p(x)$ до обох частин рівняння (1.14) використовуючи сумування за модулем два, отримаємо дозволена кодову комбінацію з чітко розділеними бітами повідомлення та перевірки:

$$x^{n-k}m(x) + p(x) = q(x)g(x) = U(x),$$

$$C(x) = \underbrace{(a_{k-1}, \dots, a_1, a_0)}_{\substack{k \text{ біт} \\ \text{повідомлення}}} \cdot \underbrace{(p_{n-k-1}, \dots, p_1, p_0)}_{\substack{n-k \text{ біт} \\ \text{перевірки}}}. \quad (1.15.)$$

Серед циклічних кодів особливо важливе значення мають коди БЧХ (англ. BCH - Bose-Chadhuri-Nocquenghem). При використанні цих кодів можна проводити коректування більш ніж однієї помилки, а мінімальна відстань між кодovими словами довжиною n в кодi БЧХ більша, ніж мінімальна відстань між кодovими словами тієї ж довжини в інших кодах.

1.6. Згорткові коди

Згорткові коди є дуже важливим класом кодів з корекцією помилок. Вони все частіше використовуються в цифрових системах зв'язку [43]. До основних переваг згорткових кодерів можна віднести простоту процедури кодування і добре відомі технології декодування як з м'яким, так і з жорстким рішенням.

Кодування з допомогою згорткового кодера

На відміну від блочного кодування де є чітко встановлений розмір кодового блоку в згорткових кодах використовується кодове обмеження. Довжина кодового обмеження – розмір регістру зсуву який використовується під час кодування на рис. 1.8 зображено згортковий кодер.

Пояснимо роботу згорткового кодера. На вхід кодера поступають біти m_i , які записуються в запам'ятовуючий регістр. За один такт в регістр може бути записано до k біт - k біт зліва займають місце правих k біт, а вільне місце заповнюється вхідними бітами. Таким чином, вхідні біти пересуваються зліва направо. Кількість розрядів регістра дорівнює $k \cdot K$ (k – кількість біт, які будуть записані в регістр за один такт роботи, K – довжина кодового обмеження).

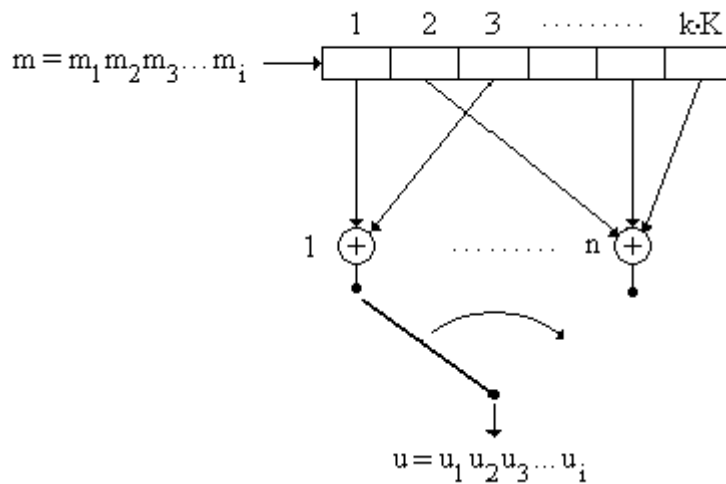


Рис.1.8 Згортковий кодер

Довжина кодового обмеження визначає кількість k -бітих зсувів після яких один інформаційний біт може вплинути на вихідний сигнал кодера. До окремих бітів регістра приєднані суматори з модулем 2. Їхня кількість може становити від 1 до n . Таким чином, вхідні інформаційні біти рухаючись зліва направо в регістрі зсуву поступають на входи суматорів, а результат операції сумування з модулем 2 буде визначати частинку закодованої комбінації. Спеціальний комутатор за один такт опитує виходи всіх суматорів формуючи вихідну закодовану комбінацію. Оскільки для кожної вхідної групи бітів довжиною k на виході кодера утворюється n біт коду ступінь кодування складає k/n . На відміну від блочних кодів які мають фіксовану довжину комбінації n , в згорткових кодах немає чітко визначеної довжини комбінації. Проте, згортковим кодам надають блочну структуру, що вимагає додання певної кількості нульових розрядів в кінці вхідної послідовності інформації. Додають ці нульові біти для “очищення” регістру від даних. Таким чином ефективна ступінь кодування буде меншою за відношення k/n .

Вибір зв'язку між суматорами та розрядами регістру впливає на характеристики коду. Зв'язки кодера можна описати за допомогою поліноміального генератора. Згортковий кодер можна представити у вигляді набору із n поліноміальних генераторів, кожен з яких відповідає певному

суматору. На рис. 1.9 зображено згортковий кодер із двома суматорами за модулем два.

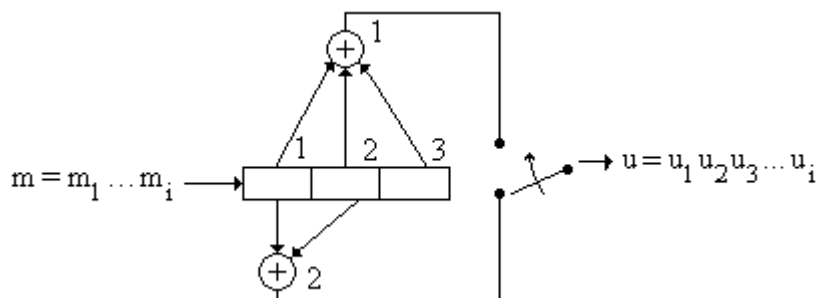


Рис.1.9 Згортковий кодер з двома суматорами за модулем 2

Аналізуючи зв'язки суматорів з регістрами, сигнал на виході кодера можна знайти за допомогою поліноміальних генераторів.

$$g_1(X) = 1 + X + X^2 \text{ (для суматора 1)}$$

$$g_2(X) = 1 + X \text{ (для суматора 2)}$$

Сигнал на виході кодера буде визначатися таким чином:

$$U(X) = [m(X) \cdot g_1(X) \text{ перемішування } m(X) \cdot g_2(X)]$$

Припустимо, що на вхід кодера прийшла послідовність $m = 1\ 0\ 1$, запишемо її у вигляді поліному $m = 1 + X^2$.

	1	X¹	X²	X³	X⁴
$m(X) \cdot g_1(X)$	1	$1 \cdot X^1$	$0 \cdot X^2$	$1 \cdot X^3$	$1 \cdot X^4$
$m(X) \cdot g_2(X)$	1	$1 \cdot X^1$	$1 \cdot X^2$	$1 \cdot X^3$	$0 \cdot X^4$
U(X)	(1,1)	(1,1)	(0,1)	(1,1)	(1,0)
U	11	11	01	11	10

Існує кілька способів опису роботи згорткових кодерів: діаграма станів, деревоподібна діаграма, решітчаста діаграма. Оскільки згортковий кодер належить до класу пристроїв відомих як скінчені автомати – його роботу можна

описати діаграмою станів. Якщо використовується деревоподібна діаграма, описати роботу кодера стає складніше, оскільки кількість відгалужень дерева збільшується пропорційно 2^L , L – кількість кодових комбінацій (кількість бітів n). Тому найчастіше використовується решітчаста діаграма рис. 1.10.

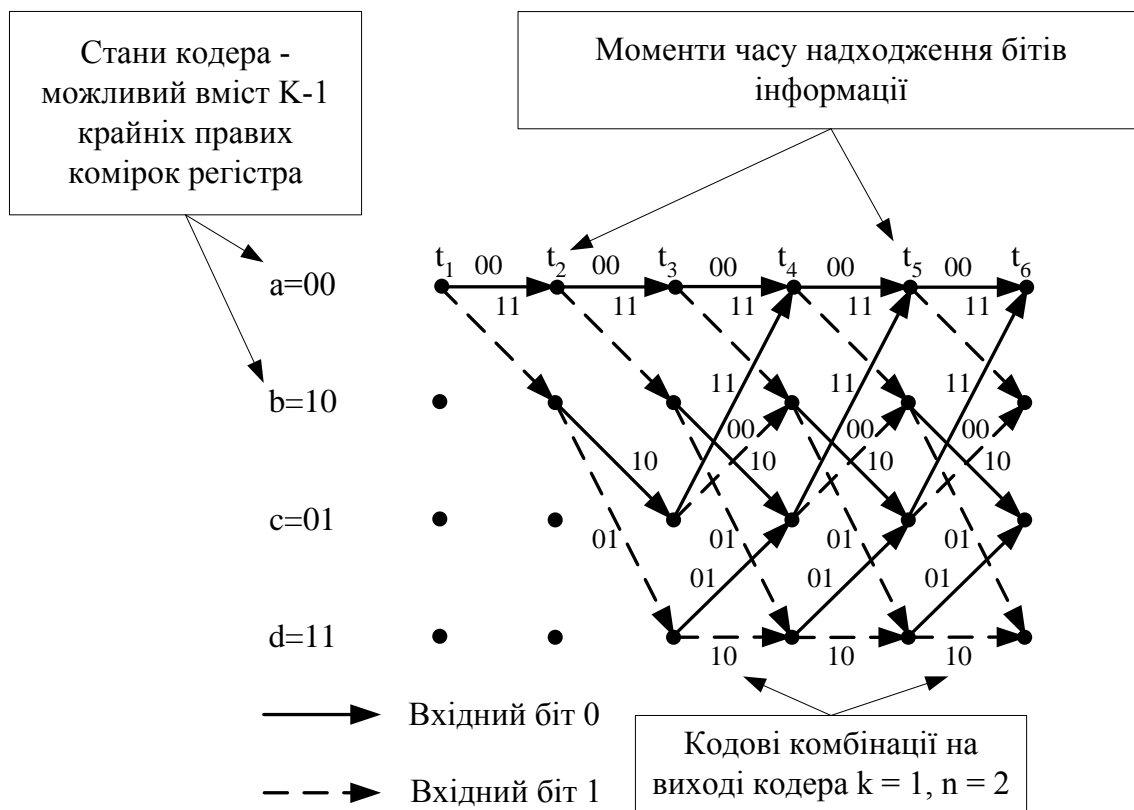


Рис.1.10 Решітчаста діаграма згорткового кодера

Такий тип діаграми описує можливі переходи кодера із станів в i -й момент часу в інші стани $i + 1$ -го моменту часу. Блоки бітів на виході відповідають конкретним переходам між станами і зображені на рис. 1.10 над лініями із стрілками, які символізують ці переходи. Збудження, які зумовлюють переходи між станами, зображені суцільними лініями у разі нульового вхідного сигналу і пунктирними лініями у разі вхідного сигналу, рівного логічній одиниці. Звернемо увагу на те, що в даному кодері кожному біту на вході відповідають два біти на виході, тобто для даного коду коефіцієнт кодування складає $R = k/n = 1/2$. На рис. 1.10 зображені всі можливі переходи між станами в i -й момент часу. Можна легко представити весь ланцюжок переходів, починаючи з

початкового моменту часу і закінчуючи поточним. Важливо також відмітити, що достатньо побудувати K стовпців решітчастої діаграми, оскільки діаграма має періодичну структуру. Структура решітчастої діаграми повторюється після K стовпців, тому достатньо побудувати $2 \cdot K$ стовпців для розуміння роботи кодера.

Таким чином, робота кодера може бути представлена рухом (між послідовними станами) певним шляхом в решітчастій діаграмі. Нам відомо, що переходи між станами визначаються станом кодера і вхідним сигналом збудження. Відмітимо, що якщо декодеру відомо про стан кодера в початковий момент часу (який звичай характеризується нулями у всіх елементах пам'яті), в такому випадку визначення послідовності інформаційних символів під час процесу кодування зводиться до визначення шляху кодера в решітчастій діаграмі. Отже, в основі алгоритму декодування лежить знаходження найбільш вірогідного шляху кодера на решітчастій діаграмі.

Декодування за допомогою згорткового кодера

Як і у випадку декодера блочних кодів, оптимальний в термінах максимальної правдоподібності декодер згорткових кодів вибирає найбільш близьке до прийнятої кодової комбінації кодове слово. В декодуванні з жорстким рішенням використовується відстань Хеммінга (кількість бітів на які відрізняються кодові комбінації). В декодуванні з м'яким рішенням використовується Евклідова відстань.

Ефективний метод декодування запропонував в 1967 р. Ендрю Вітербі [43]. Алгоритм Вітербі шукає оптимальну кодову послідовність, яка асоціюється з "найкоротшим шляхом" (в термінах вибраної міри відстані) на решітчастій діаграмі рис. 1.11. Він знаходиться на основі побудови шляхів із поточних станів в наступні та визначення метрики шляху. Тобто, переходу між станами на решітчастій діаграмі ставиться у відповідність певна величина. Вона визначається як відстань між кодовою послідовністю, що відповідає даному переходу та прийнятою послідовністю. Це є відстань Хеммінга Під час нового

переходу метрика кожного шляху збільшується на величину відстані Хемінга.

На кожному етапі декодування шлях який має найменше значення метрики вибирається, а решта шляхів відкидаються. Ці операції повторюються на кожному етапі декодування. Вибраний шлях називається “повною гілкою”. Якщо шляхи мають однакове значення метрики оптимальний шлях вибирається довільно.

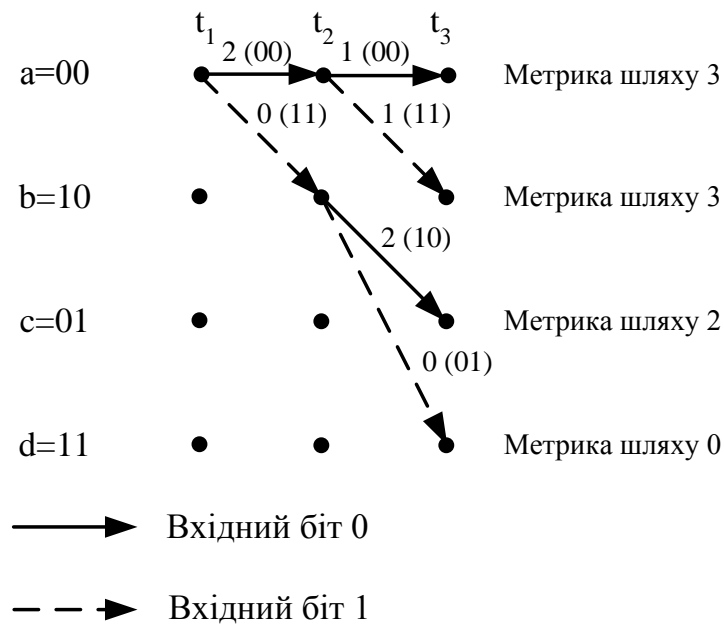


Рис.1.11 Знаходження метрики шляхів

Розглянемо рисунок 1.11. Поряд із значенням метрики гілок в дужках вказано закодоване слово, яке виходить з кодера. Припустимо, що декодеріві відомий початковий стан кодера.

інформаційні біти m:	1	1
передані закодовані слова U:	11	01
прийнята послідовність Z:	11	01

Перехід між станами 00 → 00 має метрику гілки 2 (оскільки відстань Хемінга між прийнятим словом 11 і вихідним словом кодера 00 рівна два).

Перехід між станами $00 \rightarrow 10$ має метрику гілки 0 (оскільки відстань Хемінга між прийнятим словом 11 і вихідним словом кодера 11 рівна нулю). Декодер вибере шлях з мінімальним значенням метрики – 0. Цьому переходу відповідає інформаційний біт 1 рис. 1.10. В момент часу t_2 з кожного поточного стану наявні дві гілки переходів. Декодер визначить сумарну метрику шляхів та вибере шлях з найменшим значенням. Тобто декодер встановив, що між моментами часу t_2 і t_3 відбувся перехід із стану $b = 10$ в $d = 11$. Цьому переходу відповідає інформаційний біт 1. Таким чином буде відбуватися декодування решти інформації.

Отже вибір найкоротшого шляху до кожного стану є рекурсивною процедурою - найкоротший шлях визначається з урахуванням результатів пошуку в попередній момент.

Окрім алгоритму Вітербі існують інші методи декодування згорткових кодів, наприклад, алгоритм Фано (Fano), або алгебраїчне декодування. Проте алгоритм Вітербі має величезне практичне значення - завдяки ньому згорткові коди стали доступними з погляду практичної реалізації. Він використовується в основних системах рухомого зв'язку другого і третього покоління - GSM, IS-54/136, IS-95, UMTS і cdma 2000.

1.7. Перемежування

Під час передачі інформації виникаються помилки. Помилки можуть бути однократними, двократними. Такі помилки достатньо легко можна усунути використовуючи завадостійкі коди. Проте виникають ситуації, коли імпульсна завада спотворює підряд 10 або 15 бітів інформації – виникають пакетні помилки. Звичайні коди виправити такі помилки не можуть. Розроблений спеціальний клас кодів, який назвали кодами Ріда-Соломона (Reed-Solomon code, R-S code). Властивості таких кодів дозволяють виправляти пакетні помилки. Але реалізація кодерів та декодерів є досить складною. Тому додатково використовують дуже простий метод розбиття пакетної помилки на окремі групи – перемежування.

Перемежування використовується в передавачі на виході FEC-кодера, а депережування в приймачі перед декодером. Перемежування полягає в тому, що сформовані кодером біти передаються каналом зв'язку не в тому порядку, в якому вони були утворені, а іншому. Така модифікована послідовність може бути спотворена пакетом помилок, внаслідок особливостей передачі даних в каналі зв'язку. В приймачі прийняті біти переставляються так, щоб відновити початкову послідовність руху бітів. Пакетна помилка як виникла в процесі передачі таким чином розбивається на окремі помилки або групи меншого розміру. Тобто депережування ніби розсіює пакети помилок по всьому оброблюваному блоку бітів. Таким чином, на виході депережувача помилки стають статистично квазізалежними. Перемежувачі діляться на дві основні категорії: блокові і згорткові.

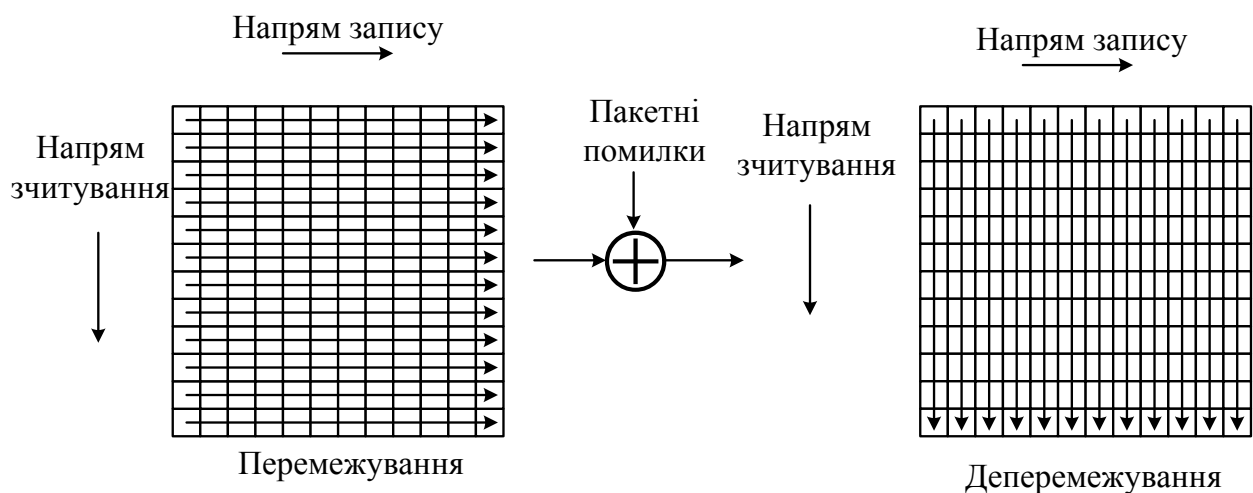


Рис.1.12 Блочне перемежування та депережування

В блоковому перемежувачі біти з виходу кодера записуються у вигляді двовимірної матриці в певному порядку. Найпростіший спосіб - записати біти у вигляді послідовних рядків. Після заповнення всієї матриці вхідними бітами починається етап зчитування. При цьому біти зчитуються в порядку, відмінному від порядку запису. Зчитування проводиться по стовпцях. В приймачі вхідні біти зберігаються в такій самій двовимірній матриці в тому ж порядку, в якому вони були зчитані в передавачі. Після заповненні матриці

прийнятими бітами вони зчитуються в тому ж порядку, в якому були записані в матрицю перемежувача. Запис по рядках і зчитування по стовпцях — найпростіший спосіб розсіювання пакетів помилок. Можна визначити іншу послідовність запису і зчитування в перемежувачі і деперемежувачі. Обидва процеси повинні бути комплементарні один одному. Послідовність адрес і розмір матриці, що визначає так звану глибину перемежування, повинні бути підібрані так, щоб пакетні помилки, які виникають в каналі після розсіювання виглядали випадковими.

Для коректної роботи перемежувача і деперемежувача необхідна синхронізація. Якщо часові рамки зчитування передавача і приймача будуть зсунуті один відносно іншого, порядок бітів на виході з деперемежувача не дасть правильних результатів. Тому, послідовність, яка передається часто починається з короткого синхронізуючого слова. Оскільки запис в матрицю і зчитування з неї проводяться одночасно, кількість матриць подвоюється. В момент часу коли одна з них використовується для зберігання вхідних даних, інша використовується для зчитування даних, записаних раніше. Після завершення операцій запису/зчитування змінюється функція матриць.

Здатність розсіювати пакетні помилки визначається глибиною перемежування. Тобто, необхідно збільшувати розміри матриці, щоб ефективно боротися з пакетними помилками. Збільшення розмірів матриці приведе до використання більшого об'єму пам'яті та зростання вимоги щодо синхронізації передачі. Цікавим є питання використання матриць змінного розміру та пошуку алгоритмів запису/зчитування біт в матрицю. Проте воно виходить за межі тем, які розглядаються в даній книзі.

1.8. Каскадне кодування

Як зазначалося вище для боротьби з помилками великої кратності необхідно застосовувати складні коди та інші спеціальні заходи наприклад, перемежування. Альтернативою використання коректуючих кодів, які здатні виправляти помилки великої кратності (що збільшують складність кодера та

декодера) є застосування каскадного кодування.

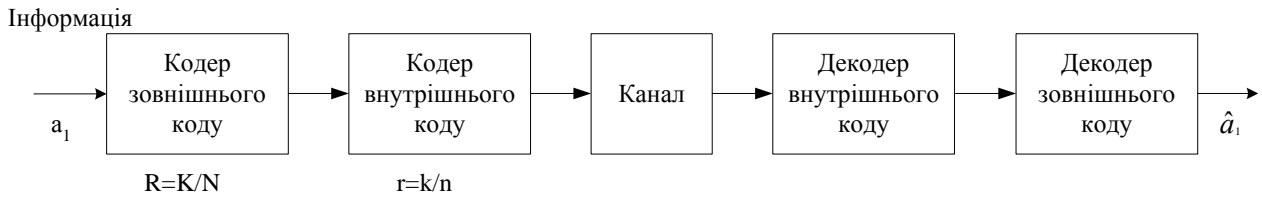


Рис.1.13 Принцип каскадного кодування

Використання кількох кодів послідовно в техніці зв'язку отримала назву каскадного кодування. Ідея каскадного кодування була запропонована Форні (Forney) в 1966 р. (рис. 1.13). Канальне кодування в передавачі реалізується двома кодерами. Перший називають кодером зовнішнього коду, або зовнішнім кодером. Коефіцієнт кодування першого кодера дорівнює:

$$R = \frac{K}{N}, \quad (1.16)$$

де K - це кількість інформаційних бітів; N - довжина кодового слова. Кодер внутрішнього коду (внутрішній кодер) має такий коефіцієнтом кодування:

$$r = \frac{k}{n}, \quad (1.17)$$

де k - кількість інформаційних бітів з виходу зовнішнього кодера; n - довжина кодового слова. Можна легко показати, що сумарний коефіцієнт кодування дорівнює $rR = Kk/nN$.

$$\hat{R} = R \cdot r = \frac{K}{N} \cdot \frac{k}{n}. \quad (1.18)$$

У приймачі потік даних з виходу каналу обробляється декодером

внутрішнього коду, а інформаційні біти з його виходу відправляються на вхід декодера зовнішнього коду.

Розроблено кілька різних реалізацій внутрішніх і зовнішніх кодів. У багатьох застосуваннях як внутрішній код використовується згортковий код, а як зовнішній код використовується недвійковий код Ріда-Соломона. Завдання внутрішнього коду є виправити якомога більше помилок, обумовлених каналом передачі даних. Однак деякі комбінації помилок не можуть бути виправлені й приводять до появи пакетів помилок на виході декодера згорткового коду. Тоді, пакети помилок що залишилися, виправляє декодер зовнішнього коду.

1.9. Турбо-кодування

Ідея турбо-кодування вперше була запропонована в 1993 р [8]. Приклад кодера турбо-коду (турбо-кодер) зображений на рис. 1.14, а відповідний йому декодер турбо-коду (турбо-декодер) - на рис. 1.15. Турбо-кодер на рис. 1.14 складається із двох кодерів рекурсивного систематичного коду (англ. Recursive Systematic Code - RSC), перемежувача і пристрою ущільнення та виколювання. Рекурсивний систематичний код - це різновид згорткового коду, в якому вхідні інформаційні біти передаються безпосередньо на вихід, а надлишкові біти генеруються логічним колом яке містить регістр зсуву зі зворотним зв'язком. Виявляється, що застосування двох паралельних RSC-кодерів з перемежувачем перед другим дозволяє генерувати коди з “хорошими” властивостями наприклад, велика відстань Хеммінга між кодovими словами. Важливу роль у продуктивності коду відіграє конструкція перемежувача.

Зазвичай використовуються нерівномірні (псевдовипадкові) перемежувачі. У них зчитування й запис в пам'ять відбуваються псевдовипадковим чином. Як і в інших перемежувачах, процеси зчитування й запису комплементарні один одному. Для досягнення високої продуктивності коду пам'ять перемежувача повинна бути великою, що приводить до більших затримок кодування й декодування. Використання двох RSC-кодерів обумовлює найменшу кодову швидкість усього кодера $R = 1/3$ (для кожного вхідного біта генеруються три

вихідних біти). Однак її можна збільшити за допомогою перфорування коду.

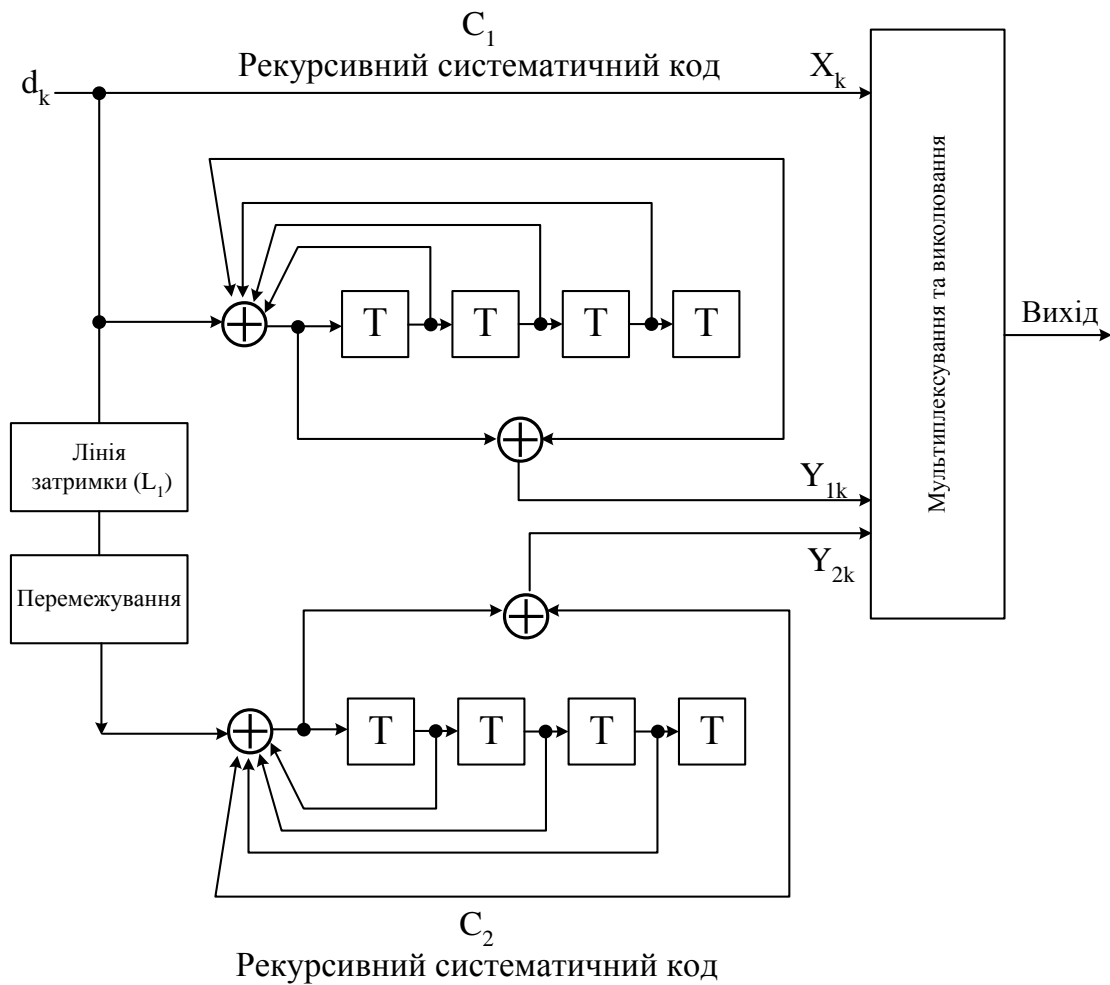


Рис.1.14 Структур кодера турбо-коду

Декодер турбо-коду складається із двох декодерів з м'яким входом/м'яким виходом, розділених перемежувачем. Вихідний сигнал другого декодера надходить назад на вхід першого декодера. Декодування відбувається ітераційним способом у колі зворотного зв'язку. Два декодери використовують інформацію про стан каналу, котра складається з миттєвого значення амплітуди й шумових відхилень. Два декодери обробляють інформаційні сигнали, надлишкові сигнали та значення логарифмічних відношень правдоподібності. Ефективність турбо-декодера, виражена як функція BER від E_b/N_0 підвищується зі збільшенням числа ітерацій у процесі декодування.

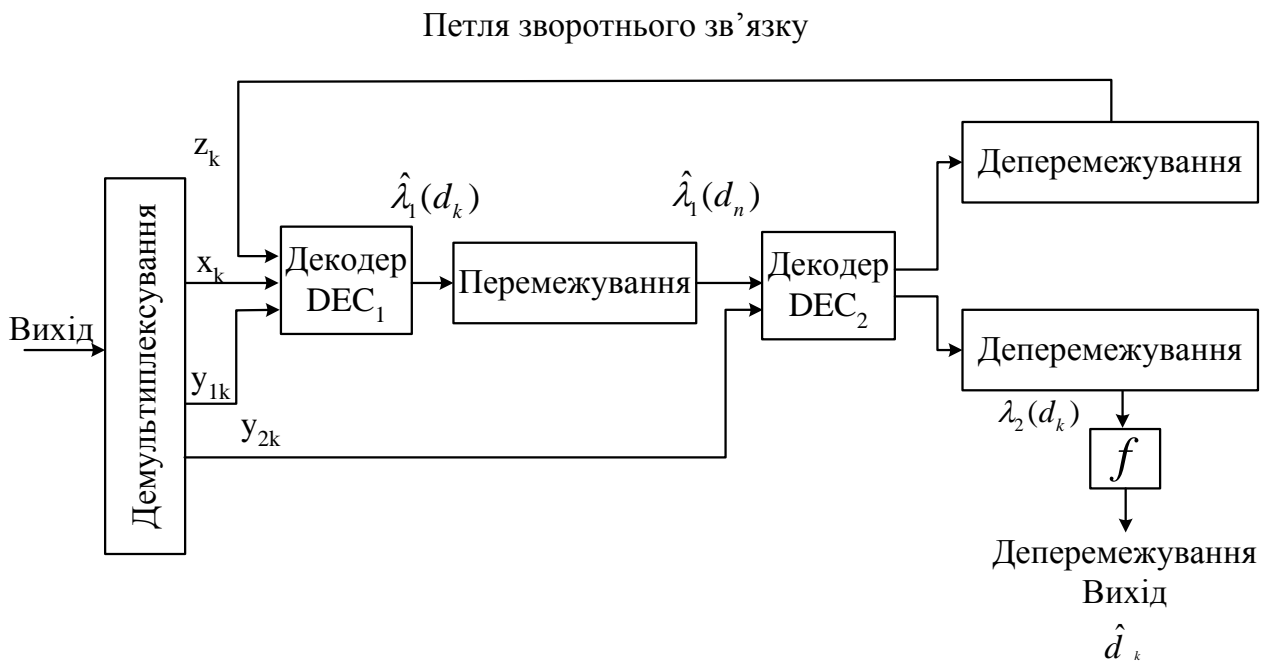


Рис.1.15 Структура декодера турбо-коду

Турбо-коди можуть бути використані в системах, що вимагають дуже низьких BER і допускають більшу затримку, яка вноситься під час декодування.

2. ЦИФРОВА МОДУЛЯЦІЯ

2.1. Загальні зауваження

Суть проблеми

Для чого потрібна модуляція і чим цифрова модуляція (або маніпуляція) відрізняється від аналогової. Чому цифрова модуляція має значно більше видів, порівняно з аналоговою, та які види модуляції використовуються в сучасних безпроводних технологіях.

Основні результати

Модуляція обов'язково використовуються в таких системах, де канал зв'язку характеризується заданим діапазоном частот $f_{\min} \div f_{\max}$. Саме такими є безпроводні канали зв'язку (рис. 2.1).

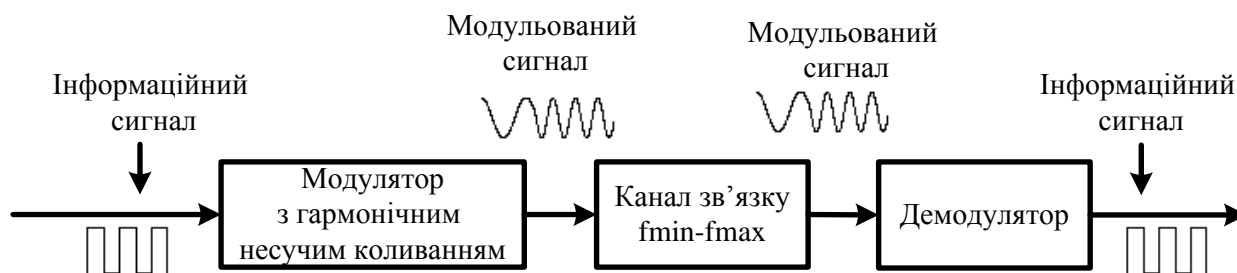


Рис.2.1 Спрощена структурна схема безпроводної системи зв'язку

Основним призначенням модуляції (modulation) є перенесення інформаційного сигналу з області низьких частот в область більш високих частот $f_{\min} \div f_{\max}$, виділених для конкретного каналу зв'язку. Отже, модуляцією може бути названий процес накладання інформації (або модуляційного сигналу) на другий сигнал з більш високою частотою f_0 , яка називається несучою (carrier) частотою, причому, як правило $f_0 = (f_{\max} - f_{\min})/2$. В результаті отримуємо модульований сигнал. В якості несучого коливання в радіозв'язку практично завжди використовується гармонічний сигнал, тому що він займає найвузжчий спектр, порівняно з іншими видами сигналів.

Інформаційний сигнал може бути аналоговим (або неперервним, наприклад звуковий сигнал з виходу мікрофона) та цифровим (або дискретним, наприклад у вигляді послідовності нулів та одиниць). В залежності від типу модуляційного сигналу розрізняють аналогову, або цифрову модуляцію (рис. 2.2).

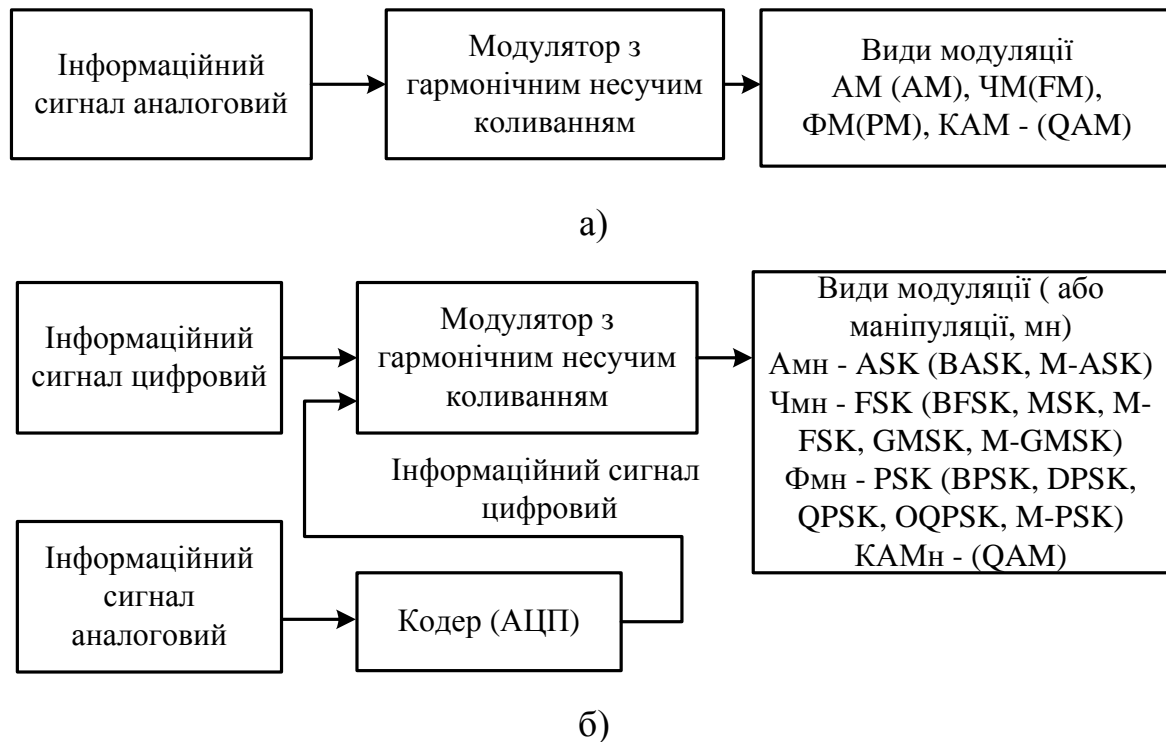


Рис.2.2 Модуляція а) аналогова, б) цифрова

Більшість сучасних систем радіозв'язку використовують цифрову модуляцію. Навіть системи, призначені для передачі голосових повідомлень, (наприклад, DECT, або коміркового зв'язку) попередньо в кодеках перетворюють аналогову інформацію в цифрову і далі використовують цифрову модуляцію.

У випадку цифрового модулюючого сигналу зміна параметрів несучого коливання, в більшості випадків, здійснюється стрибкоподібно, тобто здійснюється маніпуляція, або комутація сигналів - англійський термін *keying*. При здійсненні маніпуляції цифровий модулюючий сигнал, як правило стрибкоподібно, змінює один (або два) з параметрів A , ω , φ несучого високочастотного коливання S_B .

$$S_e = A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + \varphi). \quad (2.1)$$

Відомі такі основні форми аналогової модуляції сигналів:

- АМ (amplitude modulation - АМ), амплітудна модуляція;
- ЧМ (frequency modulation - FM), частотна модуляція;
- ФМ (phase modulation - PM), фазова модуляція;
- КАМ (quadrature amplitude modulation), квадратурна модуляція.

У випадку використання цифрових модулюючих сигналів вони перетворюються на відповідні види маніпуляцій:

- АМн (amplitude shift keying - ASK), амплітудна маніпуляція;
- ЧМн (frequency shift keying - FSK), частотна маніпуляція;
- ФМн (phase shift keying - PSK), фазова маніпуляція;
- КАМн (quadrature amplitude modulation - QAM).

На рис 2.3 приведені деякі види бінарної маніпуляції, при якій інформаційний сигнал приймає лише два значення (0 або 1), та модульований сигнал також приймає лише два дискретні значення (амплітуди, частоти або фази). Такі види модуляції позначаються додатково буквою В (від binary – двійковий), тобто BASK, BFSK, BPSK.

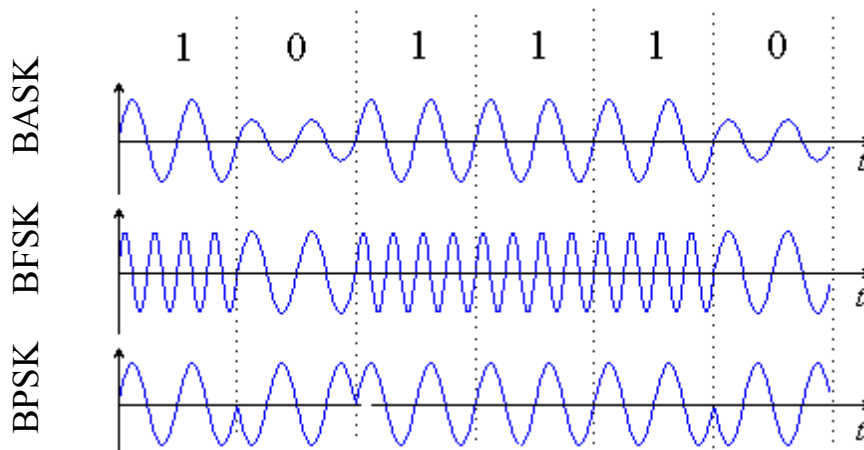


Рис.2.3 Різні види двійкової цифрової модуляції

В системах коміркового зв'язку з використанням технологій CDMA найбільш поширеними являються різні види цифрової фазової модуляції – BPSK, QPSK, OQPSK.

Комплексна огибаюча

Опис реальних модуляторів та демодуляторів спрощується при використанні комплексної форми запису. Гармонічний сигнал (2.1) з амплітудою A_1 та фазою $\varphi = \varphi_1$ можна також записати у вигляді:

$$S_s = \operatorname{Re}(A_1 \cdot e^{i\varphi_1} \cdot e^{i2\pi f_0 t}) = \operatorname{Re}[A_1 \cdot (\cos(\varphi_1) + i \cdot \sin(\varphi_1)) \cdot (\cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t) + i \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t))] =, \quad (2.2)$$

$$= A_1 \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t) - A_1 \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)$$

де $A_1 e^{i\varphi_1}$ – комплексна амплітуда.

На основі залежності (2.2) гармонічний сигнал (2.1) можна представити у вигляді суми двох складових:

- синфазний канал I, який містить високочастотне коливання $A_1 \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \cos(2\pi f_0 t)$, синфазне з (2.1);
- квадратурний канал Q, який містить високочастотне коливання $A_1 \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \sin(2\pi f_0 t)$, що знаходиться в квадратурі (зсунутий на $\pi/2$) з сигналом (2.1).

Гармонічний сигнал (2.1) можна також представити (рис. 2.4) у вигляді вектора в полярній системі координат (точки сузір'я).

При представленні у векторному вигляді досить в полярній системі координат вказати розміщення однієї точки (наприклад, кінця вектора A на рис. 2.4).

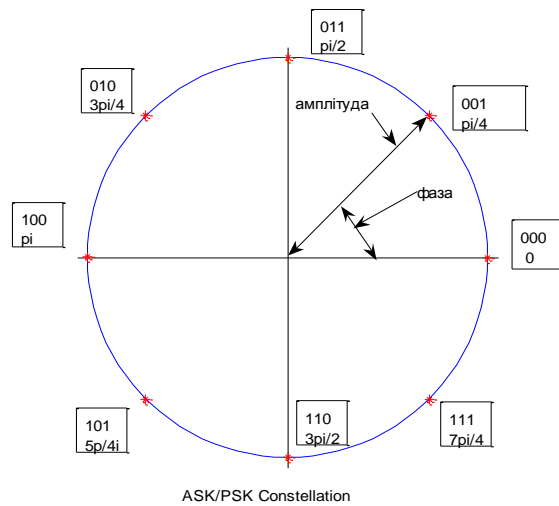


Рис.2.4. Представлення гармонічного сигналу у векторному виді

Довжина вектора A_1 вказує на амплітуду гармонічного сигналу, кут φ_1 - на початкову фазу, швидкість обертання вектора проти годинникової стрілки – на частоту сигналу ω_0 , а проекція кінця вектора (точки А) на вісь x – миттєве значення сигналу (2.1). Векторне представлення сигналу особливо зручне при розгляді багатопозиційних модуляцій.

2.2. Двопозиційні та багатопозиційні види маніпуляції

Двопозиційні (бінарні) способи модуляції характеризуються тим, що модулюючий сигнал може мати тільки два можливих стани, наприклад 0 або 1 (рис. 2.5). Отже, модульований сигнал також містить лише два символи А, або В (символи А і В можуть відрізнитись амплітудою, частотою або фазою).

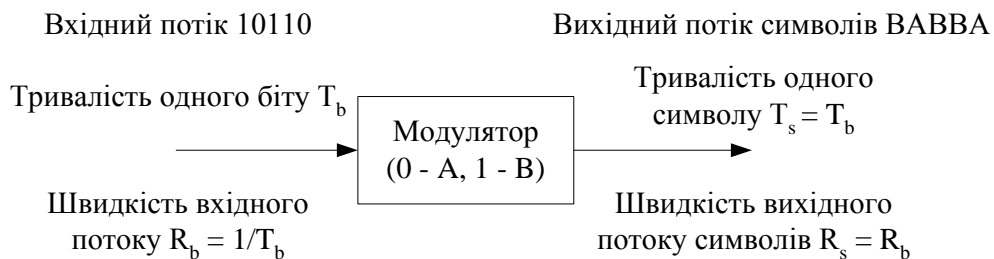


Рис.2.5 Двопозиційна модуляція

Але немає принципових причин для того, щоб модулятор не міг формувати

і більше число символів модульованого коливання. Такі системи називаються багаторівневими, багато позиційними, або просто М-арними. Згрупуємо, наприклад, вхідні біти в послідовні групи по 2 біти (дибіти) в кожній групі. В результаті отримаємо 4 можливі варіанти вхідних символів. Далі, в модуляторі кожному з чотирьох варіантів вхідних символів поставимо у відповідність вихідний символ (рис. 2.6).

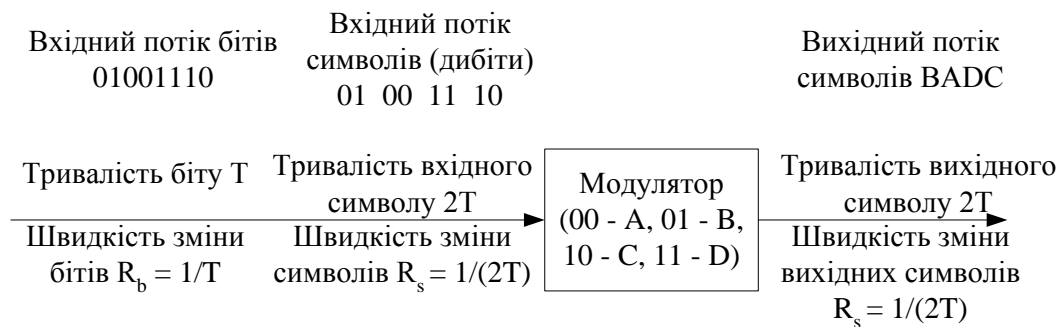


Рис.2.6 М-арна модуляція (M = 4)

На практиці М переважно приймають рівним 2^x ($x = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\dots$). Бачимо, що при M=4 швидкість зміни вихідного потоку символів зменшилась в два рази порівняно з швидкістю вхідного потоку бітів.

При використанні схеми, в якій за один такт обробляється k біт називається М-арною, причому:

$$M = 2^k, \quad k = \log_2(M). \quad (2.3)$$

В цьому випадку групі з k біт ставиться у відповідність один із М символів. Оскільки один символ, який несе інформацію про k бітів, передається за час T_s , швидкість передачі даних R_m при використанні М арної маніпуляції становить:

$$R_m = \frac{k}{T_s}. \quad (2.4)$$

Очевидно, що каналу зв'язку із смугою W абсолютно однаково буде передавати окремі біти, чи символи, які означають групу бітів, якщо тривалості бітів, або символів однакова між собою.

$$T_b = T_s. \quad (2.5)$$

При бінарній маніпуляції швидкість передачі даних R_b становить:

$$R_b = \frac{1}{T_s}. \quad (2.6)$$

З залежностей (2.4)÷(2.6) можна визначити:

$$\frac{R_m}{R_b} = \frac{k}{T_s} \cdot \frac{T_b}{1} = k. \quad (2.7)$$

Отже, якщо в M -арній модуляції за один такт обробляється k -бітів, то швидкість передачі інформації також збільшується в k разів.

2.3. Фазова модуляція

Бінарна фазова модуляція BPSK

В системах CDMA використовується BPSK модуляція. Вона ніби ввібрала в себе “кращі риси” частотної бінарної модуляції - BFSK (постійну амплітуду), та амплітудної бінарної модуляції – BASK (вужьку смугу), причому навіть “перевершила” їх - вона більш стійка при наявності шумів. У випадку використання BPSK при кожній зміні вхідного біта (з 0 на 1, або з 1 на 0) автоматично змінюється фаза несучого коливання. Двійкова фазова модуляція BPSK може розглядатися як процес перемикання між двома однаковими джерелами частоти, які передають сигнали з протилежними фазами.

Математично BPSK можна представити в наступному вигляді

$$S_{\text{фмш}} = m(t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0), \quad (2.8)$$

де -

$m(t) = 1$ - для значення вхідного біта 1

$m(t) = -1$ - для значення вхідного біта 0

Формування BPSK на основі (2.8) можна здійснити використовуючи блок-схему зображену на рис. 2.7.

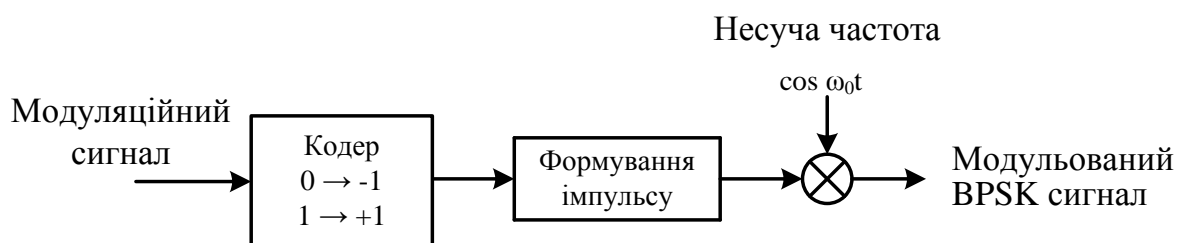


Рис.2.7 Формування BPSK сигналу

Враховуючи те, що вираз $m(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ відповідає також амплітудній модуляції можна прийти до висновку, що спектр BPSK аналогічний спектру BASK.

Недоліком BPSK, порівняно з BFSK та BASK, являється те, що для неї не може бути використано некогерентне детектування. Але під час прийому сигналу значно легше виміряти відносний фазовий зсув між двома сусідніми сигналами, ніж абсолютне значення початкової фази. Тому, деколи використовується фазорізницева маніпуляція DPSK (диференційна, або відносна фазова маніпуляція, англійський термін – differential phase shift keying).

Квадратурна фазова модуляція QPSK

В системах CDMA використовується також QPSK модуляція. Вона

являється чотирьохпозиційною, тобто вхідні біти групуються в групи по 2 біти та утворюють 4 різні вхідні символи. Кожному вхідному символу відповідає певне значення комплексної амплітуди модульованого сигналу таблиця 2.1.

Таблиця 2.1 Формування QPSK-сигналу

Вхідні біти згруповані по два	Вхідні символи	Фаза комплексної амплітуди
00	0	$\theta=\pi/4$
01	1	$\theta=\pi/4+\pi/2=3\pi/4$
10	2	$\theta=\pi/4+2\pi/2=5\pi/4$
11	3	$\theta=\pi/4+3\pi/2=7\pi/4$

На основі значень таблиці 2.1 можна побудувати сузір'я для QPSK маніпуляції рис.2.8,а.

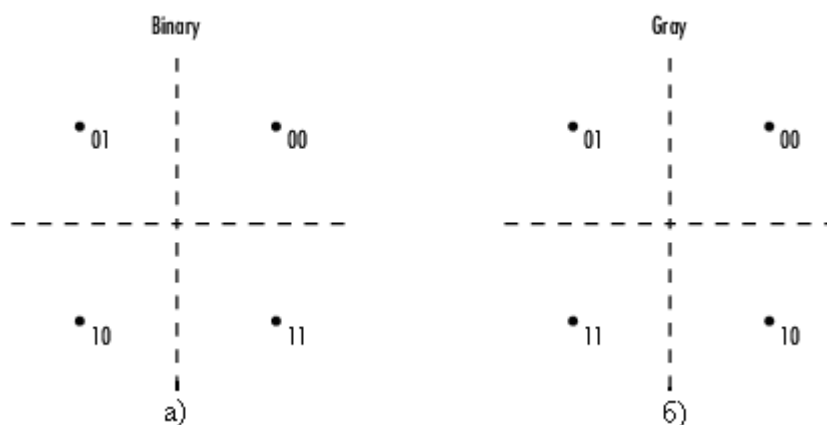


Рис.2.8 Сузір'я для QPSK маніпуляції

а) згідно залежностей (2.8), б) згідно коду Грея

Але з точки зору зменшення похибок при демодуляції використовують сузір'я, розміщені згідно коду Грея (рис. 2.8,б). Бачимо, що основна відмінність двох сузір'їв (рис. 2.8) полягає в тому, що сусідні символи для кодів Грея відрізняються лише одним бітом (для сузір'я рис. 2.8,а сусідні символи 11 та 00 відрізняються двома бітами). Реалізація кодів Грея являється одним з рідких

випадків в цифровому зв'язку, коли можна одержати певний вигаш, не отримуючи при цьому попутніх недоліків. Крім того код Грея не вимагає спеціальних, або додаткових схем.

Бачимо, що згідно виразу (2.2) QPSK модуляцію зручно реалізувати за допомогою квадратурного модулятора.

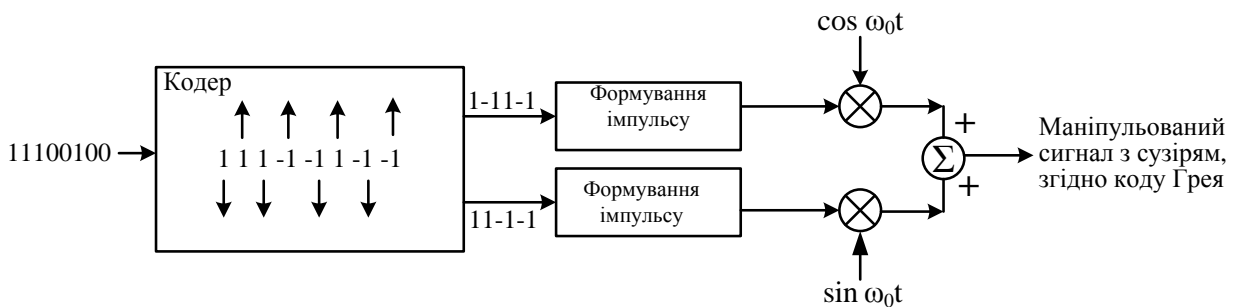


Рис.2.9 Реалізація QPSK модуляції за допомогою квадратурного модулятора

В кодері вхідні біти - 0, замінюються на -1. Непарні біти, наприклад, подаються в синфазний канал (I канал), а парні – в квадратурний (Q канал).

На основі сузір'я (рис. 2.8,б) в таблиці 2.2 приведені значення векторів I, Q, які повинні формуватися в кодері та подаватись на входи квадратурного модулятора.

Таблиця 2.2 Значення сигналів, що формуються в кодері

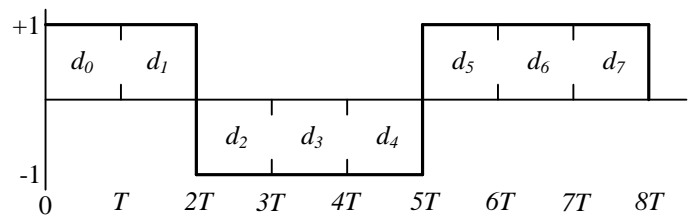
Точка сузір'я	Комплексна амплітуда A_k	φ_k	Значення векторів	
			I	Q
00	1	$\pi/4$	0.707	-0.707
01	1	$3\pi/4$	-0.707	-0.707
11	1	$5\pi/4$	-0.707	0.707
10	1	$7\pi/4$	0.707	0.707

Примітка

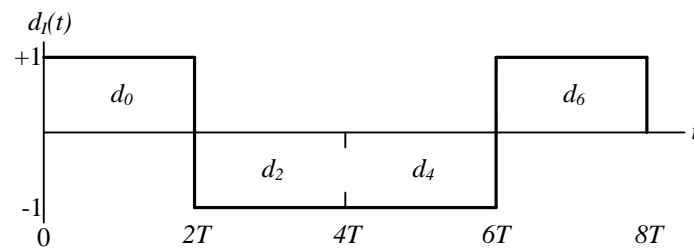
Вектор I представляє проекцію точки сузір'я на вісь X, а вектор Q – проекцію точки сузір'я на вісь Y (взяту з протилежним знаком, згідно виразу

(2.2). Розглянемо детальніше формування сигналів в кодері для QPSK маніпуляції.

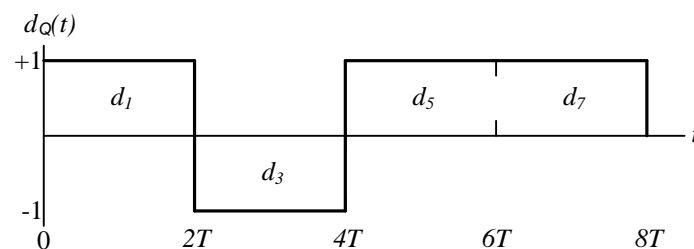
При формуванні сигналу з QPSK модуляцією вхідний потік $D_k(t)=D_0, D_1, D_2,..$ біполярних (тобто таких, що приймають значення +1, або -1, рис. 2.10,а) розділяється на синфазний потік $D_i(t)$ з парних бітів (рис. 2.10,б), та квадратурний потік $D_q(t)$ з непарних бітів (рис. 2.10,в).



а)



б)



в)

Рис.2.10 Сигнали кодера та квадратурного модулятора при використанні QPSK модуляції а) вхідний сигнал кодера, б) вихідний сигнал синфазного каналу кодера в) вихідний сигнал квадратурного каналу кодера

$$D_i(t) = D_0, D_2, D_4...$$

$$D_q(t) = D_1, D_3, D_5... \quad (2.9)$$

Бачимо, що кожне значення вихідного сигналу QPSK модулятора використовує 2 біти, тобто швидкість вихідного потоку буде в 2 рази меншою за швидкість вхідного потоку.

Квадратурна фазова маніпуляція з зсувом OQPSK

Відмінність між двома схемами модуляції QPSK та OQPSK полягає тільки в орієнтації двох модульованих сигналів в синфазному та квадратурному каналах [43].

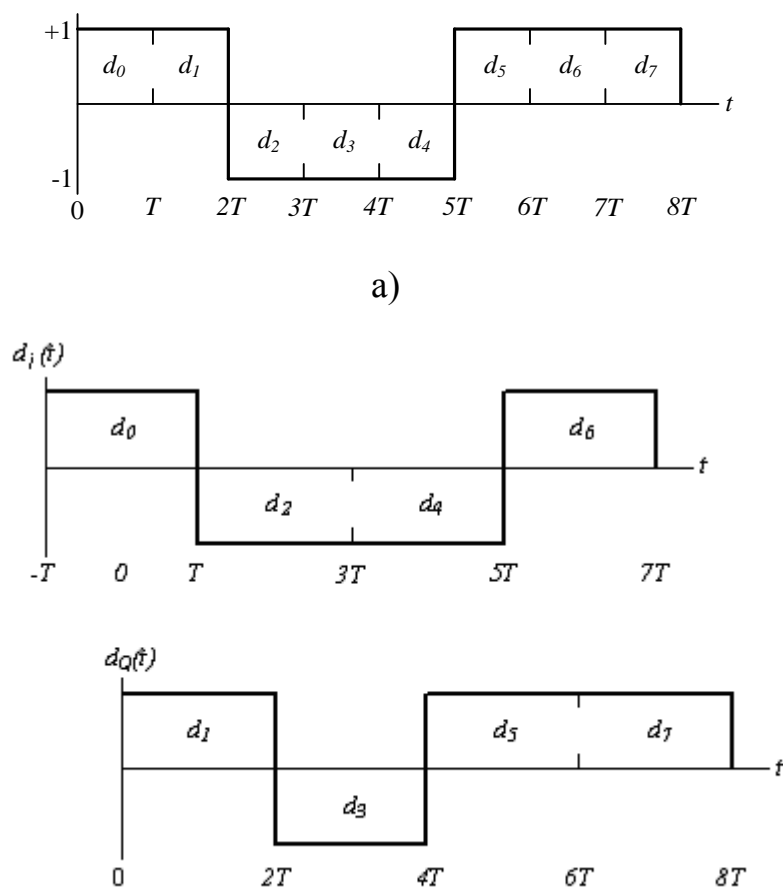


Рис.2.11 Сигнали кодера та квадратурного модулятора при використанні OQPSK модуляції: а) вхідний сигнал кодера, б) вихідний сигнал синфазного каналу кодера, в) вихідний сигнал квадратурного каналу кодера

Якщо тривалість кожного вхідного біту становить T_b , в потоках для

синфазного і квадратурного каналів QPSK модулятора тривалість кожного імпульсу становить $2 \cdot T_b$. Для OQPSK модуляції потік $D_q(t)$ зсунутий відносно потоку $D_i(t)$ на час T_b . Такий зсув показано на рис. 2.11.

Бачимо що модульований сигнал змінюється через час T і максимальне значення зсуву фаз між двома сусідніми значеннями модульованого сигналу становить 90° .

В результаті отримаємо, що для OQPSK модулятора зміна значень на входах суматора квадратурного модулятора буде відбуватись швидше (через час T_b) порівняно з QPSK модулятором (через час $2 \cdot T_b$). На меншому інтервалі часу це приводить до зменшення максимального зсуву фази між сусідніми значеннями модульованого сигналу (π – для QPSK модуляції та $\pi/2$ – для OQPSK модуляції), що в свою чергу приводить до звуження ширини спектру модульованого сигналу.

8PSK модуляція

В системах CDMA часто використовуються більш складні види модуляції. Наприклад, фазова модуляція D8PSK являється 8-позиційною, тобто кожному з 8 можливих значень початкової фази модульованого сигналу $\Delta\phi_k$ присвоюється 3 – бітове повідомлення (x_k, y_k, z_k) . Очевидно, що при цьому швидкість передачі повідомлень збільшується в 3 рази.

Застосування таких видів фазової маніпуляції (8PSK, 16PSK ін.) дозволяє збільшити швидкість передачі даних, проте імовірність появи бітових помилок зростає.

Сузір'я для D8PSK маніпуляції, з врахуванням кодів Грея, приведено на рис. 2.12.

Оскільки диференційна фазова модуляція D8PSK (differential 8-PSK) являється 8-позиційною, то кожній фазі $\Delta\phi_k$ присвоюється 3 – бітове повідомлення (x_k, y_k, z_k) .

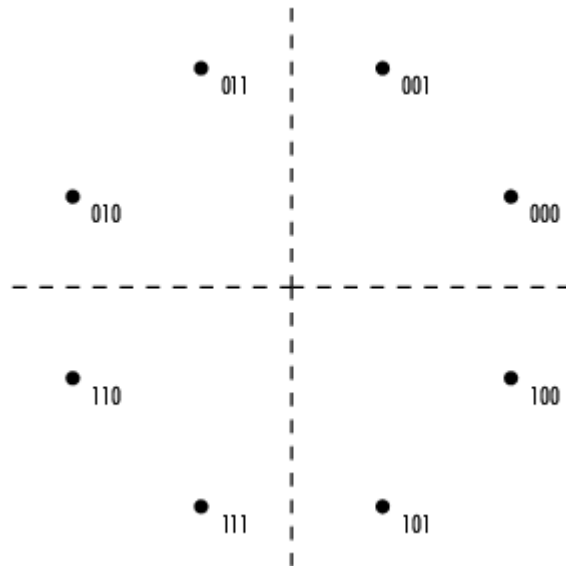


Рис.2.12 Сузір'я для маніпуляції D8PSK

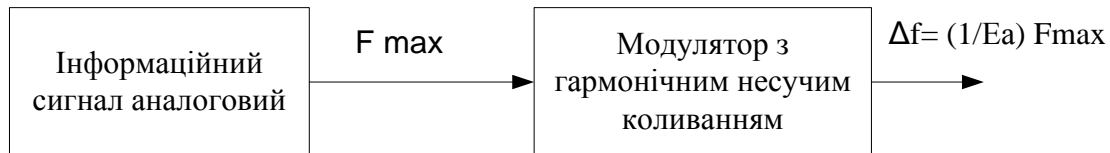
x_k	y_k	z_k	$\Delta\varphi_k$
0	0	0	0
0	0	1	$\pi/4$
0	1	1	$2\pi/4$
0	1	0	$3\pi/4$
1	1	0	$4\pi/4$
1	1	1	$5\pi/4$
1	0	1	$6\pi/4$
1	0	0	$7\pi/4$

2.4. Ефективність модуляції

Ширина смуги каналу зв'язку B для різних безпроводних систем, як правило, є заданою. Враховуючи обмежений природній ресурс частот, їх давню та постійну нестачу, велику вартість оплати ліцензії на користування очевидно, що при інших однакових умовах, слід віддати перевагу системі сигнали якої займають вузький спектр частот, тобто вимагають меншої смуги частот каналу зв'язку. З іншої сторони при використанні заданої смуги частот бажано забезпечити можливість передавання максимального об'єму інформації, що

забезпечується:

- для аналогової модуляції - можливістю передачі інформаційного сигналу з більшою частотою F_{\max} (рис. 2.13,а);
- для цифрової модуляції - можливістю передачі інформаційного сигналу з більшою швидкістю передачі R (рис. 2.13,б).



а)



б)

Рис.2.13 До визначення ефективності модуляції

а) аналогова, б) цифрова

Отже, під ефективністю модуляції можна розуміти значення максимальної частоти інформаційного сигналу F_{\max} (для аналогової модуляції), або максимальної швидкості передачі інформаційного сигналу R (для цифрової модуляції), які можна передати при використанні одиниці ширини смуги каналу зв'язку ($B=1$).

Для аналогової модуляції ефективність модуляції E_a становить:

$$E_a = \frac{F_{\max}}{B}, \quad B = \frac{F_{\max}}{E_a}. \quad (2.10,а)$$

Для цифрової модуляції ефективність модуляції E_d становить:

$$E_d = \frac{R}{B}, \quad B = \frac{R}{E_d}. \quad (2.10,б)$$

Ефективність аналогової амплітудної модуляції

Як видно з виразів (2.10) ефективність модуляції визначається необхідною шириною смуги каналу зв'язку.

Спочатку розглянемо необхідну ширину смуги на прикладі використання аналогової амплітудної модуляції, однієї з найбільш “економних” з точки зору ширини спектру. Як видно з назви при застосуванні АМ у відповідності з модулюючим сигналом змінюється амплітуда несучого коливання. Перемноживши модулюючий низькочастотний сигнал S_n на несуче високочастотне коливання S_b (2.1) отримаємо (рис. 2.14) амплітудно модульований з подавленою несучою (в його спектрі відсутня несуча частота f_0), амплітуда якого буде мінятись у відповідності з модулюючим сигналом.

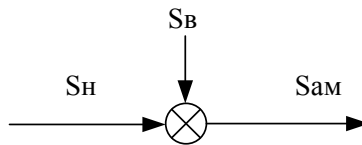


Рис.2.14 Формування АМ сигналу з подавленою несучою

$$S_{ам} = S_n \cdot S_e = S_n \cdot U_e \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + \varphi_e), \quad (2.11,а)$$

де,

$$S_n = U_n \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t + \varphi_n), \quad S_e = U_e \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + \varphi_e). \quad (2.11,б)$$

Осцилограми для АМ сигналу з подавленою несучою приведені на рис. 2.15.

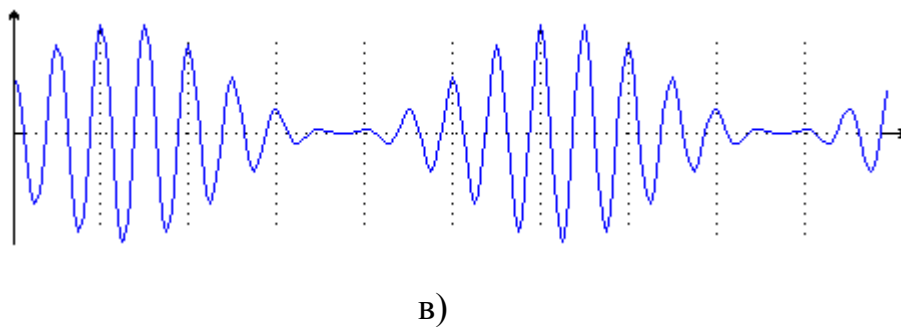
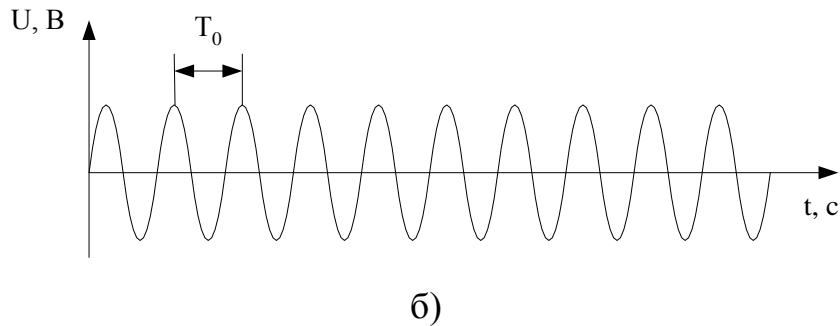
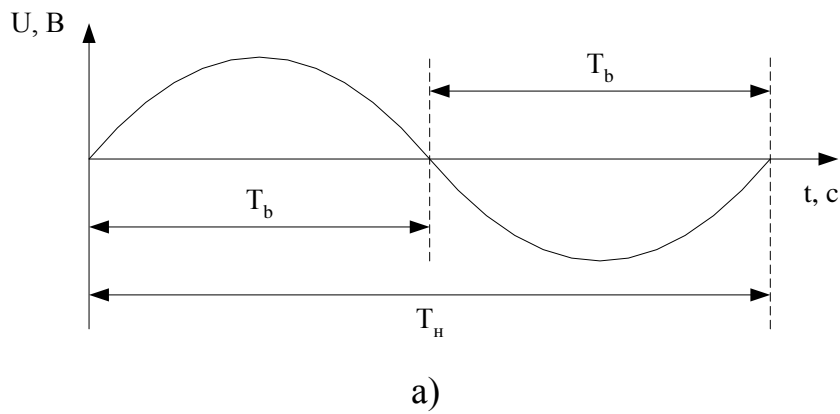


Рис.2.15 Аналогова амплітудна модуляція з подавленою несучою частотою
 а) модулюючий сигнал, б) несуче коливання, в) модульований сигнал

З рівнянь (2.11) отримаємо спектральні складові модульованого сигналу.

$$S_{ам} = U_n \cdot U_c \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot [f_0 + f_n] \cdot t + \varphi_c + \varphi_n) + U_n \cdot U_c \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot [f_0 - f_n] \cdot t + \varphi_c - \varphi_n). \quad (2.12)$$

Бачимо, що в цьому випадку спектр модульованого коливання складається з двох складових з частотами $f_0 + f_n$ та $f_0 - f_n$ (рис. 2.15), тобто ширина спектру становить:

$$B = 2 \cdot F_{\max}, \quad (2.13)$$

де, F_{\max} - найбільше значення частоти f_H в складі модулюючого сигналу, ($f_H = 1/T_H$, T_H - період сигналу).

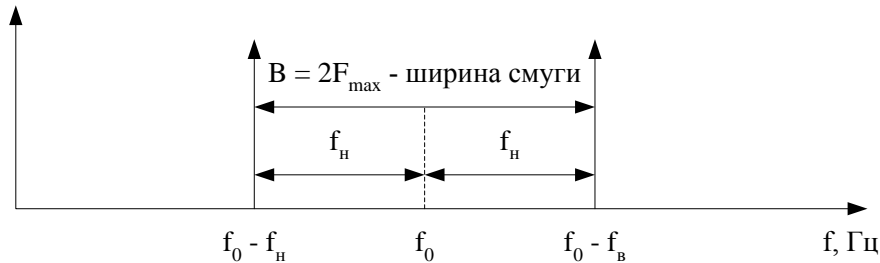


Рис.2.16 Спектр АМ коливання з подавленою несучою

Деколи використовується амплітудна модуляція з однією боковою смугою (SSB – single side band). В цьому випадку необхідна смуга частот зменшується в 2 рази:

$$B = F_{\max} . \quad (2.14)$$

З виразу (2.10,а) з врахуванням залежностей (2.13), (2.14) можна визначити ефективність аналогової амплітудної модуляції:

$$E_a = \frac{F_{\max}}{B} = \frac{1}{2}, \quad (2.15,а)$$

ефективність аналогової односмугової амплітудної модуляції:

$$E_a = \frac{F_{\max}}{B} = 1. \quad (2.15,б)$$

Для аналогової амплітудної модуляції з подавленою несучою ширина спектру становить $B=2 \cdot F_{\max}$ (F_{\max} - верхня частота модулюючого сигналу). У випадку наявності несучої (позначена пунктиром на рис. 2.16) ширина спектру

не змінюється. З метою зменшення смуги можна використати амплітудну модуляцію з однією боковою смугою. В цьому випадку ширина смуги становить $B=F_{\max}$, але при цьому значно ускладнюється приймач. Застосування частотної, або фазової модуляції не приводить до зменшення необхідної смуги частот, порівняно з амплітудною модуляцією (часто лише тільки до збільшення). Ефективність аналогової амплітудної модуляції E ($E=F_{\max}/B$, яка характеризується відношенням максимальної частоти модулюючого сигналу до необхідної смуги частот) знаходиться в межах $0.5 \div 1$.

Ширина спектру сигналу з цифровою амплітудною маніпуляцією

Аналіз спектру сигналу з цифровою амплітудною модуляцією (або маніпуляцією) $S_{амн}$ є більш складним порівняно з аналізом аналогової амплітудної модуляції. Цифрова модуляція утворюється при цифровому характері модулюючого сигналу ($S_n = m(t)$). Аналогічна залежність (2.11) справедлива і для цього випадку цифрової амплітудної модуляції.

$$S_{амн} = S_n \cdot S_g = m(t) \cdot S_g. \quad (2.16)$$

Спектр модульованого сигналу (2.16) може бути визначений з допомогою перетворень Фур'є. На практиці функція $m(t)$ не може бути задана абсолютно точно, тому що комбінація з 0 і 1 залежить від конкретного сигналу, що передається.

Приведені нижче викладки показують взаємозв'язок між аналоговою та цифровою амплітудною модуляцією та на основі встановленого взаємозв'язку дозволяють досить просто визначити ширину смуги та ефективність використання амплітудної маніпуляції.

Що треба змінити на рис. 2.15, щоб аналогову амплітудну модуляцію перетворити в цифрову? У випадку цифрової модуляції однополярні півхвилі гармонічного модулюючого сигналу необхідно замінити прямокутними імпульсами, що відображають біти цифрового інформаційного сигналу.

Значення 1, наприклад, можна передавати у вигляді додатного прямокутного імпульсу, а значення 0 – у вигляді від’ємного прямокутного імпульсу, тобто цифровий модулюючий сигнал може мати вигляд послідовності прямокутних імпульсів з тривалістю T_b , що відображають 0 або 1. (рис. 2.17,а).

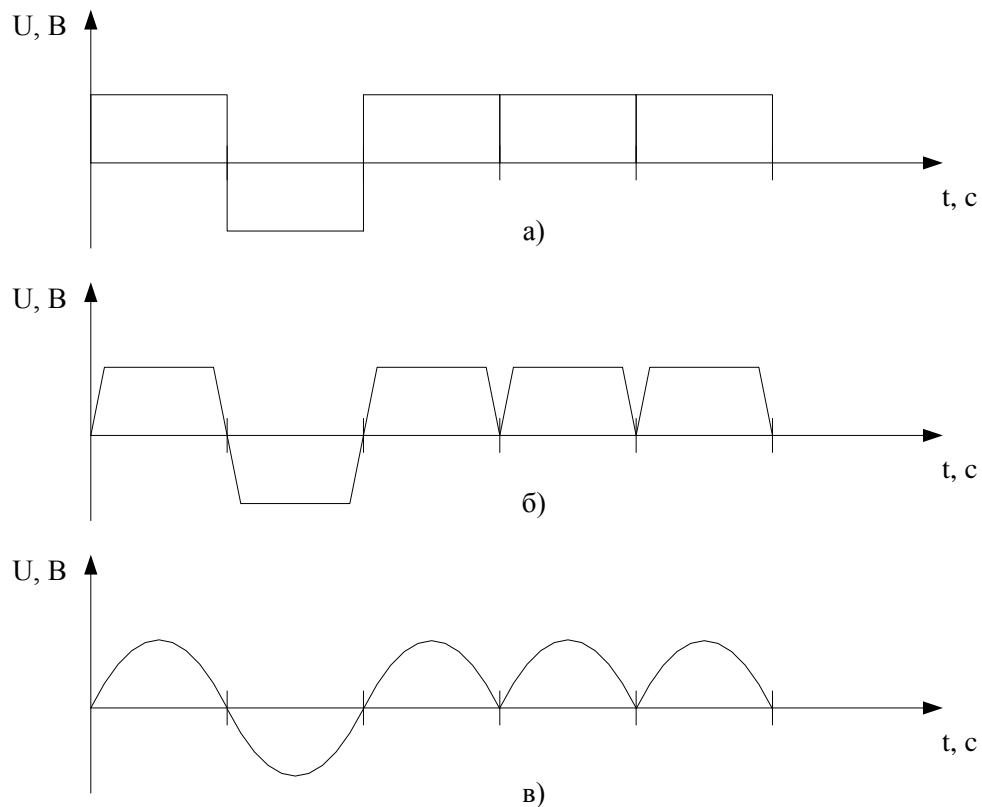


Рис.2.17 Варіанти форми імпульсів, що передають цифровий сигнал

а) прямокутний імпульс, б) прямокутний імпульс, що містить 1 і 3 гармоніки, в) однополярні відрізки гармонічного сигналу

Часто з метою зменшення ширини спектру модульованого сигналу змінюють прямокутну форму модулюючого сигналу на більш “гладку” (рис. 2.17,б), пропустивши через відповідний фільтр. В залежності від частотної характеристики фільтра форму прямокутного модулюючого сигналу можна “згладити” навіть до вигляду однополярних півхвиль гармонічного сигналу (рис. 2.17,в), тобто таких, які приведені на рис. 2.15,а.

Розглянемо частковий випадок цифрової амплітудної модуляції коли інформаційні біти представляють послідовність 10, причому 1 представимо у

вигляді додатної півхвилі гармонічного сигналу, а 0 - у вигляді від'ємної півхвилі. Осцилограми приведені на рис. 2.15 в цьому випадку можуть відображати також процес цифрової модуляції (для випадку послідовності бітів 10, відображення 1 та 0 додатними та від'ємними півхвилями гармонічного сигналу, відповідно). Очевидно, що ширина спектру модульованого сигналу не змінилась від зміни назви однополярних півхвиль модулюючого сигналу (рис. 2.15,а) і становить $B = 2 \cdot f_n = 2 \cdot F_{\max}$.

Тривалість одного біта становить $T_b = T_n/2$ (рис. 2.17). Величина обернена T_b визначає скільки значень інформаційного сигналу передається за одну секунду, тобто частоту зміни вхідного сигналу f_b , або швидкість R біт/сек. цифрового потоку:

$$f_b = \frac{1}{T_b} \text{ (Гц)}, \quad (2.17,а)$$

$$R = \frac{1}{T_b} \text{ (біт/с)}. \quad (2.17,б)$$

З виразу (2.10, б) з врахуванням залежностей (2.17, а), (2.17, б), $T_n = 2 \cdot T_b$ (рис. 2.17,в) та співвідношень (2.13), (2.14) можна визначити (для випадку, коли інформаційні біти представляють послідовність 10, причому 1 представимо у вигляді додатної півхвилі гармонічного сигналу, а 0 – у вигляді від'ємної півхвилі) ефективність амплітудної маніпуляції:

$$E_d = \frac{R}{B} = \frac{\frac{1}{T_b}}{2 \cdot F_{\max}} = \frac{1}{\frac{T_n}{2} \cdot f_n} = 1, \quad (2.18,а)$$

ефективність односмугової амплітудної маніпуляції:

$$E_d = \frac{R}{B} = \frac{\frac{1}{T_b}}{2 \cdot F_{\max}} = \frac{1}{f_n} = 2. \quad (2.18,б)$$

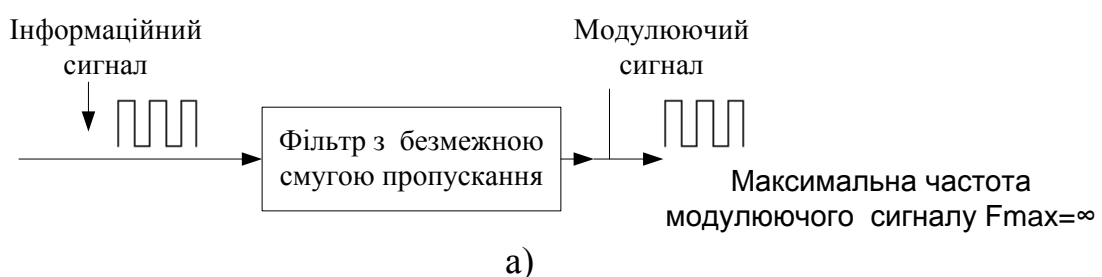
Для амплітудної маніпуляції з подавленою несучою у випадку послідовності вхідних бітів 10, яка може повторюватись та представлення бітів у вигляді однополярних півхвиль гармонічного сигналу ширина спектру становить $B=R$ (R - швидкість вхідного потоку модулюючого сигналу). У випадку наявності несучої (позначена пунктиром на рис. 2.16) ширина спектру не змінюється. З метою зменшення смуги можна використати амплітудну маніпуляцію з однією боковою смугою. В цьому випадку ширина смуги становить $B=R/2$, але при цьому значно ускладнюється приймач. Застосування частотної, або фазової маніпуляції не приводить до зменшення необхідної смуги частот, порівняно з амплітудною маніпуляцією (часто лише тільки до збільшення). Ефективність амплітудної маніпуляції E ($E=R/B$, яка характеризується відношенням швидкості вхідного потоку модулюючого сигналу до необхідної смуги частот) знаходиться в межах $1 \div 2$.

Приведені висновки справедливі для будь-якої послідовності вхідних бітів, не тільки 1 0.

Вплив форми модулюючого сигналу на ширину спектру сигналу з амплітудною маніпуляцією

Розглянемо як змінюється ширина спектру модульованого сигналу в залежності від форми цифрового модулюючого сигналу (рис. 2.18).

На рис. 2.18 приведені різні варіанти імпульсів, що можуть передавати значення 0 та 1 в залежності від типу фільтра, через який проходить прямокутний імпульс.



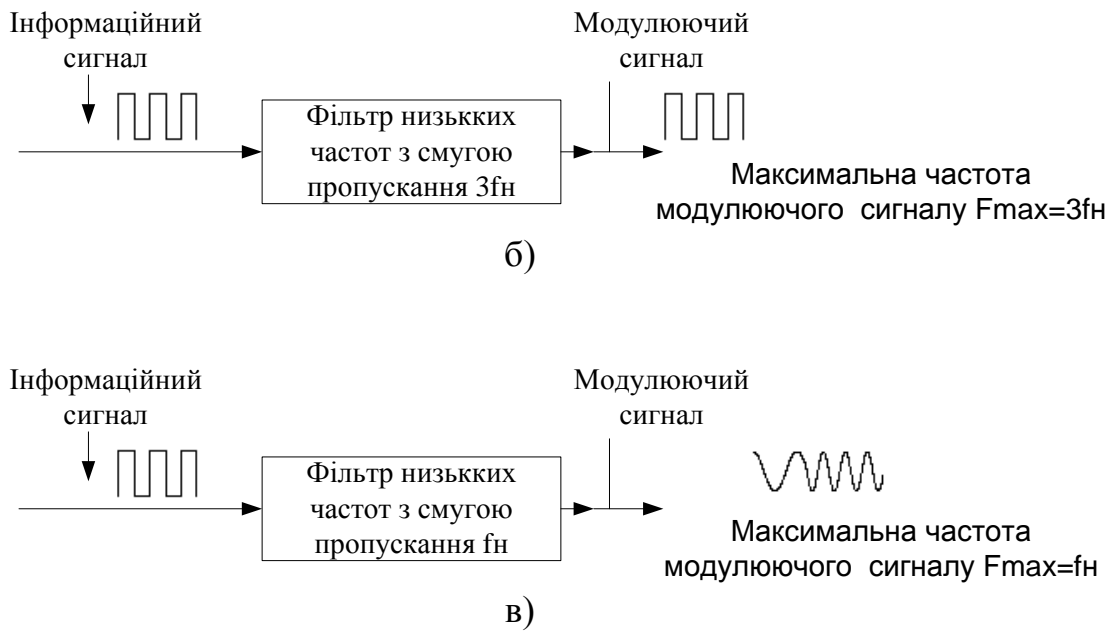


Рис.2.18 Варіанти форми імпульсів, що передають цифровий сигнал
 а) прямокутний імпульс, б) прямокутний імпульс, що містить 1 і 3 гармоніки
 в) однополярні відрізки гармонічного сигналу

Очевидно, що з точки зору забезпечення безпомилковості приймання найкращим буде сигнал, приведений на рис. 2.18,а. Саме такі сигнали на протязі часу тривалості біту T_b мають найбільшу потужність і тому для них найлегше розрізнити 0 та 1 на приймальній стороні при демодуляції. Чим більше форма модулюючого сигналу відрізняється від прямокутної, тим він гірший з точки зору безпомилковості приймання.

З іншої сторони, сигнал приведений на рис. 2.18,а містить нескінченну кількість гармонік і хоча з ростом номеру гармоніки їх амплітуда зменшується, все одно він займає досить широку смугу. З точки зору зменшення ширини смуги модульованого сигналу кращим є використання модулюючого сигналу у формі (рис. 2.18,б) верхня частота F_{\max} якого становить:

$$F_{\max} = 3 \cdot f_n \quad (2.19)$$

Ширина спектру в цьому випадку згідно (2.13) становить:

$$B = 2 \cdot F_{\max} = 2 \cdot 3 \cdot f_n = 6 \cdot f_n = \frac{6}{T_n} = \frac{6}{2 \cdot T_b} = 3 \cdot f_b = 3 \cdot R. \quad (2.20)$$

У випадку використання односмугової амплітудної модуляції ширина смуги буде в два рази меншою

$$B = F_{\max} = 3 \cdot f_n = \frac{3}{T_n} = \frac{3}{2 \cdot T_b} = \frac{3}{2} \cdot f_b = \frac{3}{2} \cdot R. \quad (2.21)$$

З виразу (2.10,б) з врахуванням залежностей (2.20), (2.21) можна визначити (для випадку, коли інформаційні біти представляють послідовність 1 0, причому 1 та 0 представлені у вигляді прямокутних імпульсів, що містять 1 та 3 гармоніки):

ефективність амплітудної маніпуляції:

$$E_d = \frac{R}{B} = \frac{R}{3 \cdot R} = \frac{1}{3}. \quad (2.22,а)$$

ефективність односмугової амплітудної маніпуляції:

$$E_d = \frac{R}{B} = \frac{R}{\frac{3}{2} \cdot R} = \frac{2}{3}. \quad (2.22,б)$$

З метою подальшого зменшення ширини смуги модульованого сигналу ще кращим є використання модулюючого сигналу у вигляді однополярних півхвиль гармонічного сигналу.

Для цифрової амплітудної модуляції у випадку представлення бітів інформації у вигляді прямокутних імпульсів (спектр яких теоретично безмежний) ширина смуги практично буде дуже широкою. Тому прямокутні

імпульси перетворюють в майже прямокутні імпульси (пропустивши їх через фільтр низької частоти з смугою пропускання $3 \cdot f_d$, причому $f_b = 1/T_b$, де T_b – тривалість одного біта). В цьому випадку ширина спектру становить $B = 3 \cdot R$ (R – швидкість вхідного потоку модулюючого сигналу). З метою зменшення смуги можна використати амплітудну модуляцію з однією боковою смугою. В цьому випадку ширина смуги становить $B = 3 \cdot R/2$, але при цьому значно ускладнюється приймач. Ефективність цифрової амплітудної модуляції $E = R/B$, знаходиться в межах $1/3 \div 2/3$.

Бачимо, що використання для модуляції вхідних бітів у вигляді однополярних півхвиль гармонічного коливання (рис. 2.18,в) є в три рази ефективнішим, з точки зору необхідної смуги частот, порівняно з майже прямокутним імпульсом (рис. 2.18,б), який містить 1 і 3 гармоніки. Часто, з метою звуження спектру, використовуються модулюючі сигнали більш складної форми, наприклад у вигляді функції припіднятого косинуса, або сигналу на виході фільтра з гаусовою характеристикою.

3. МЕТОДИ РОЗДІЛЕННЯ КАНАЛІВ ТА МНОЖИННОГО ДОСТУПУ

3.1. Виділені частоти

Для створення систем зв'язку, що використовують технологію CDMA (IS-95, cdma2000, UMTS) виділено наступні діапазони частот (рис. 3.1).

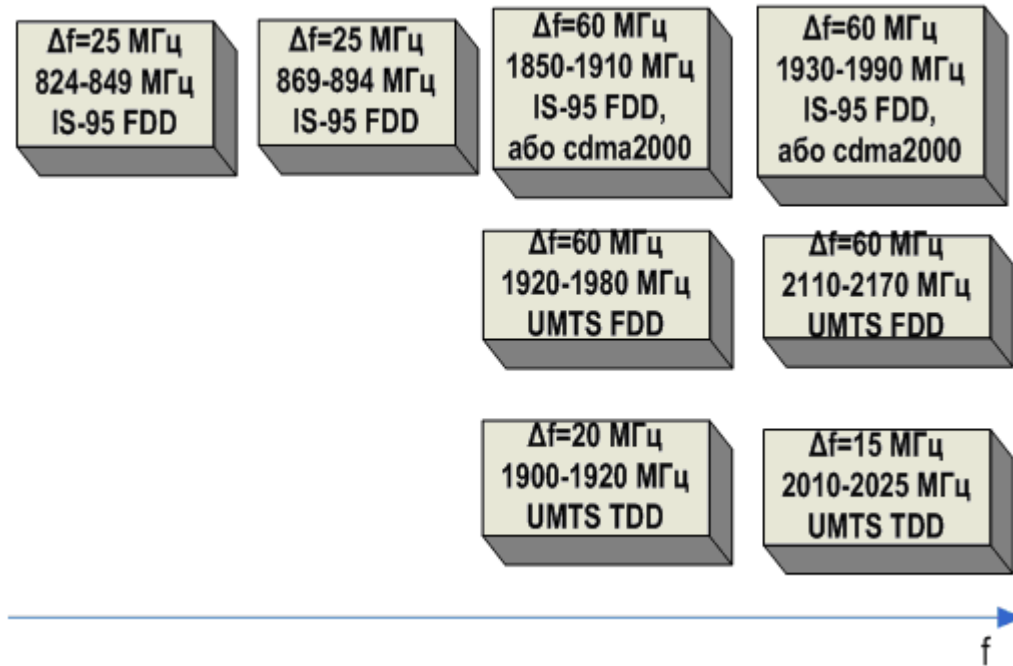


Рис.3.1 Діапазони частот для систем CDMA

Кількість виділених діапазонів становить 8, тому, на перший погляд, можна реалізувати 8 різних систем. Але реально створено меншу кількість систем, причому різних стандартів. Така ситуація пов'язана з наявністю ряду особливостей рис. 3.2.

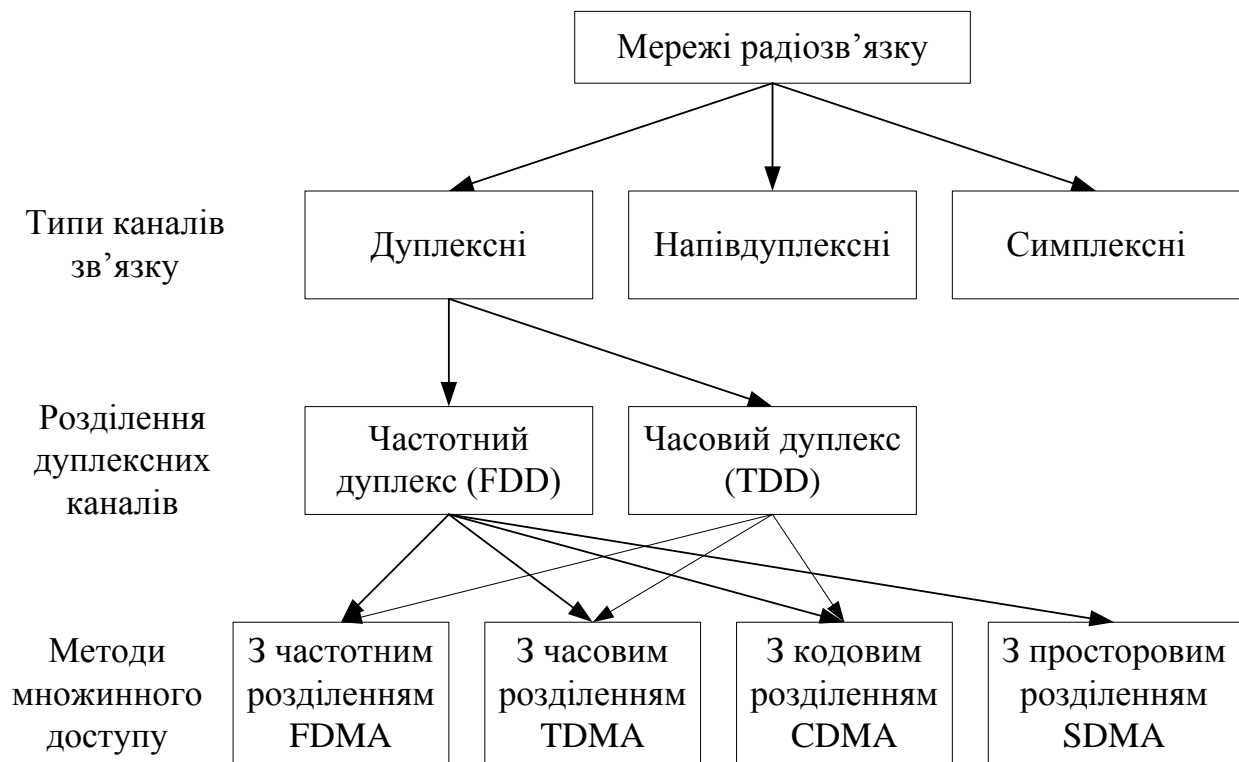


Рис.3.2 Класифікація систем радіозв'язку

3.2. Типи каналів зв'язку

Загальні зауваження

Мережі радіозв'язку можуть бути односторонніми (наприклад, системи радіомовлення і телебачення), так і двосторонніми (наприклад, мережі мобільного зв'язку).

Далі, розглядаються тільки мережі двостороннього зв'язку. Але навіть серед мереж двостороннього зв'язку існує багато різновидностей, принципи побудови яких являються предметом даного розділу.

Суть проблеми

Одним з основних питань побудови мережі радіозв'язку являється вибір способу організації зв'язку абонентів між собою, наприклад почергова передача інформації від одного абонента до іншого, або одночасний обмін інформацією між абонентами [8].

У випадку одночасного обміну інформацією використовуються два канали зв'язку (в прямому і зворотному напрямку), при цьому виникає проблема їх

розділення з метою усунення впливу одного каналу на інший.

Основні отримані результати

Основні отримані результати побудови мереж радіозв'язку приведені на рис. 3.1. Тип каналу зв'язку визначає порядок обміну інформацією між окремим абонентами в мережі зв'язку. Взагалі, мережа радіозв'язку може підтримувати один з трьох типів каналів зв'язку:

- дуплексний;
- симплексний;
- напівдуплексний.

Дуплексний канал зв'язку

Дуплексний канал зв'язку являється найбільш зручним та поширеним. Він характеризується одночасною реалізацією режиму прийому та передачі (рис. 3.3), що дозволяє абонентам одночасно слухати і розмовляти (як в звичайному провідному телефоні, мобільному телефоні і т.д.).

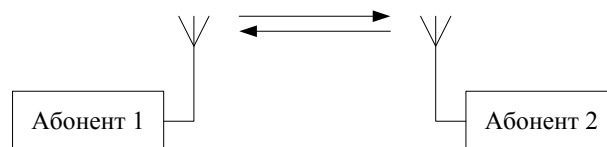


Рис.3.3 Дуплексний канал зв'язку

При дуплексному зв'язку радіоканал повинен бути розділеним на два канали. Абонент одночасно використовує один канал для передачі, а другий - для прийому. Звідси і виникає питання дуплексного розділення каналів, яке розглядається в наступному розділі. Абонентські станції, призначені для дуплексного режиму роботи, значно складніші від симплексних станцій. А також дуплексний режим роботи вимагає подвоєної смуги частот порівняно з симплексним, або зменшення швидкості передавання в два рази. Мережі радіозв'язку, в яких передбачено вихід в телефонну мережу загального

користування повинні підтримувати, як правило, дуплексний режим роботи.

Симплексний канал зв'язку

Симплексний канал зв'язку характеризується чергуванням в часі режиму прийому та передачі (рис. 3.4).

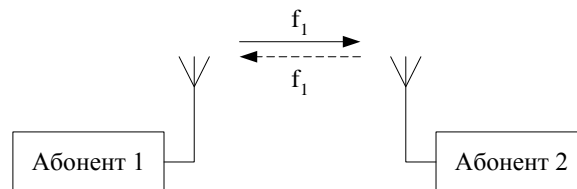


Рис.3.4 Симплексний канал зв'язку

Абонентська станція веде поперемінно прийом, або передачу сигналів на одній і тій же частоті f_1 . Вставлення режиму передавання здійснюється шляхом натискання кнопки прийом-передача РТТ (Push-to-Talk). В процесі спілкування абоненти повинні за взаємною згодою регулювати свої дії. В іншому випадку можливе порушення зв'язку (коли дві станції знаходяться одночасно в режимі прийому, або передачі). Апаратна реалізація симплексних станцій найбільш проста, але пов'язана з деякими незручностями для користувачів і явно не ефективна з точки використання частотного ресурсу, тому що не дозволяє оперативно керувати розподілом каналів між користувачами.

Напівдуплексний канал зв'язку

Напівдуплексний канал зв'язку, як і симплексний, характеризується почерговою роботою станції в режимі прийому і передачі, але вони здійснюються на різних частотах (рис. 3.5). Напівдуплексний режим роботи з використанням симплексних радіостанцій дозволяє побудувати псевдомережі.

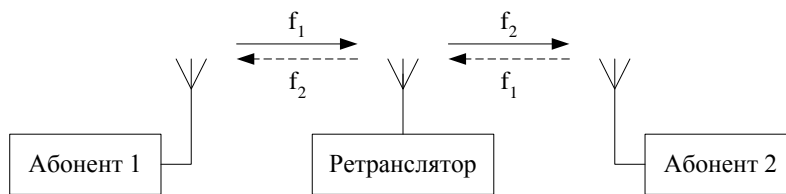


Рис.3.5 Напівдуплексний канал зв'язку

Кожна станція функціонує в симплексному режимі (почергові прийом та передача) з використанням різних частот для прийому і передачі, але ретранслятор здійснює одночасно прийом і передачу сигналів на різних частотах (дуплексний режим роботи). В результаті виявляється можливим побудувати мережі зв'язку при використанні відносно простих симплексних радіостанцій.

3.3. Методи дуплексної передачі даних

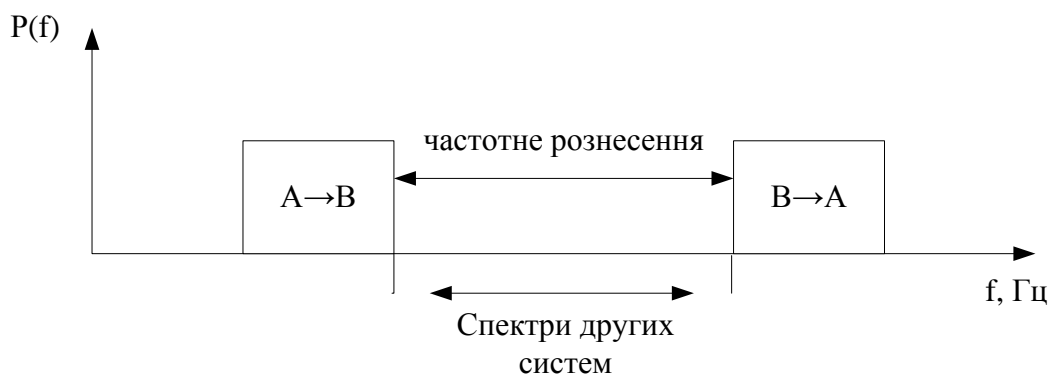
У випадку одностороннього зв'язку проблеми розділення дуплексних каналів не існує. Наприклад, радіомовлення або телевізійне мовлення, здійснюється тільки в одну сторону, від радіотелевізійних центрів до абонентів. Але в дуплексних системах, де здійснюється одночасно двосторонній зв'язок (наприклад, радіотелефонний зв'язок) виникає проблема дуплексного розділення каналів. Очевидно, що в кожному пристрої двостороннього зв'язку, потужний сигнал передавача буде впливати на чутливий вхід приймача, якщо не прийняти спеціальних заходів для розділення таких сигналів. Проблема розділення каналів, є актуальною навіть для гіпотетичного випадку коли існувала би лише одна БС і одна АС.

Розрізняють два основних методи розділення дуплексних каналів (для дуплексних режимів роботи):

- частотний дуплекс (Frequency Division Duplex - FDD);
- часовий дуплекс (Time Division Duplex - TDD).

Частотне розділення каналів

Частотне розділення каналів полягає у використанні двох діапазонів частот (рис. 3.6). В одному діапазоні конкретний пристрій зв'язку здійснює лише передачу, а в іншому – лише прийом. Між згаданими діапазонами виділяється певний захисний інтервал (частотне рознесення). Очевидно, що збільшення частотного рознесення приводить до послаблення впливу передавача на приймач, які функціонують одночасно. Спектри різних напрямків передачі не повинні перекриватись, а діапазон частотного рознесення може використовуватись іншими системами.



Ри.3.6 Частотне розділення дуплексного каналу

До особливостей FDD можна віднести:

- простоту обладнання, пов'язану з відсутністю необхідності часових комутацій та їх синхронізації, що являється перевагою;
- зручність використання при необхідності забезпечення незалежної передачі даних в обох напрямках;
- необхідність в двох діапазонах частот, що являється недоліком;
- необхідність усунення впливу передавача на приймач, які функціонують одночасно, що також є недоліком.

Частотне розділення дуплексних каналів вимагає двох (парних) діапазонів частот з однаковою шириною смуги Δf . Такими є діапазони (рис. 3.1):

- з смугою $\Delta f=25$ МГц (824÷849, 869÷894 МГц), які використовує система IS-95;
- з смугою $\Delta f=60$ МГц (1850÷1910, 1930÷1990 МГц), які використовує система IS-95 або cdma2000;
- з смугою $\Delta f=60$ МГц (1920÷1980, 2110÷2170 МГц), які використовує система UMTS FDD.

Таким чином, 6 з 8 діапазонів частот (рис. 3.1) використано для створення трьох систем зв'язку з частотним розділенням дуплексних каналів (FDD).

Часове розділення каналів

При часовому розділенні каналів в будь-який момент часу передача даних ведеться тільки в одному напрямку, а напрямки передачі чергуються. Тобто, застосування TDD дозволяє передавати і приймати сигнали на одній і тій самій частоті але в різні моменти часу. Для того, щоб при використанні TDD забезпечити необхідну швидкість передачі даних, потік даних спочатку розділяється передавачем на сегменти, які стискаються в часі до більш високих швидкостей передачі даних. Далі, вони передаються у вигляді пакетів. Потім приймальна сторона відновлює початкову швидкість передачі даних. Між часовими інтервалами, що передаються в протилежних напрямках, наявний захисний інтервал T_g , необхідний для уникнення накладання сигналів (рис. 3.7). Тому, реальна швидкість передачі даних в каналі повинна бути мінімум в два рази більшою за швидкість передачі даних, необхідну для зв'язку між АС і БС.

Передача даних періодично здійснюється від АС до БС. При цьому АС та БС відправляють блоки фіксованої тривалості T_b . Час поширення сигналу від передавача до приймача займає час T_p . Таким чином, для передавання одного блоку необхідний час – $T_p+T_b+T_g$.

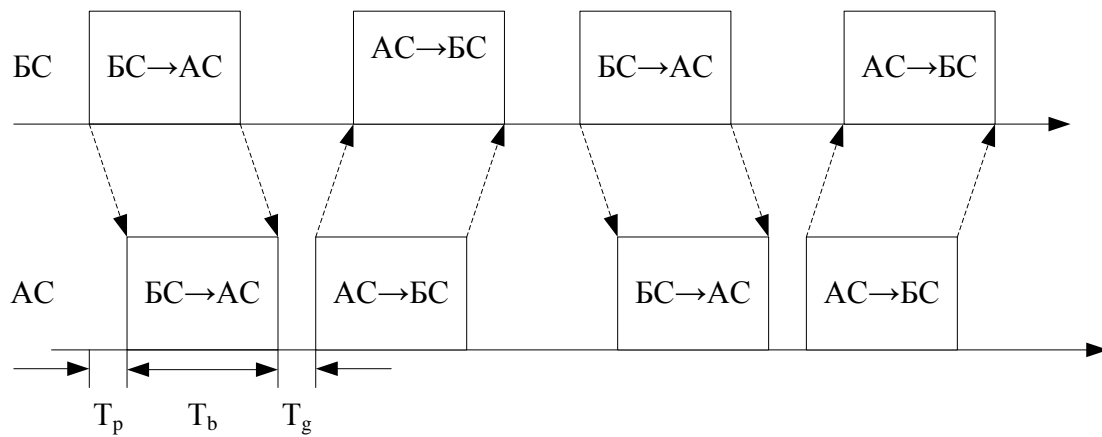


Рис.3.7 Часове розділення дуплексного каналу

Оскільки, АС в БС повинні передавати дані по черзі, то швидкість передачі блоків з кожної сторони можна визначити наступним чином $\frac{1}{2}(T_p+T_b+T_g)$. Якщо в одному часовому блоці передається M бітів, а необхідна швидкість передачі становить V біт/с, то ефективне число бітів (якби передача займала час $T_p+T_b+T_g$), що передається в секунду становить:

$$V = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (T_p + T_b + T_g). \quad (3.1)$$

Реальна швидкість передачі даних, що здійснюється за час T_b становить:

$$V_{nd} = \frac{M}{T_b}. \quad (3.2)$$

З приведених залежностей отримаємо:

$$V_{nd} = 2 \cdot V \cdot \left(1 + \frac{T_p + T_g}{T_b}\right). \quad (3.3)$$

Реальна швидкість передачі даних через канал зв'язку більше ніж в два рази перевищує ефективну швидкість передачі, яку спостерігають АС та БС.

Вибір розміру блоку M диктується вимогами до системи, які часто вступають в протиріччя. При збільшенні значення M зменшується реальна швидкість передачі даних $V_{\text{пд}}$. В цьому випадку спрощується реалізація системи. З іншої сторони збільшення розмірів блоку супроводжується збільшенням часу затримки через необхідність буферизації, що небажано при передачі мови.

В системі TDD допускається просторове рознесення антен. Для прийому кожного пакету, що поступає на базову станцію, вибирається пакет з більш сильним сигналом. Потім БС використовує ту ж антену для передачі до даної АС. Оскільки два напрямки передачі здійснюється на одній і тій самій частоті, то ця ж антена повинна випромінювати самий сильний сигнал в напрямку до АС.

До особливостей TDD в можна віднести:

- відсутність впливу передавача на приймач, оскільки вони працюють в різні моменти часу;
- вимагає одного діапазону частот, де по чергово здійснюється прийом, або передача інформації;
- забезпечення більшої гнучкості та кращої продуктивності за рахунок можливості зміни тривалості часу, який надається для передачі в кожному напрямку;
- ускладнення обладнання, пов'язане з необхідністю здійснення часових комутацій, що являється недоліком.

Дуплексна передача даних з частотним, або часовим розділенням використовується в комбінації з описаними вище методами множинного доступу. В реальних системах використовуються наступні комбінації:

- TDMA/FDMA з FDD (GSM).
- CDMA з FDD (IS-95, UMTS WCDMA FDD).
- TDMA/CDMA з TDD (UMTS WCDMA TDD).

Приклади деяких комбінацій будуть детальніше розглянуті в подальших

розділах.

Таким чином, часове розділення дуплексних каналів не вимагає двох (парних) діапазонів частот. Такими є діапазони (рис. 3.1):

- з смугою $\Delta f=20$ МГц (1900÷1920 МГц), які використовує система UMTS TDD;
- з смугою $\Delta f=15$ МГц (2010÷2025 МГц), які використовує також інша система UMTS TDD, але в іншому діапазоні частот.

Таким чином, два непарних діапазони (рис. 3.1) використано для створення двох систем зв'язку UMTS з часовим розділенням дуплексних каналів (TDD).

Дані про тривалість кадру та кількість слотів в системі UMTS TDD приведена на рис. 3.8.

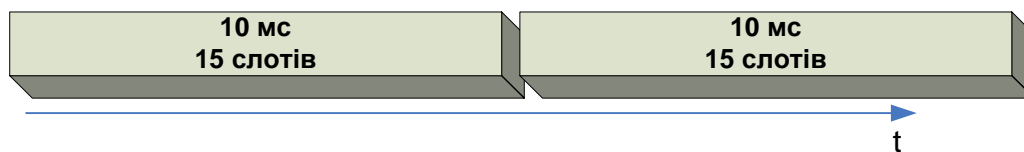


Рис.3.8 Кадри в системі UMTS TDD

Висновки:

- 6 діапазонів частот, які утворюють 3 парних діапазони з однаковою смугою частот Δf в кожному, використано для створення трьох мереж зв'язку з частотним розділенням дуплексних каналів (FDD).
- 2 діапазони частот, які не можуть утворити парний діапазон з однаковою смугою частот Δf , використано для створення двох мереж зв'язку з часовим розділенням дуплексних каналів (TDD).

3.4. Методи множинного доступу до каналів зв'язку

Однією з основних проблем побудови безпроводних систем – це вирішення завдання доступу багатьох користувачів до обмеженого ресурсу - середовища передачі. Питання забезпечення множинного доступу можна розділити на дві

складові:

- розділення єдиного ресурсу на канали передачі;
- призначення отриманих каналів конкретним пристроям.

Існує декілька базових методів множинного доступу, або методів ущільнення, мультиплексування. Такі методи ґрунтуються на розділенні між окремими станціями таких параметрів як частота, час, код та простір з мінімумом взаємних завад і максимальним використанням характеристик середовища передачі. Основними методами розділення загального частотного ресурсу на окремі радіоканали являються:

- частотне розділення каналів (Frequency Division Multiple Access - FDMA);
- часове розділення каналів (Time Division Multiple Access - TDMA);
- кодове розділення каналів (Code Division Multiple Access - CDMA);
- просторове розділення каналів (Space Division Multiple Access - SDMA);

Множинний доступ з частотним розділенням каналів

При частотному розділенні каналів користувачі розподіляються в доступному діапазоні, причому число частот постійне, тобто за кожною абонентською станцією закріплюється свій частотний канал. У виділеній смузі частот ΔF можуть одночасно передавати сигнали декілька абонентських станцій з рознесенням за частотою (рис. 3.9).

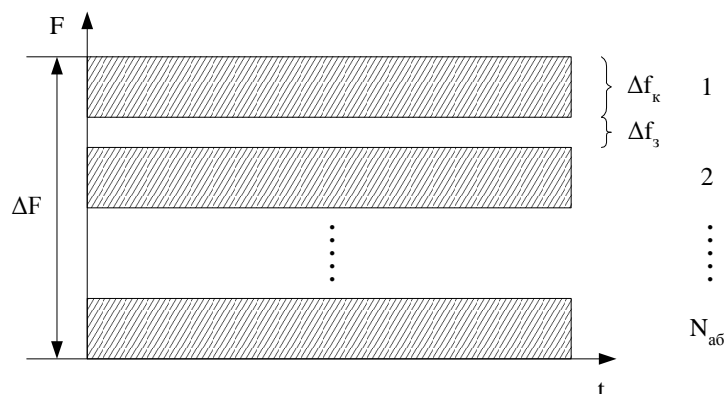


Рис.3.9 Принцип частотного розділення каналів

Число користувачів в смузі частот ΔF визначається наступним чином:

$$N_{аб} = \frac{\Delta F}{\Delta f_k + \Delta f_z}, \quad (3.4)$$

де Δf_k - смуга частот, яку займає корисний сигнал, що нормується, як правило, за рівнем -20 дБ від максимального значення; Δf_z - захисний інтервал.

Ефективність використання смуги частот, тобто збільшення числа одночасно діючих абонентів при фіксованій швидкості передачі в абонентському каналі може бути збільшена за рахунок удосконалення методів модуляції і зменшення завдяки цьому необхідної смуги частот для одного каналу. Наприклад, перехід від сигналів BPSK до сигналів GMSK з BT = 0.5 забезпечує вигреш в декілька разів. Але наявні принципові обмеження зменшення смуги частот, яка використовується.

Основна перевага технології FDMA - простота обладнання, наприклад, порівняно з TDMA. При використанні FDMA не вимагається синхронізація між каналами, оскільки кожен канал незалежний від інших. Найбільш важливе обмеження FDMA - неможливість збільшення кількості абонентських станцій більше за значення $N_{аб}$ (3.4). Даний метод розділення каналів характеризується наступними основними властивостями:

- Радіоканал може бути наданий на весь час з'єднання (транкінг з'єднань), або тільки на час мовної активності абонента (транкінг повідомлень); другий означає, що в період пауз в розмові радіоканал може бути використаний для іншого з'єднання, або передачі коротких повідомлень, що збільшує можливу кількість з'єднань, які підтримуються мережею зв'язку.
- Через радіоканал може передаватись як неперервне повідомлення (до закінчення об'єму повідомлення), так і пакетне повідомлення (окремими пакетами).

- Максимально можлива швидкість передачі бінарної інформації C через радіоканал з обмеженою смугою частот Δf визначається відомою формулою Шенона:

$$C = \Delta f \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (3.5)$$

де S/N - мінімально допустиме відношення сигнал/шум в радіоканалі. При використанні багаторівневих методів модуляції швидкість передачі інформації підвищується в $m = \log_2(M)$ раз, де M – кількість біт інформації в одному символі.

- Для управління абонентами та розподілу каналів між ними доводиться застосовувати сканування абонентських приймачів по частотних каналах, що приводить до суттєвого збільшення часу встановлення зв'язку, або використовувати для управління спеціально виділений частотний канал, що приводить до нераціонального використання виділеного діапазону частотного спектру.

Примітка

В системах CDMA не використовується частотне розділення каналів “в чистому виді” для забезпечення множинного доступу. Але в них також здійснюється подібний поділ каналів за частотою. Вся смуга частотних каналів (рис. 3.1) “нарізається” на ряд частотних каналів (рис. 3.10) шириною:

- 1,25 МГц – для систем IS-95, cdma2000;
- 5 МГц – для систем WCDMA FDD, або WCDMA TDD.

Ці канали використовуються для передачі даних між користувачами системи CDMA.

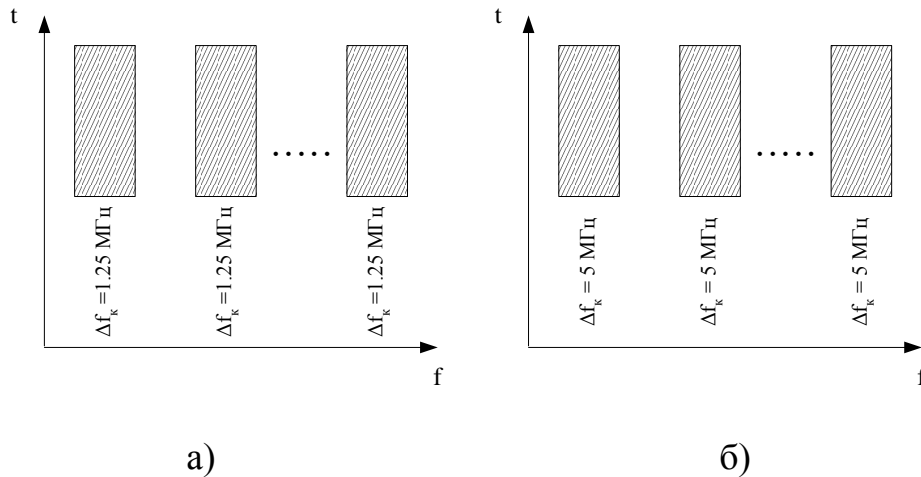


Рис.3.10 Розподіл діапазонів (рис.3.1) на окремі частотні канали:
 а) для стандартів IS-95, cdma2000, б) для стандартів WCDMA

Множинний доступ з часовим розділенням каналів

Множинний доступ з часовим розділенням - TDMA також досить простий за задумом, але складніший в реалізації порівняно з FDMA. Замість доступу до одного частотного каналу з виділеної системи смуги частот, абонентам надається можливість передачі сигналів у всій виділеній смузі, але лише в деякі періодичні інтервали часу (рис. 3.11). Основна одиниця часу називається кадром (англ. frame). Кожний кадр розділений на фіксоване число часових інтервалів (англ. slot). Максимальна можлива кількість одночасно обслуговуваних абонентів рівна кількості часових інтервалів в кадрі. Переважно їхня кількість дещо менша, оскільки деякі інтервали використовуються з метою контролю, синхронізації та управління. Тому, кадри часто організовують в структури більш високого порядку, такі, як мультикадри, суперкадри і т.д. Особливістю методу TDMA являється необхідність упаковувати абонентський потік даних в короткі блоки, які розміщуються у виділених проміжках часу. Якщо в кадрі наявні M часових інтервалів, то швидкість передачі даних через один інтервал повинна бути в M разів вищою, порівняно з такою швидкістю для одного абонента.

Таким чином, метод TDMA забезпечує можливість реалізації декількох фізичних каналів в одному частотному діапазоні. Практична реалізація методу

TDMA вимагає перетворення сигналів в цифрову форму.

Кожній АС виділяється вся смуга частот на обмежений інтервал часу T_k . Між інтервалами T_k присутні захисні інтервали T_z , котрі необхідні для зниження до допустимого рівня завад від сусіднього часового каналу.

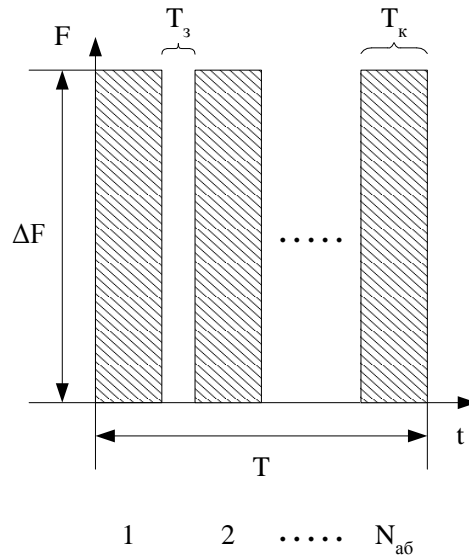


Рис.3.11 Принцип часового розділення каналів

Загальне число абонентів для TDMA схеми визначається виразом:

$$N_{аб} = \frac{T}{T_k + T_z} \quad (3.6)$$

В реальних системах часто використовується комбінація методів FDMA та TDMA. В цих системах спектр поділений на деяку кількість частотних каналів, а часова вісь кожного каналу розділена на часові інтервали. Такий підхід використовується в системах GSM, IS-54/136 і японських коміркових системах PDC.

Часовий метод розподілу каналів характеризується наступними властивостями:

- У виділеній смузі частот ΔF можливе встановлення декількох каналів зв'язку. При цьому необхідно відмітити, що формула Шенона (3.5)

відноситься до сумарної швидкості передачі в обмеженій смузі частот незалежно від числа реалізованих каналів зв'язку в даній смузі. Використання частотного поділу каналів не приводить до підвищення пропускної здатності каналу зв'язку. Для забезпечення передачі інформації від N користувачів у виділений проміжок часу необхідно в N разів підвищити швидкість передавання інформації кожного користувача, що згідно формули Шенона приведе до збільшення займаної смуги частот в N разів.

- Передача інформації здійснюється лише у відведених проміжках часу.
- Можливість виділення для окремих абонентів декількох часових інтервалів (слотів) дозволяє суттєво підвищити, у випадку необхідності, об'єм і швидкість передачі інформації.
- Значно простіше, порівняно з FDMA, реалізується розподіл каналів зв'язку між абонентами, тому що АС, здійснюючи прийом у виділеному частотному каналі, одночасно прослуховує декілька каналів зв'язку і готова без затримки встановити зв'язок.
- Системі зв'язку з TDMA властиві підвищені вимоги до часової синхронізації прийомопередавачів і їхніх перехідних характеристик; необхідність постійної передачі синхронізуючих послідовностей підвищує частку службової інформації в пакетах, що передаються.

Примітка

В системах CDMA не використовується часове розділення каналів “в чистому виді” для забезпечення множинного доступу. Але в них також здійснюється подібний поділ каналів в часі. Весь часовий інтервал “нарізається” на ряд часових кадрів з певною кількістю слотів в кадрі (рис. 3.12):

- тривалість кадру 20 мс, 64 слоти – для систем IS-95;
- тривалість кадру 10 мс, 15 слотів – для систем WCDMA FDD, або WCDMA TDD.

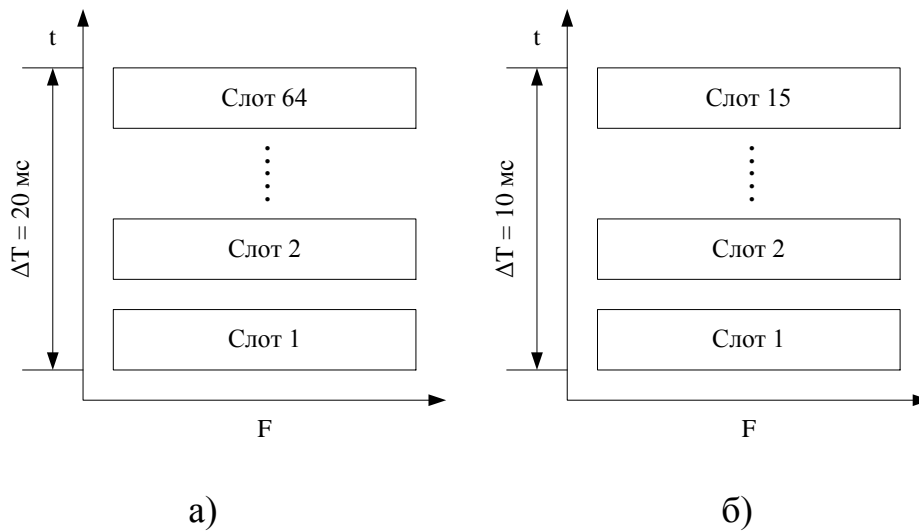


Рис.3.12 Кадри в системі:

а) для стандарту IS-95, б) для стандартів WCDMA

Множинний доступ з кодовим розділенням каналів

Множинний доступ з кодовим розділенням каналів можна реалізувати тільки в системах з розширенням спектру. Систему зв'язку з кодовим розділенням каналів можна отримати виконавши перетворення над системою з частотним розділенням каналів (рис. 3.9) наступним чином:

- вибрати тільки один частотний канал, наприклад абонента 1, причому його смугу Δf_k необхідно штучно розширити в G разів таким чином, щоб вона стала рівною ширині смуги всього частотного діапазону ΔF ;

$$G = \frac{\Delta F}{\Delta f_k}. \quad (3.7)$$

- розширення здійснювати спеціальним розширюючим кодом 1, властивим тільки цьому абоненту 1;
- аналогічні операції по чергово здійснити для кожного частотного каналу, що належить іншому абоненту.

В результаті отримаємо, що всі абоненти займають одночасно один і той самий часовий та частотний інтервал (рис. 3.13).

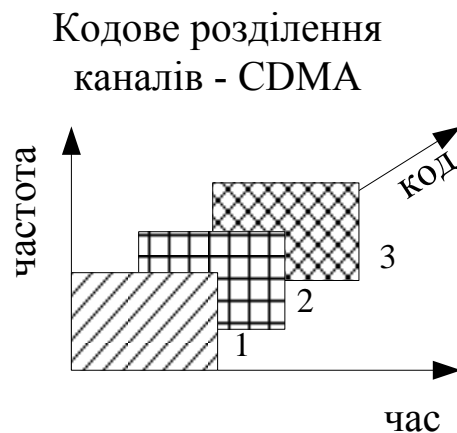


Рис.3.13 Принцип кодового розділення каналів

Виникає питання як розрізнити серед багатьох абонентів потрібного, якщо вони всі працюють в одній смузі частот?

Такий вибір забезпечується розширюючими кодами. Якщо вибирати розширюючі коди таким чином, щоб їх взаємна кореляція була рівна нулю, можна виділити сигнал потрібного абонента з суміші сигналів різних користувачів за допомогою кореляційної обробки – згортки сигналу, який необхідно прийняти з відомим опорним сигналом.

Теоретично метод CDMA дозволяє передавати інформацію користувачів за умови, що розширюючі коди залишаються взаємо ортогональними, тобто їх взаємна кореляція рівна нулю. На жаль, радіоканалу властивий ефект багатопроменевого поширення радіохвиль, що приводить до втрати ортогональності сигналів на вході приймача. Досить складно знайти велику кількість розширюючих послідовностей, які будуть взаємоортогональні (для забезпечення розділення сигналів різних абонентів) і в той же час зберігають ортогональність при зсуві в часі. Як наслідок, ортогональність розширюючих послідовностей при внесенні спотворень каналом зв'язку стає неідеальною, що погіршує відношення сигнал/шум в приймачі, а значить, збільшує ймовірність

появи бітових помилок.

Як і метод TDMA метод CDMA може бути реалізований тільки в цифровій формі. Бачимо, що в цьому методі користувач не займає вузького часового або частотного інтервалу а користується одночасно з іншими всією спільною смугою частот. Тому, навіть при наявності великих пауз в його розмові ресурс системи не витрачається на ці паузи (просто в цей час буде менше навантаження на систему та кращі умови зв'язку для інших користувачів).

Метод CDMA може бути застосований в комбінації з другими методами багатоканального доступу, наприклад, з FDMA та TDMA у випадку застосування CDMA/FDMA весь виділений діапазон спектру спочатку ділиться на декілька частотних смуг (рис. 3.10), а в кожній з них використовується метод CDMA. У випадку TDMA/CDMA весь часовий інтервал кадру ділиться на слоти, а потім в кожному слоті використовується метод CDMA.

Останнім часом поширення набув новий метод доступу (SDMA), який підтримує всі вищеописані методи. В основі SDMA лежить використання антенних решіток з гостронаправленими пелюстками діаграми спрямованості, що керуються з допомогою електронних пристроїв. Таким чином, якщо абонентів розділяє велика кутова відстань, вони можуть використовувати одні і ті ж частотні канали, часові інтервали і т.д., в залежності від основного способу багатостанційного доступу, що використовується в системі. Застосування методу SDMA суттєво впливає на сумарну продуктивність системи.

Розширення спектру інформаційного сигналу

При розгляді різних видів модуляції особливу увагу зверталось на спектральну ефективність, тобто можливість забезпечення заданої швидкості передачі інформації для кожного абонента в більш вузькій смузі частот. Тому і використовувались вузькосмугові види модуляції. Такий підхід повинен би, очевидно, також забезпечити найкращу спектральну ефективність для будь-якої кількості абонентів. Але проблема полягає в тому, що із збільшенням числа користувачів, число каналів також повинно збільшуватись. Враховуючи те, що

частотний ресурс є обмежений, смугу частот для кожного абонента довелось би нескінченно зменшувати, що є нереальним. Тобто, суттєве збільшення числа каналів в мережі зв'язку вимагає принципово іншого підходу до проблеми.

Вирішення даної проблеми ніби само лежить на поверхні - якщо не задовольняє вузькосмугова модуляція, треба перейти на широкосмугову. Дійсно, виявилось, що одним з методів, який дозволяє кардинально збільшити число користувачів в обмеженому частотному спектрі є використання модульованих сигналів з розширеним, або шумоподібним спектром (spread spectrum, або "розподілений", "розмитий" спектр). Основна ідея застосування сигналів з розширеним спектром полягає у використанні для кожного абонента сигналу, який займає всю виділену для системи зв'язку ділянку спектру. Але при цьому значна кількість користувачів може одночасно використовувати виділену смугу частот. Для розділення користувачів, що використовують одночасно одну і ту ж смугу частот здійснюється розширення спектру цифрового модулюючого сигналу, а значить і високочастотного сигналу за допомогою спеціальної кодової послідовності.

Для розширення спектру кожному користувачу виділяється своя унікальна кодова послідовність, яка і дозволяє абонентам виділити з ефіру тільки їм призначений сигнал. Оскільки кількість кодів може бути дуже великою, то відповідно кількість користувачів також може бути значно більшою, ніж при поділі виділеної смуги частот на окремі канали.

Метод DSSS

Найбільш часто використовується метод розширення спектру DSSS - розширення спектру методом прямої послідовності (англ. Direct Sequence Spread Spectrum- DSSS). В результаті спектр модулюючого сигналу суттєво розширюється, а його амплітуда зменшується (рис. 3.14).

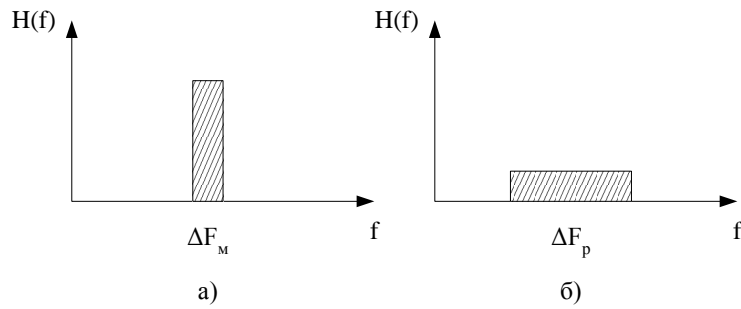


Рис.3.14 Спектр сигналу:

а) вузькосмугового, б) з розширеним спектром.

Відношення розширеної ширини спектру ΔF_p до мінімальної ширини спектру ΔF_m , необхідної для передачі конкретного сигналу, являється коефіцієнтом розширення спектру (коефіцієнтом підсилення системи, базою системи):

$$G = \frac{\Delta F_p}{\Delta F_m}. \quad (3.8)$$

Далі, модулюючий цифровий сигнал з розширеним спектром використовується для модуляції несучої частоти. В результаті спектр модулюючого сигналу набуває шумоподібного характеру, а потужність сигналу, який передається, “розмивається” в широкій смузі частот. В системі DSSS спектр цифрового інформаційного сигналу розширюється шляхом прямого перемноження на псевдо випадкову послідовність.

Нехай T_b – тривалість інформаційного символу (біту). Для представлення одного інформаційного символу використовується двійкова послідовність довжиною G . Кожен елемент двійкової послідовності, який називається чіпом, триває $T_c = T_b/G$ секунд (рис. 3.15). В результаті отримуємо інформаційний сигнал з розширеним спектром, причому його ширина визначається спектром псевдовипадкової послідовності та розширюється в G разів (3.8).

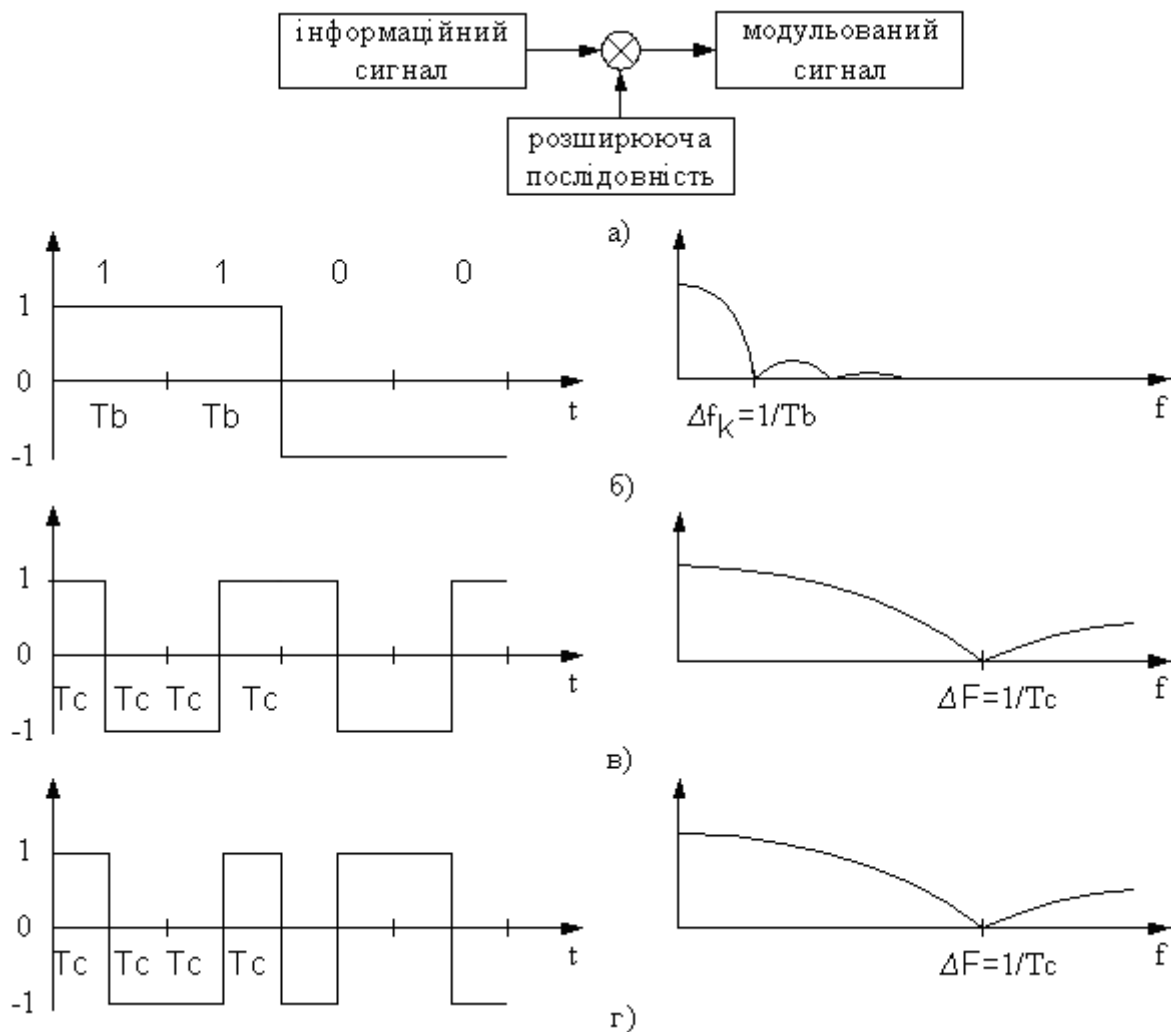


Рис.3.15 Формування широкосмугового модулюючого сигналу методом DSSS
 а) блок-схема, б) первинний інформаційний модулюючий сигнал та його спектр, в) індивідуальна розширююча послідовність, г) модульований сигнал з розширеним спектром

Смуги інформаційних сигналів можуть бути розширені з коефіцієнтами G від 10 до 10000 за рахунок представлення їх спеціальними двійковими послідовностями. Послідовність вибирається таким чином, щоб сторонньому спостерігачу вона здавалась випадковою, тобто її властивості повинні бути подібні на властивості шуму. Оскільки тривалість короткого імпульсу в M разів менша тривалості інформаційного біту, спектр сигналу з представленням інформаційних бітів у вигляді псевдовипадкової послідовності в M раз ширший за спектр первинного інформаційного сигналу.

Кореляційний приймач

З теорії систем зв'язку відомо, що оптимальним для прийому сигналів, спотворених білим гаусовим шумом, являється кореляційний приймач [10]. Він перемножує спотворений прийнятий сигнал з відомим, синхронізованим відносно прийнятого, опорним сигналом. В нашому випадку опорний – псевдовипадковий сигнал, що використовується в передавачі для розширення інформаційних бітів. На рис. 3.16 приведені структурні схеми передавача та приймача системи DSSS. Вважається, що двійкові інформаційні сигнали, приведені на рис. 3.16, мають біполярне представлення, тобто представлення псевдовипадкової послідовності (ПВП) інформаційними бітами еквівалентна перемноженню ПВП на -1 або +1.

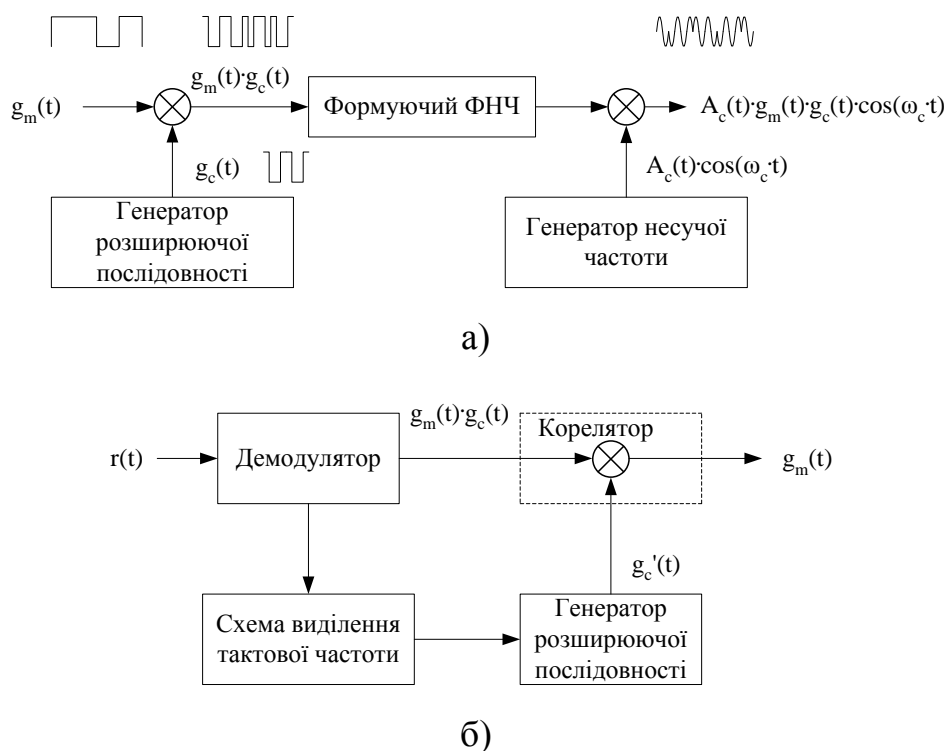


Рис.3.16 Узагальнена структура системи DSSS:

а) передавач, б) приймач

Формуючий ФНЧ обмежує спектр модулюючого сигналу до величини, необхідної для каналу зв'язку. Але тепер на вході фільтра сигнал має в G раз (3.8) більш широкий спектр, тобто і радіосигнал має в G разів більш широкий

спектр, порівняно з звичайним вузькосмуговим радіосигналом .

В приймачі вхідний сигнал спочатку поступає на демодулятор Далі, демодульований сигнал поступає на вхід корелятора та схеми виділення тактової частоти. Тактова частота в даному випадку необхідна для синхронізації роботи генератора кодової послідовності в приймачі. Відновлення початкового інформаційного сигналу здійснюється з допомогою кореляційної обробки прийнятого сигналу і синхронізованої кодової послідовності приймача.

В кореляційному приймачі здійснюється перемноження вхідного сигналу і кодової послідовності необхідного абонента. В результаті приймається тільки той сигнал, який був розширений за допомогою відповідної кодової послідовності. Для нього результат кореляції вищий за порогове значення, а всі інші сприймаються як шум. Таким чином, не заважаючи один одному, в одній смузі можуть працювати багато абонентів. При цьому кількість одночасно працюючих абонентів визначається тільки кількістю кодів (а їх може бути досить багато) і не залежить ні від робочої частоти, ні від швидкості передачі інформації. Практично кількість абонентів обмежується тільки допустимим шумовим фоном, який створюють багато абонентів. При великій кількості абонентів шумовий фон може бути настільки великим, що базовій станції важко виділити сигнал найбільш віддалених абонентів на фоні високого рівня шуму.

Переваги широкосмугової системи з DSSS

Система DSSS представляє собою альтернативу системам з вузькосмуговим каналом [4]. Розглянемо переваги такої системи. Протягом багатьох років системи з розширеним спектром застосовувались тільки у військових цілях. Псевдошумовий сигнал з потужністю, яка не перевищує рівень шуму, досить важко виявити. Для можливості його розпізнавання приймач повинен знати конкретну ПВП, що використовувалась в передавачі, та бути синхронізованим з передавачем. Відмітимо, що в реальних системах

використовуються псевдовипадкові послідовності з періодом від декількох десятків до багатьох тисяч біт. Вибір послідовності проводиться наступним чином:

- щоб її автокореляційна функція була приблизно рівна нулю незалежно від часового зсуву між послідовністю та її зсунутою копією (вийняток є лише нульовий зсув, при якому автокореляційна функція приймає своє максимальне значення);
- в той же самий час функція взаємної кореляції для різних послідовностей однакової довжини повинна бути рівна нулю для будь-якого часового зсуву між послідовностями.

Нульова автокореляційна функція для будь-яких, відмінних від нуля, часових зсувів забезпечує стійкість системи до багатопроменевого поширення радіохвиль. Широкопasmовий сигнал значно менше піддається впливу різних завад та перешкод. Розповсюджуючись між базовою станцією і мобільним апаратом, радіохвиля багато разів відбивається від перешкод. В результаті інтерференції сигналів, що пройшли різними шляхами, інтенсивність сигналу в певних точках приймання може різко зменшитись. Тобто, сигнал від передавача до одержувача потрапляє не тільки по найкоротшому шляху - прямій, але й іншими шляхами. Ця властивість розповсюдження радіосигналу називається багатопроменевим поширенням радіохвиль. Багатопроменеве поширення може викликати ряд небажаних ефектів. Радіосигнали, надходячи до одержувача різними шляхами, матимуть різну затримку. В точці прийому сигнали додаються. Якщо при цьому серед відбитих сигналів переважають сигнали, синфазні прямому, то сумарний сигнал збільшується, якщо більше протифазних сигналів – то сумарний сигнал значно зменшується. Такі явища, в радіотехніці називаються завмираннями або федингами (fading) і зазвичай спостерігаються в обмежених просторових областях, форма і розташування котрих визначаються розташуванням будівель і довжиною хвилі, на якій ведеться передача.

Стійкість до багатопроменевого поширення сигналу виникає, якщо

тривалість чіпа є коротшою за найменшу різницю між затримками поширення сигналу різними шляхами. Сигнал приходить в приймач у вигляді декількох зсунутих в часі копій. Але різниці між часовими зсувами переважно більші тривалості одного чіпа. Отже приймач синхронізується з сильнішою складовою прийнятого сигналу. В результаті кореляційної обробки всі інші копії сигналу відкидаються.

Точно так само, завдяки нульовій взаємній кореляції між двома різними послідовностями, відкидаються сигнали інших користувачів.

Але необхідно звернути увагу на те, що ігнорування всіх прийнятих копій сигналу (за винятком самої сильної) не являється оптимальним рішенням. Воно приводить до втрати інформації, яка міститься у відкинутих ехо-сигналах. Згадані копії також можна використати після їх виділення та застосувати таким чином, щоб енергія суми сигналів була максимальною. Така операція реалізується в RAKE-приймачі. Він являється основним типом приймача, який використовується в каналах з багатопроменевим поширенням.

З властивостей взаємної кореляції псевдовипадкових послідовностей, які використовуються можна отримати цікаву властивість систем з розширеним спектром. Завдяки тому, що кореляційні пристрої приймача пропускають лише єдину послідовність, один і той же спектр може розділитись між різними користувачами, що використовують різні псевдо випадкові послідовності. Така властивість якраз і лежить в основі методу CDMA.

Розробники військових систем були зацікавлені в системах з розширеним спектром ще й тому, що таким системам властива стійкість до вузькосмугових завад. Вузькосмугова завада здатна "зіпсувати" широкосмуговий сигнал тільки в якомусь відносно вузькому частотному діапазоні, а корисна інформація може бути відновлена на основі непошкоджених ділянок несучого діапазону. Згадана перевага широкосмугового сигналу справедлива також у випадку наявності федингу.

Сигнали з розширеним спектром мають цікаву особливість. При перемноженні бітової послідовності з шумоподібною послідовністю (в

передавачі) відбувається розширення спектру сигналу. В приймачі вхідний радіосигнал з розширеним спектром поступає на корелятор, на другий вхід якого також подається шумоподібна послідовність, аналогічна тій, що була використана в передавачі. В результаті перемноження вхідного радіосигналу з шумоподібною послідовністю на виході корелятора отримаємо ефект зворотній тому, що відбувся в передавачі (спектр сигналу знову звужиться і стане рівним ширині спектру каналної бітової послідовності). Важливо відмітити наступну властивість сигналу з розширеним спектром:

- при першому перемноженні (в передавачі) бітової послідовності з сигналом шумоподібною послідовністю відбувається розширення спектру;
- друге перемноження (в кореляторі приймача) з такою ж шумоподібною послідовністю, знову звужує спектр до початкового спектру каналних бітів.

Ця властивість сигналів з розширеним спектром відіграє важливу роль в зменшенні негативного впливу завад. Припустимо (рис. 3.17), що в радіоканалі є вузькосмугова (навмисна, або випадкова) завада, спектр якої знаходиться в межах розширеного спектру сигналу. При попаданні завади разом із сигналом на вхід приймача в кореляторі сигнал піддається другому множенню на шумоподібну послідовність, його спектр звужиться, а завада піддається першому перемноженню з шумоподібною послідовністю і її спектр розшириться. При виділенні смуговим фільтром (наприклад, на проміжній частоті) спектру корисного сигналу в його смугу потраплятиме лише мала частка енергії завади. Тому, навіть відносно сильна вузькосмугова завада зробить незначний вплив на сигнал який передається.

Інтерференція сигналів, що прийшли різними шляхами призводить до зниження сумарної інтенсивності лише в достатньо вузькому частотному діапазоні, і знову корисну інформацію можна відновити використовуючи непошкоджену частину сигналу. Звичайно, сигнал дещо погіршується, проте це погіршення не порівняти з втратами якості зв'язку при використанні звичайних

методів модуляції.

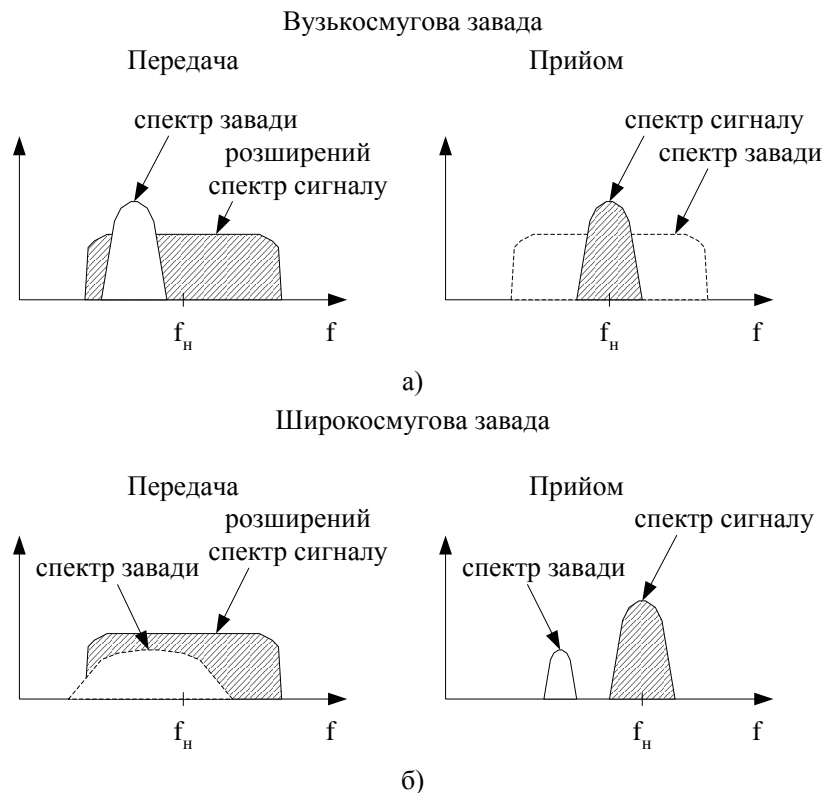


Рис.3.17 Вплив завад на широкосмуговий сигнал:

а) вузькосмугової завади, б) широкосмугової завади

.При використанні розширеного спектру можна прийняти сигнал, тільки знаючи послідовність, на яку був перемножений корисний сигнал при його передачі, в іншому випадку він виглядатиме як шум (звідси і назва). Для функціонування такої системи важливо забезпечити наступне: якщо два абонентські телефони, що знаходяться в зоні дії однієї базової станції, працюють на загальній частоті, але з різними кодуючими послідовностями, то ці сигнали практично не повинні створювати перешкод один для одного.

3.5. Розширюючі кодові послідовності

Розширення спектру здійснюється за допомогою псевдовипадкових (ПВП) послідовностей. ПВП – це повністю детерміновані періодичні цифрові послідовності з настільки довгим періодом порівняно з часом передачі одного

елемента послідовності, що сторонньому спостерігачеві вони здаються випадковими [8]. В дійсності такі послідовності не можуть бути повністю випадковими, оскільки вони повинні бути повторені в приймачі. Кореляційна функція повинна представляти собою ідеальний імпульс, тобто символи ідеальної псевдовипадкової послідовності не повинні бути корельованими. Оскільки середнє значення “білої” послідовності рівне нулю, автокореляційна функція повинна приймати нульові значення при ненульових аргументах. Остання властивість гарантує також впевнений прийом сигналу, який приходить в приймач у вигляді ехо-копій, з часовим зсув одна відносно одної. Окремі ехо-копії можна ефективно виділити за допомогою кореляції сукупного прийнятого сигналу з псевдовипадковим, синхронізованим з сигналом, що міститься в потрібній копії. Узагальнюючи вищевикладене можна стверджувати, що необхідними властивостями ідеальної розширюючої ПВПІ являються:

- “білий” спектр;
- нульова автокореляційна функція.

Виникає наступне питання: які властивості повинна мати розширююча послідовність у випадку, якщо декілька користувачів виконують радіопередачу в одному і тому самому діапазоні частот (як це здійснюється в CDMA системі), щоб розрізнити користувачів?

В якості розширюючої цифрової послідовності при застосуванні методу DSSS використовуються:

- m -послідовності;
- послідовності Уолша.

3.5.1. m -послідовності

Псевдовипадкова бінарна послідовність, може генеруватися за допомогою регістру зсуву і суматора за модулем 2 в колі зворотного зв'язку [10]. Послідовності, утворені за таким алгоритмом, називають послідовностями максимальної довжини або m -послідовностями.

Відмітимо основні характеристики m -послідовностей, які важливі для аналізу модульованого сигналу:

кількість нулів і одиниць для послідовності будь-якої довжини відрізняється не більше ніж на одиницю;

автокореляційна функція періодичної m -послідовності має вид:

$$\begin{aligned} R_c(k) &= 1 & k = m \cdot N \\ R_c(k) &= -\frac{1}{N} & k \neq m \cdot N \end{aligned} \quad (3.9)$$

де m - ціле число; N - довжина послідовності.

Автокореляційна функція для m -послідовності при тривалості імпульсів τ приведена на рис. 3.18. Вона має період повторення рівний довжині послідовності і дискретний частотний спектр з кроком рівним $1/(N \cdot T_c)$, причому $T_c = T_{\text{код}}$. Очевидно, що при N , яке прямує до безмежності, періодичність автокореляційної функції стає не суттєвою, тільки один пік при $t = 0$ має значення для виділення сигналу, а спектр стає неперервним.

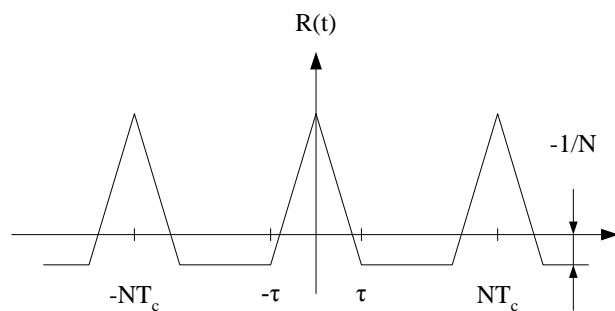


Рис.3.18 Автокореляційна характеристика m -послідовності

Таке припущення справедливе для реальних систем зв'язку, в яких довжина розширюючої послідовності може досягнути 2^{32} .

Добрі автокореляційні властивості m -послідовностей дозволяють ефективно перетворити інформаційний вузькосмуговий модулюючий сигнал в шумоподібний з розширеним спектром. Але кореляційні властивості m -

послідовностей (тобто можливість розрізнити послідовності) не є найкращими. Тому, для кодового розділення абонентів в деяких системах зв'язку додатково використовуються ортогональні цифрові послідовності, одним з прикладів яких являється послідовність Уолша. Ортогональна послідовність аналогічно, як і m -послідовність, модулює інформаційний сигнал. Але тривалість імпульсів в додатковій ортогональній послідовності переважно суттєво більша, порівняно з тривалістю імпульсів m -послідовності тому її вплив на результуючу ширину спектру дуже малий.

В якості розширюючої послідовності в системі CDMA IS-95 застосовуються три кодові послідовності:

- Перша із них, використовується для синхронізації роботи обладнання і володіє змінною довжиною.
- Друга m -послідовність володіє максимальною довжиною $N=2^{42}-1$ і використовується для ідентифікації абонентських станцій із сторони базової станції.
- Третя послідовність використовується для передачі корисної інформації між базовою та абонентською станціями і представляє собою одну з послідовностей Уолша.

При використанні стандарту CDMA кожен біт інформаційного сигналу, згідно індивідуального коду користувача, замінюється послідовністю k елементарних сигналів. При цьому швидкість вхідного сигналу R збільшується в k разів і становить $k \cdot R$. Послідовності вибираються ортогональними, причому 0 і 1 можуть кодуватись інверсними сигналами. Ортогональні коди – це такі набори послідовностей, для яких всі попарні функції взаємної кореляції рівні нулю. Взаємнокореляційна функція має більш важливе значення для систем із кодовим розділенням абонентів, і відрізняється від АКФ лише тим, що показує ступінь подібності одної кодової послідовності з іншою. Ортогональний набір будь-яких двох s_a та s_b послідовностей має наступні властивості

$$S = \sum_k Sa_k \cdot Sb_k. \quad (3.10)$$

3.5.2. Послідовності Голда та Касамі

Автокореляційна функція m -послідовностей є достатньою хороши властивості [8]. Проте, взаємна кореляція різних послідовностей однакової довжини може досягати достатньо високих значень близьких до (2^N-1) автокореляційної функції. В системі CDMA працює багато користувачів у спільній смузі частот, тому результат взаємної кореляції послідовностей повинен бути якомога меншим. Ця умова не виконується для m -послідовностей. Вирішити це завдання дозволяють послідовності Голда (Gold) та Касамі (Kasami).

Голд виявив, що деякі пари (x,y) m -послідовностей довжиною (2^N-1) мають функцію взаємної кореляції $R_{xy}(k)$ з трьома значеннями:

$$R_{xy}(k) \in \{-1, -t(N), t(N)-2\}, \quad (3.11)$$

де:

$$t(N) = \begin{cases} 2^{(N+1)/2} + 1 & \text{для непарних } N \\ 2^{(N+2)/2} + 1 & \text{для парних } N \end{cases}. \quad (3.12)$$

Такі пари (x,y) називаються бажаними послідовностями. Значення (3.11) набагато менші максимальних значень функції взаємної кореляції будь-якої пари m -послідовностей такої ж довжини. Послідовності Голда генеруються на базі пари бажаних послідовностей за допомогою додавання по модулю 2 першої m -послідовності з будь-якою циклічно зсунутою копією другої m -послідовності. В результаті цієї операції формується нова періодична послідовність з періодом (2^N-1) . Кількість отриманих таким чином послідовностей Голда, які утворюють одне сімейство складає (2^N+1) , тому що кількість можливих зсунутих копій другої послідовності рівна (2^N-1) , і обидві

бажані послідовності без зсуву також входять у сімейство. На рис. 3.19 зображений приклад генератора послідовностей Голда довжиною 63. Послідовності Голда використовуються в системі UMTS.

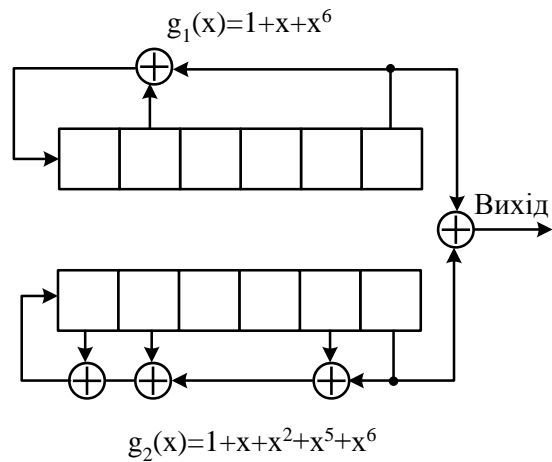


Рис.3.19 Генератор послідовностей Голда

Послідовності Касамі отримуються аналогічно як і послідовності Голда. Розглянемо m -послідовність x довжиною $(2^N - 1)$, де N – парне число. Побудуємо послідовність y за допомогою проріджування кожного $(2^{N/2} + 1)$ -го біта послідовності x . Можна довести, що послідовність y являється періодичною з періодом $(2^{N/2} - 1)$. Послідовності Касамі формуються додаванням по модулю 2 послідовності x та зсунутих і повторюваних послідовностей y . Кількість можливих зсунутих копій послідовності y дорівнює $(2^{N/2} - 1)$, тому, якщо включити послідовність x в сімейство послідовностей Касамі, сумарна кількість послідовностей в сімействі складатиме $2^{N/2}$. Можна також довести, що значення автокореляційних функцій і функцій взаємної кореляції, з яких складається сімейство послідовностей, належать множині $\{-1, -(2^{N/2} + 1), 2^{N/2} - 1\}$ і що послідовності Касамі мають найменшу взаємну кореляцію серед всіх пар двійкових послідовностей з періодом $n = (2^{N/2} - 1)$ із набору M послідовностей (для послідовностей Касамі $M = 2^{N/2}$).

3.5.3. Послідовності Уолша

В якості розширюючих послідовностей для коду користувача широко використовують послідовності Уолша (Walsh). Послідовностям Уолша властива їх точна взаємна ортогональність. Така властивість, як відомо являється визначальною для CDMA систем. На відміну від m -послідовностей, взаємна кореляція двох різних послідовностей Уолша точно рівна нулю. Тому, послідовності Уолша використовуються в CDMA системах IS-95, cdma2000, WCDMA.

Кожна із послідовностей Уолша представляє собою один з k рядків матриці Адамара (Hadamar), причому в стандарті CDMA найчастіше використовується 64 рядкові матриці. Основна властивість рядків матриці полягає в тому, що вони (і їхня інверсія) взаємно ортогональні. Спосіб побудови матриці Адамара досить простий. Матриця першого порядку $A_1 = |1|$. Матриця A_{2n} утворюється за схемою:

$$A_{2n} = \begin{bmatrix} A_n & A_n \\ A_n & -A_n \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Так, матриця Адамара другого порядку має вигляд:

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

Аналогічно можна отримати матрицю Адамара четвертого порядку:

$$A_4 = \begin{bmatrix} A_2 & A_2 \\ A_2 & -A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

Послідовності Уолша також мають деякі недоліки. Основним недоліком являється ненульова функція взаємної кореляції послідовності Уолша з своєю

циклічно зсунутою копією, або з циклічно зсунутою копією іншої послідовності Уолша такої самої довжини. Цій недолік виявляється, якщо в CDMA приймач приходять ехо-копії сигналу з різною затримкою внаслідок багатопроменевого поширення хвиль.

Приклад кодового розділення абонентів за допомогою функцій Уолша

Розглянемо приклад, коли в одній зоні функціонує почергово один з 4 абонентів (A, B, C, D), причому кодова послідовність кожного (s_a, s_b, s_c, s_d) визначається відповідно кожним рядком матриці (3.15) – у випадку передавання значення 1, та інверсною послідовністю рядка – у випадку передавання нуля.

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

Отримані послідовності відомі, як послідовності Уолша.

Нехай базовій станції необхідно прийняти сигнал, наприклад, від абонента C. Тоді в кореляторі приймача базової станції встановлюється кодова послідовність абонента C, тобто s_c :

$$s_c = [1 \ 1 \ -1 \ -1], \quad (3.17)$$

та здійснюється визначення степені корельованості сигналів наступним чином:

$$S = \sum_{k=1}^4 s_{ck} \cdot s_{nk}, \quad (3.18)$$

де s_{ck}, s_{nk} – k-ий член однієї з кодових послідовностей s_a, s_b, s_c, s_d .

Величина s_n може приймати одне з значень s_a, s_b, s_c, s_d залежно від того,

який з абонентів в даний час на зв'язку.

$$\begin{aligned} s_a &= [1 \ 1 \ 1 \ 1], \\ s_b &= [1 \ -1 \ 1 \ -1], \\ s_c &= [1 \ 1 \ -1 \ -1], \\ s_d &= [1 \ -1 \ -1 \ 1]. \end{aligned} \tag{3.19}$$

В результаті на виході корелятора, згідно (3.18), отримаємо для кожного з абонентів наступний сигнал у випадку передачі біта, що відповідає одиниці та нулю відповідно:

для абонента А, кодова послідовність для якого приведена в дужках:

$$1*(1)+1*(1) -1*(1) -1*(1)= 0 \quad \text{- при передаванні значення 1}$$

$$1*(-1)+1*(-1) -1*(-1) -1*(-1)= 0 \quad \text{- при передаванні значення 0}$$

для абонента В, кодова послідовність якого приведена в дужках:

$$1*(1)+1*(-1) -1*(1) -1*(-1)= 0 \quad \text{- при передаванні значення 1}$$

$$1*(-1)+1*(1) -1*(-1) -1*(1)= 0 \quad \text{- при передаванні значення 0}$$

для абонента С, кодова послідовність якого приведена в дужках:

$$1*(1)+1*(1) -1*(-1) -1*(-1)= 4 \quad \text{- при передаванні значення 1} \tag{3.20}$$

$$1*(-1)+1*(-1) -1*(1) -1*(1)= -4 \quad \text{- при передаванні значення 0}$$

для абонента D, кодова послідовність якого приведена в дужках:

$$1*(1)+1*(-1) -1*(-1) -1*(1)= 0 \quad \text{- при передаванні значення 1}$$

$$1*(-1)+1*(1) -1*(1) -1*(-1)= 0 \quad \text{- при передаванні значення 0}$$

Як видно із залежностей (3.20) в приймачі виділяється значний сигнал тільки від того абонента, на чю кодову послідовність “настроєний” приймач, а всі інші сигнали “ігноруються”. Якщо приймач отримав сигнал з знаком +, це означає, що потрібний абонент передав біт, який відповідає одиниці, а якщо з знаком мінус - біт, який відповідає нулю. Аналогічно здійснюється зв'язок при використанні для будь-якої довжини послідовності Уолша.

Якщо користувачі А, В і С одночасно передають сигнали s_a , s_b , і s_c

відповідно, а декодер приймача являється лінійним, має місце рівність, на основі залежності (3.18), для випадку використання у приймачі кодової послідовності для А абонента отримаємо:

$$S_a(s_a + s_b + s_c) = S_a(s_a) + S_a(s_b) + S_a(s_c) = S_a(s_a). \quad (3.21)$$

Рівність (3.21) справедлива, оскільки при використанні в приймачі коду абонента А, декодер просто ігнорує сигнали абонентів В та С, оскільки їх коди ортогональні до коду потрібного абонента А.

4. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ CDMA

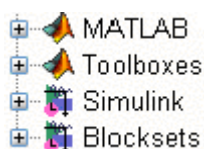
4.1. Загальні зауваження

Системи CDMA використовують найсучасніші досягнення в області радіозв'язку та телекомунікацій. Застосовані принципи функціонування окремих вузлів є досить складними в різних аспектах:

- в реальній роботі;
- при їх вивченні;
- для моделювання.

Тому доцільно мати “інструмент”, який міг би допомогти у вирішенні згаданих проблем.

В якості такого “інструменту” доцільно використати систему MATLAB [60]. Вона складається з 4 таких основних частин:



В кожній з частин є досить багато моделей як систем CDMA в цілому, так і її окремих складових.

Перевагою приведених в системі моделей являється можливість користувача розробити необхідну модель на базі модернізації існуючих моделей. Наприклад, в моделі системи CDMA використовується “baseband” модуляція, тобто з нульовою несучою частотою. При необхідності дану модель можна модернізувати з незначними зусиллями за декілька годин. Зауважимо, що розробкою кожної з приведених моделей розробники системи MATLAB займаються декілька місяців. Тому, розробити модель системи з самого початку для більшості користувачів являється дуже проблематичним.

Приведені в системі MATLAB моделі можуть бути особливо корисними

при вивченні основ функціонування систем CDMA. Через обмежений об'єм даної книги в ній не приводиться детальний опис кожної моделі. В системі MATLAB наявний великий об'єм допоміжної інформації, необхідної для правильного використання моделей.

На нашу думку навіть поверхневе ознайомлення з приведеними в даному розділі моделей вже наведе читача на деякі корисні висновки:

- вивчення систем CDMA являється серйозним кропітким процесом;
- в процесі вивчення таких систем доцільно, при можливості, використовувати приведені моделі.

Далі матеріал книги викладений без посилань на систему MATLAB, з метою ознайомлення з мережами CDMA навіть при відсутності в читача системи MATLAB. Лише в додатку приведені деякий окремий матеріал, який стосується окремих процесів, які широко використовуються в мережах CDMA.

4.2. Моделі системи IS-95

В блоці розширення CDMA Reference наявні різні моделі системи IS-95;



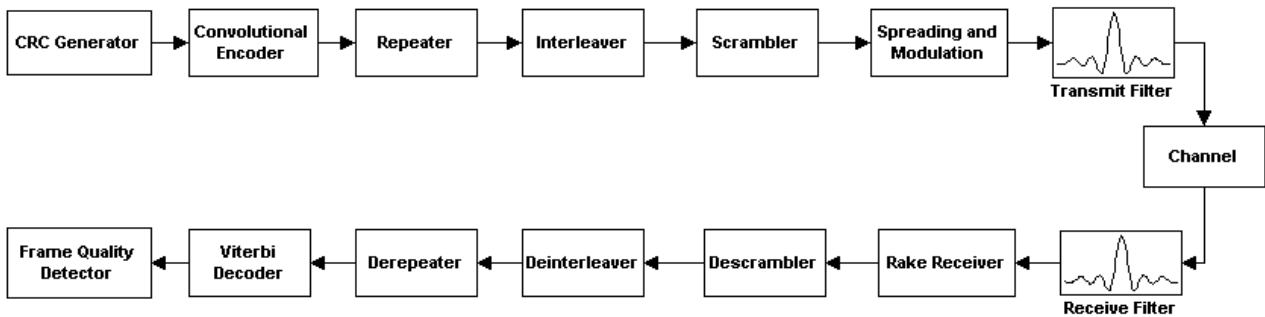
Наявні моделі системи

Перелік моделей системи IS-95 приведено нижче.

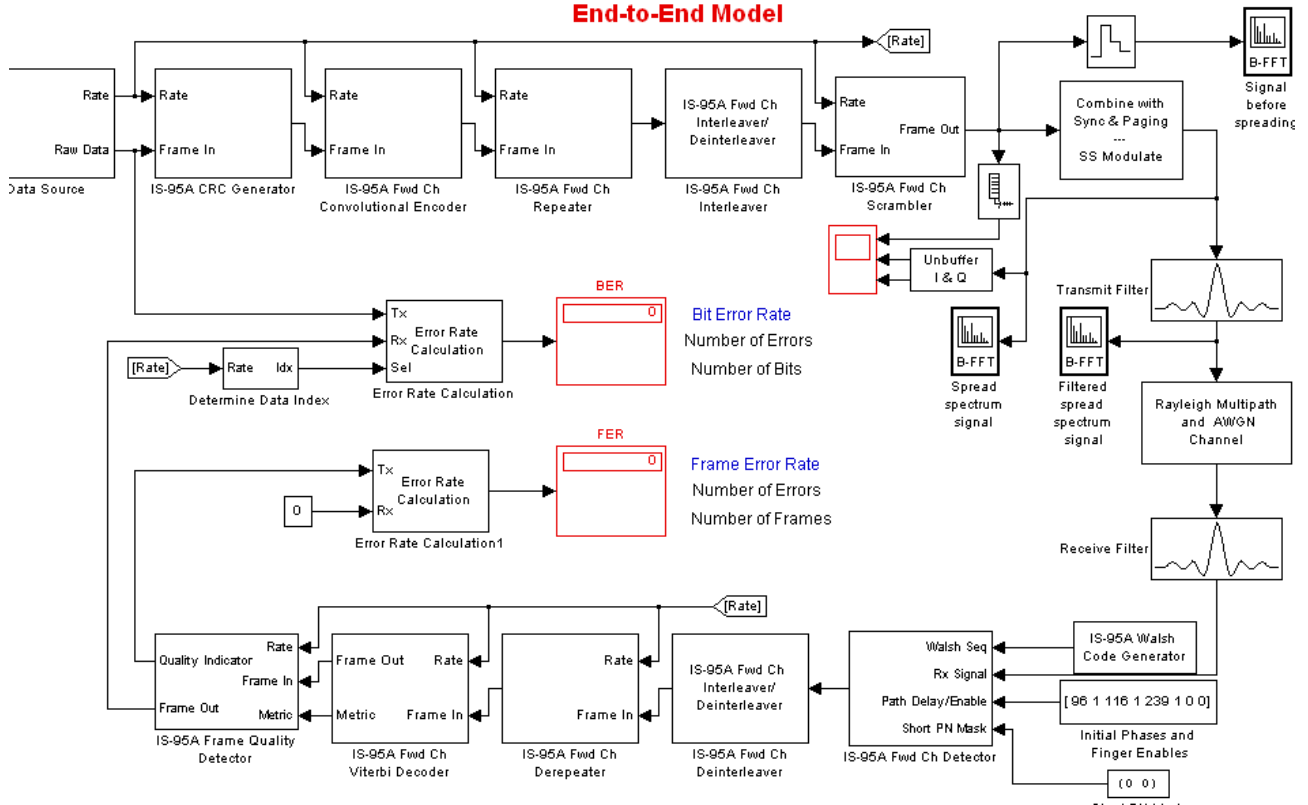


Кожна з моделей дозволяє здійснити моделювання різних вузлів системи.

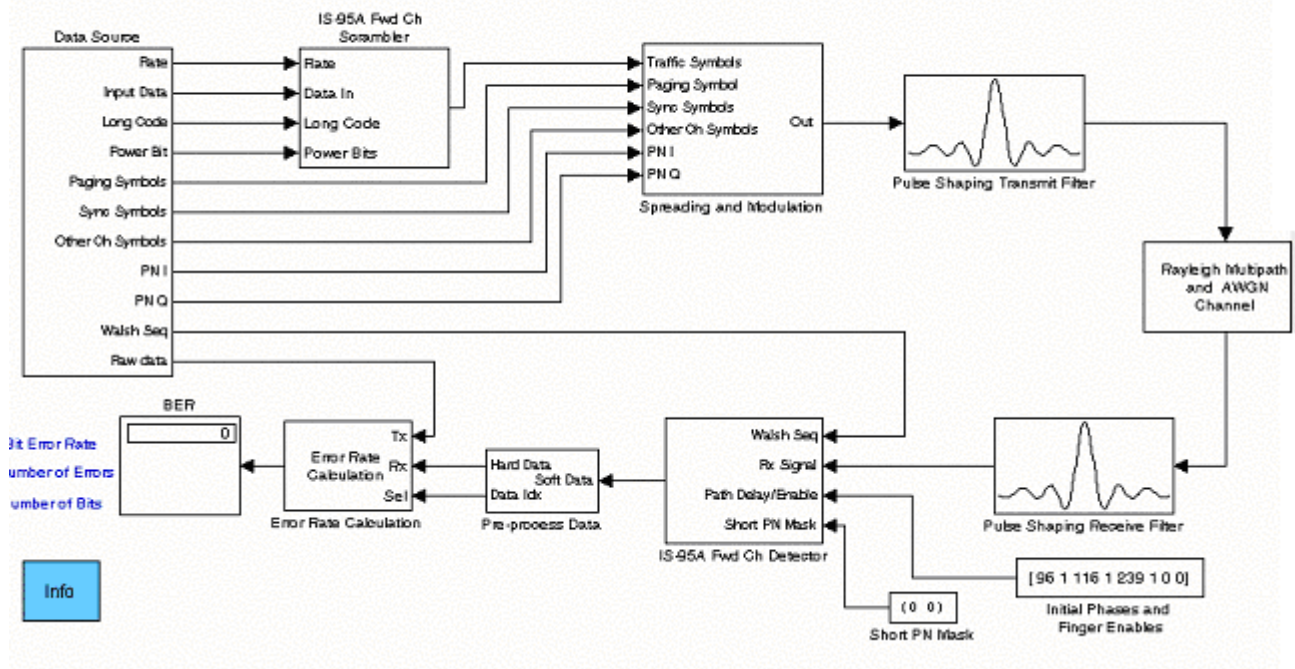
Нижче приведено блок-схему моделей та самі моделі.



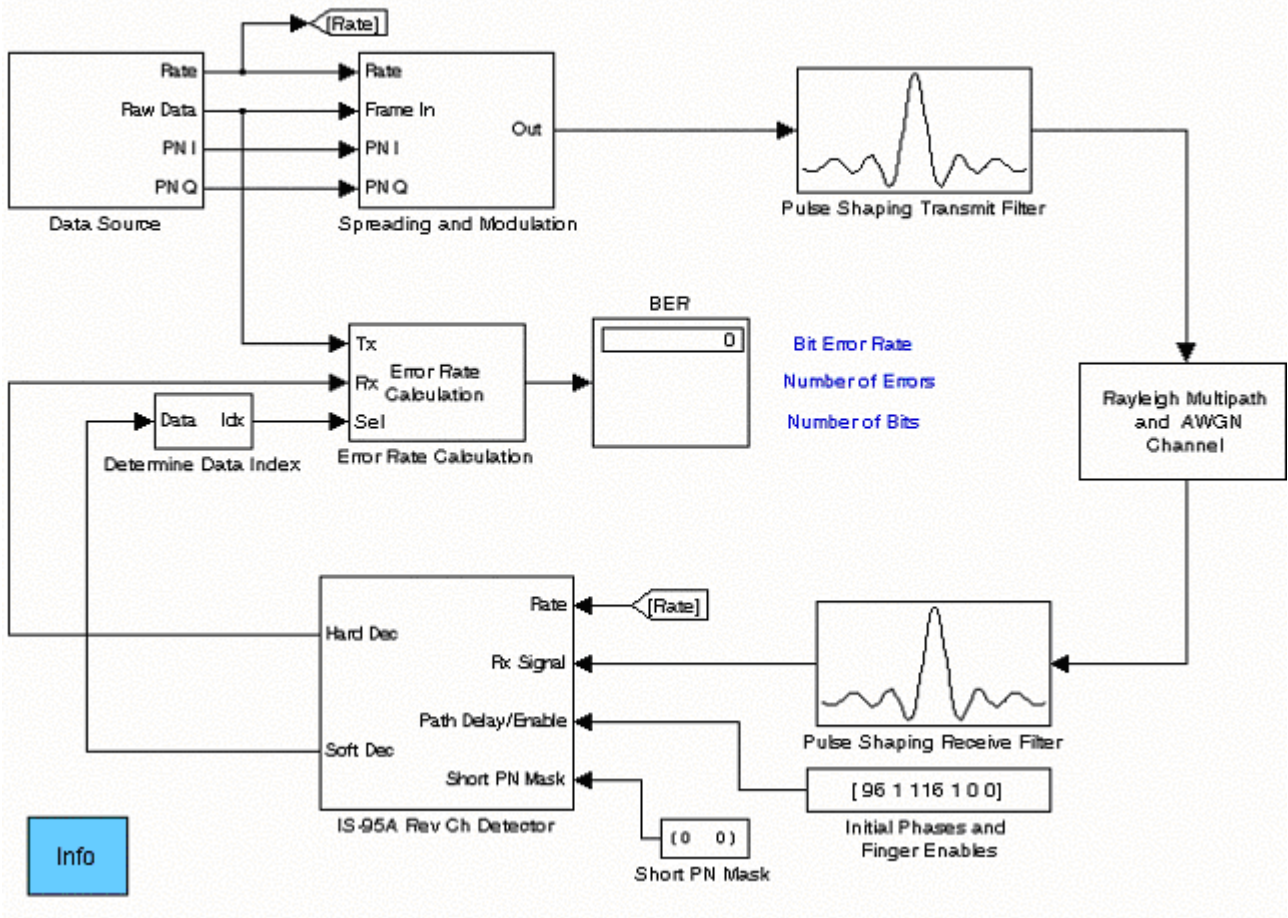
IS-95A Forward Traffic Channel End-to-End Model



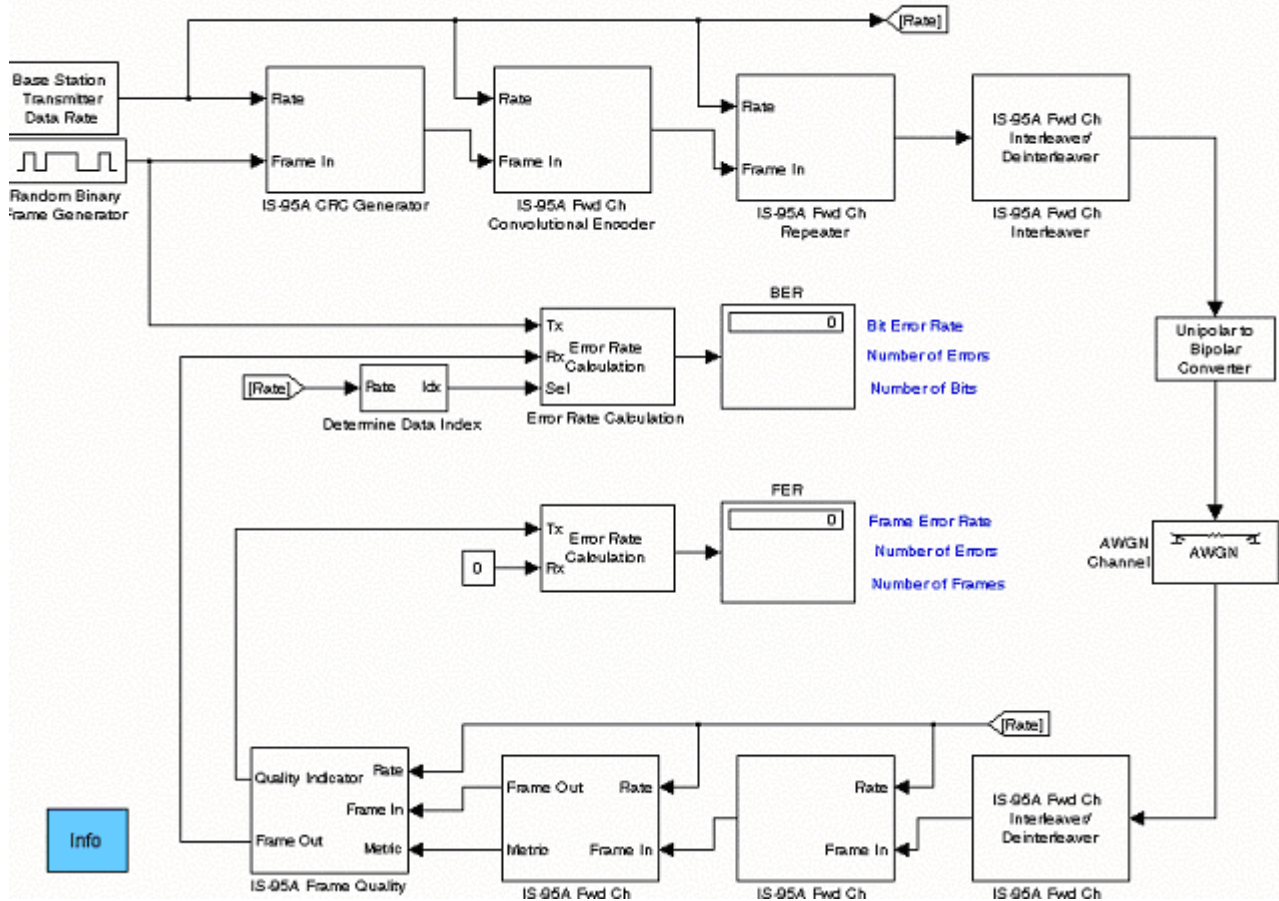
IS-95A Forward Traffic Channel Detection



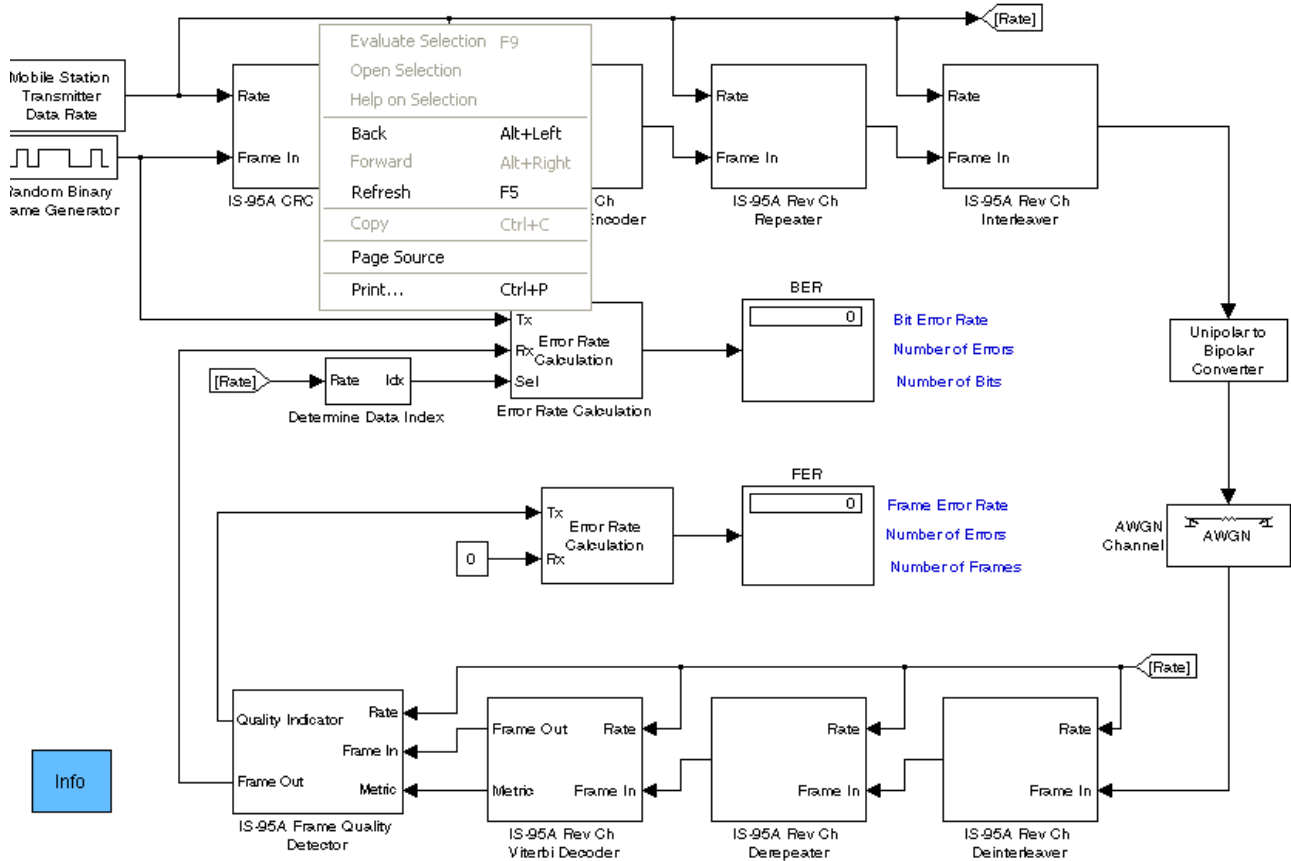
IS-95A Reverse Traffic Channel Detection



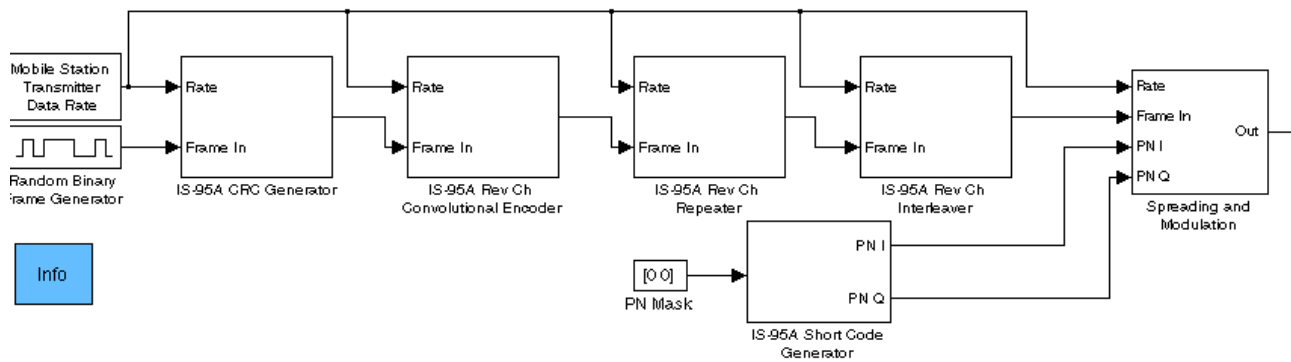
IS-95A Forward Traffic Channel Codec



IS-95A Reverse Traffic Channel Codec

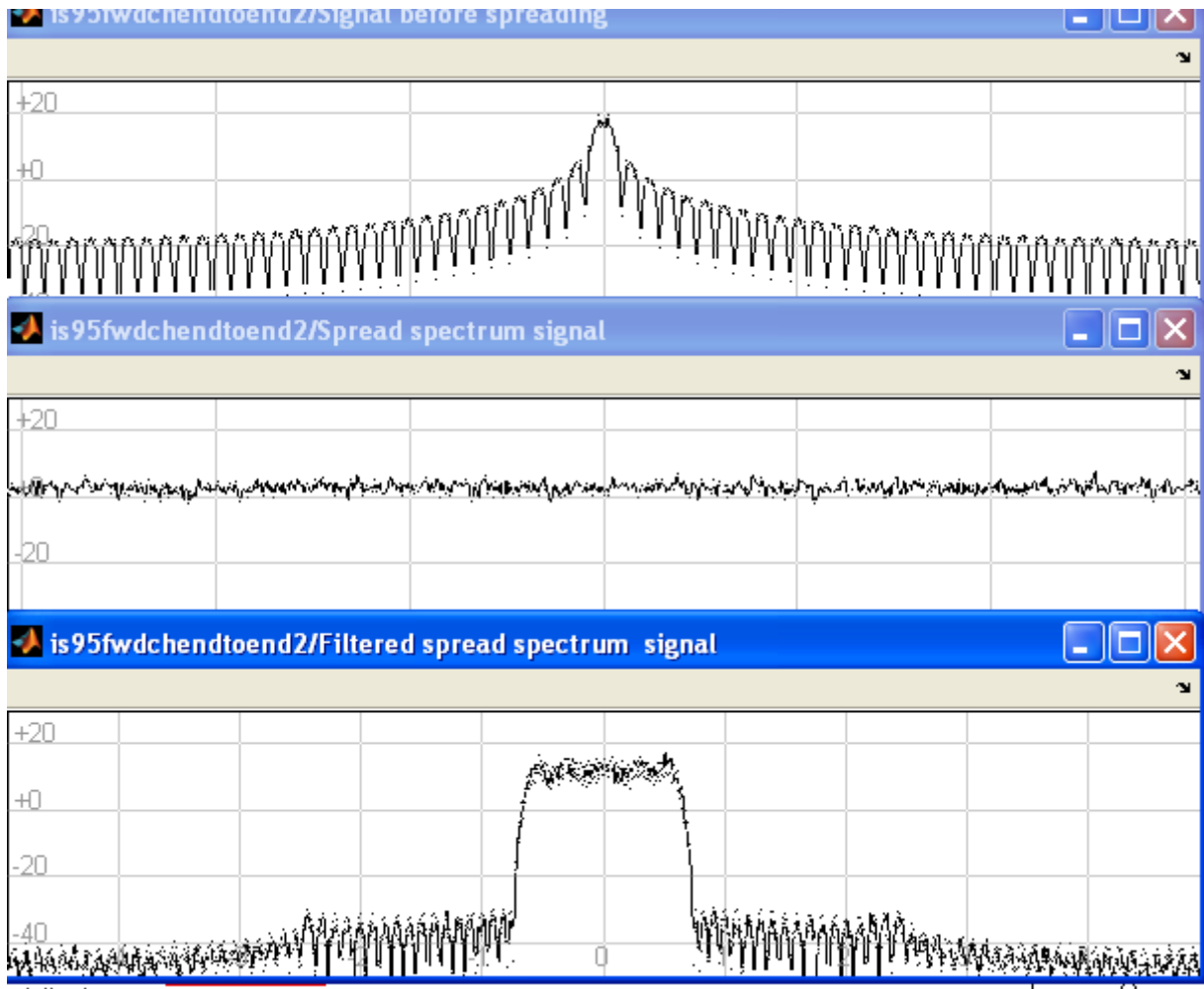


IS-95A Reverse Traffic Channel Transmitter



Сигнали в окремих вузлах моделі

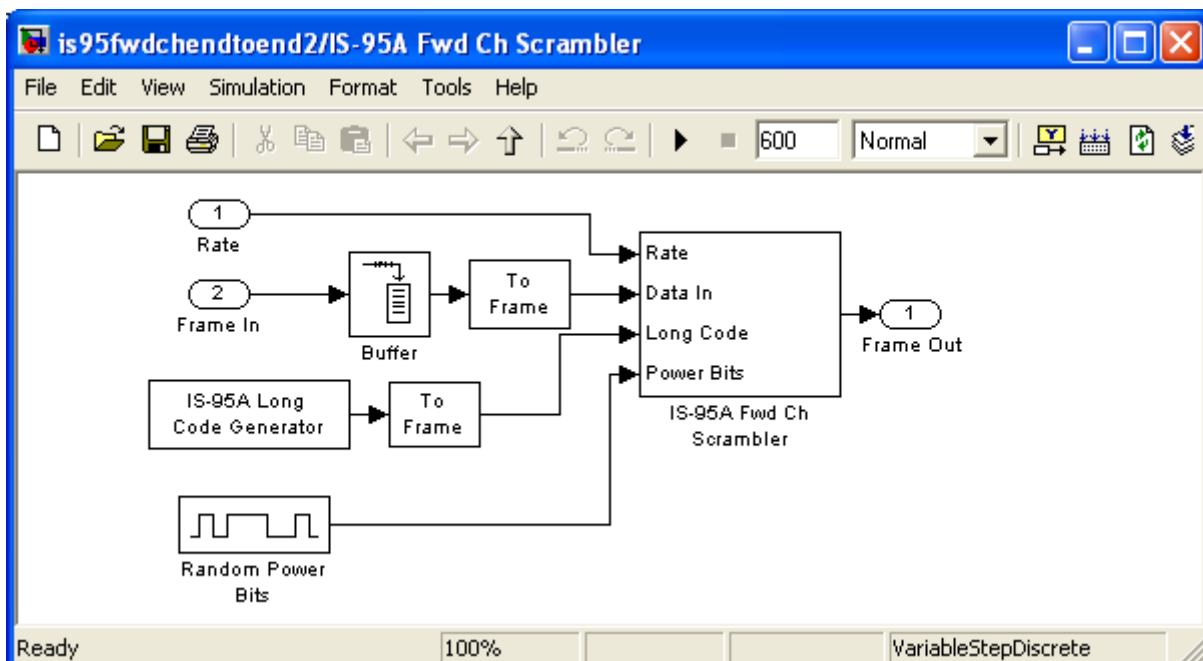
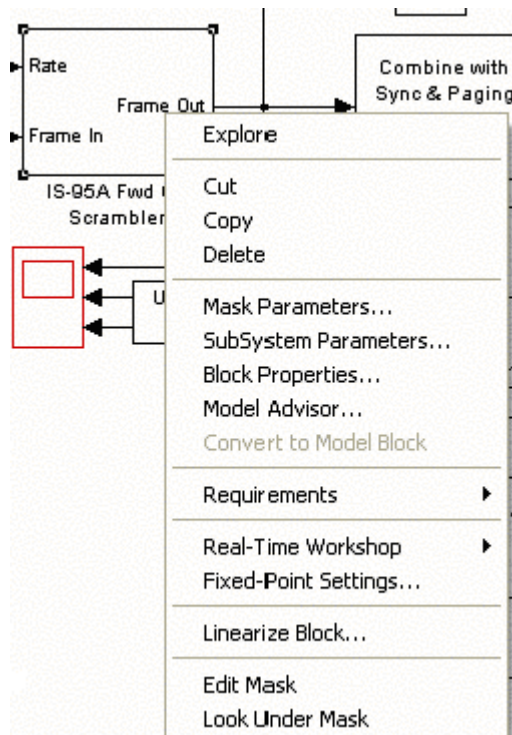
Ввімкнувши, наприклад, першу з шести приведених моделей, отримаємо сигнали в різних блоках моделі.



Аналогічно можна отримати сигнали, які характеризують роботу інших моделей.

Склад окремих блоків моделі

Для будь-якої моделі можна подивитись на склад її функціональних вузлів. Наприклад, нижче (команда – Look Under Mask) приведено склад скремблера першої моделі:

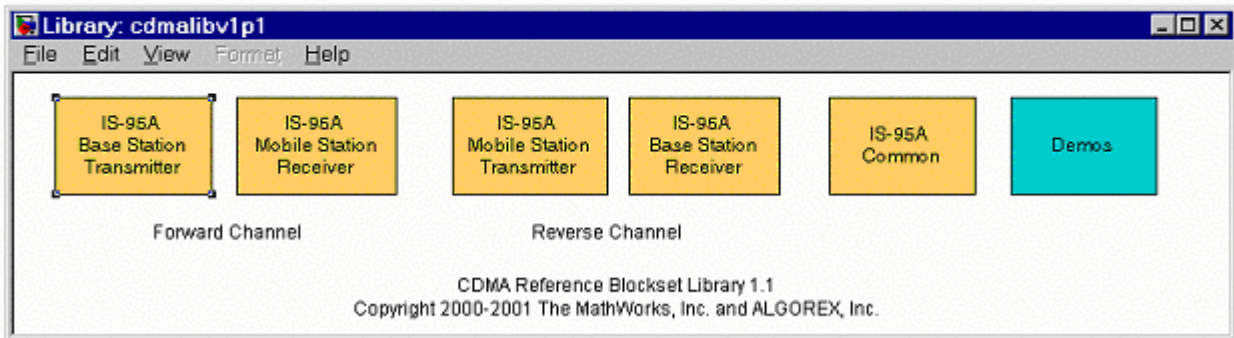


В блоці розширення CDMA Reference також приведено значну кількість бібліотек окремих вузлів.

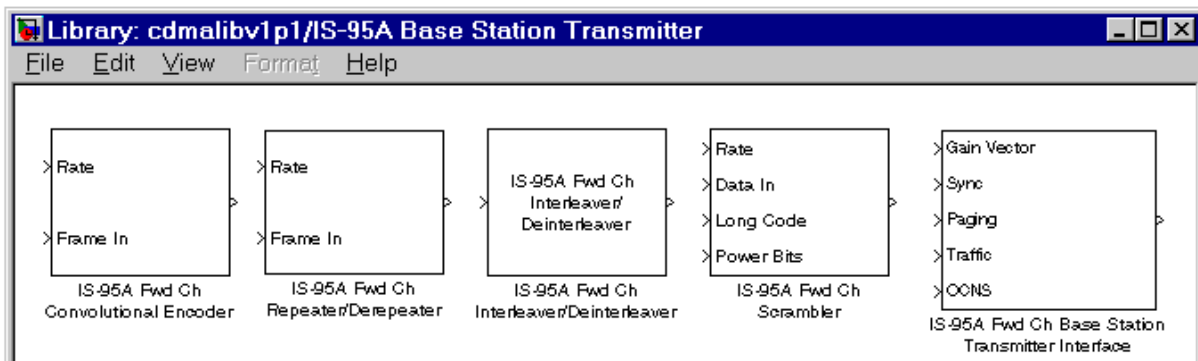
Бібліотеки моделей окремих вузлів

В складі бібліотеки є такі:

- [IS-95A Base Station Transmitter Library](#)
- [IS-95A Mobile Station Receiver Library](#)
- [IS-95A Mobile Station Transmitter Library](#)
- [IS-95A Base Station Receiver Library](#)
- [IS-95A Common Library](#)

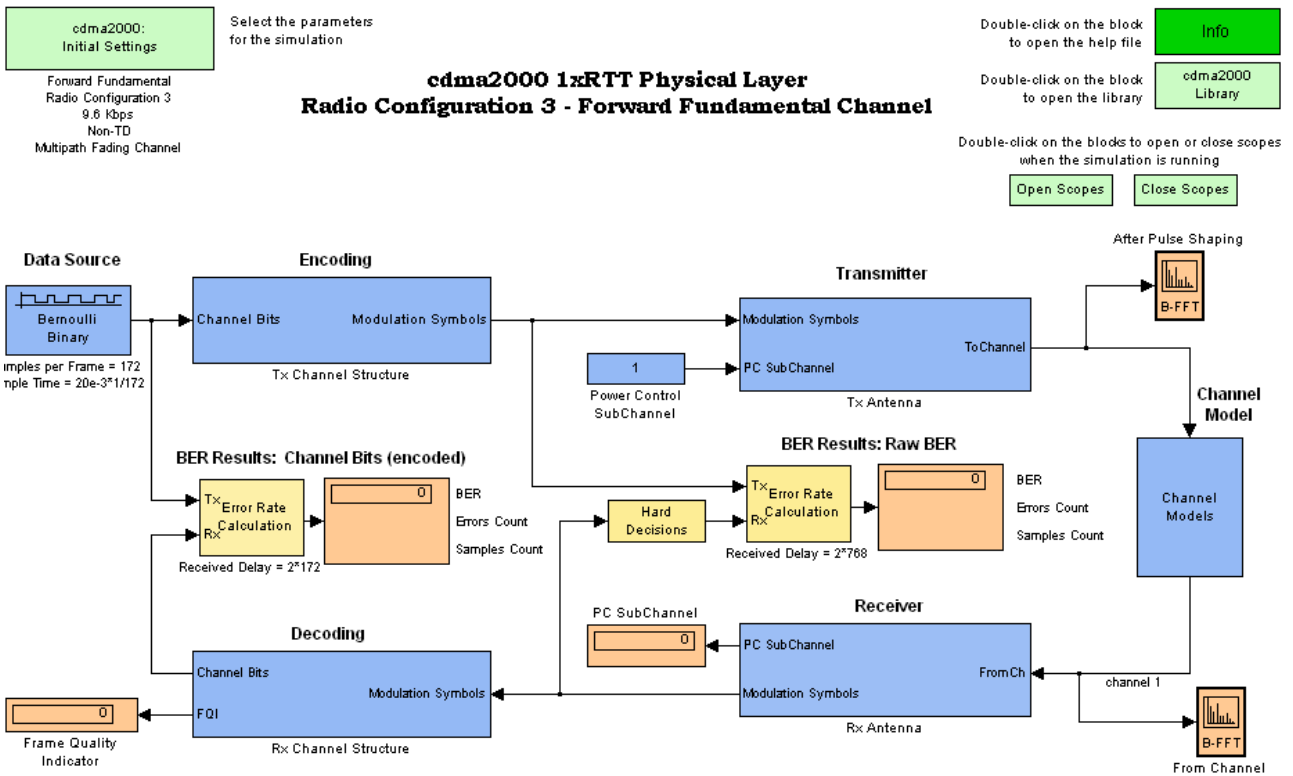


Нижче приведена одна з таких бібліотек.

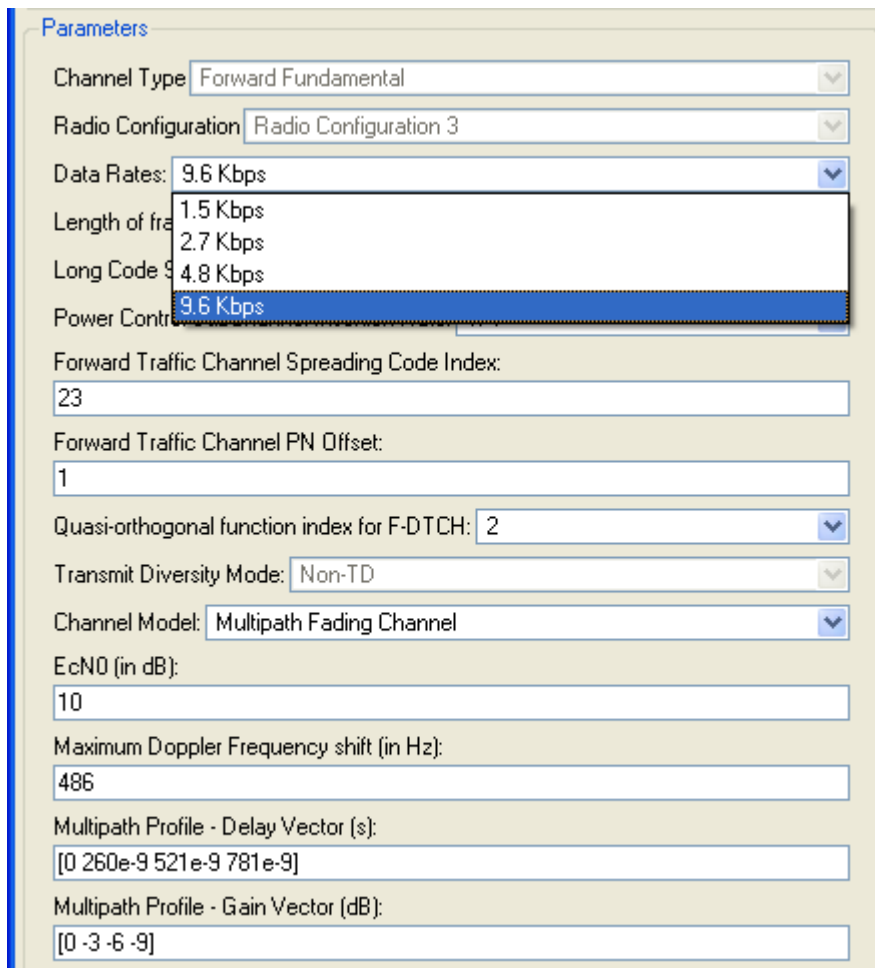


4.3. Модель системи cdma2000

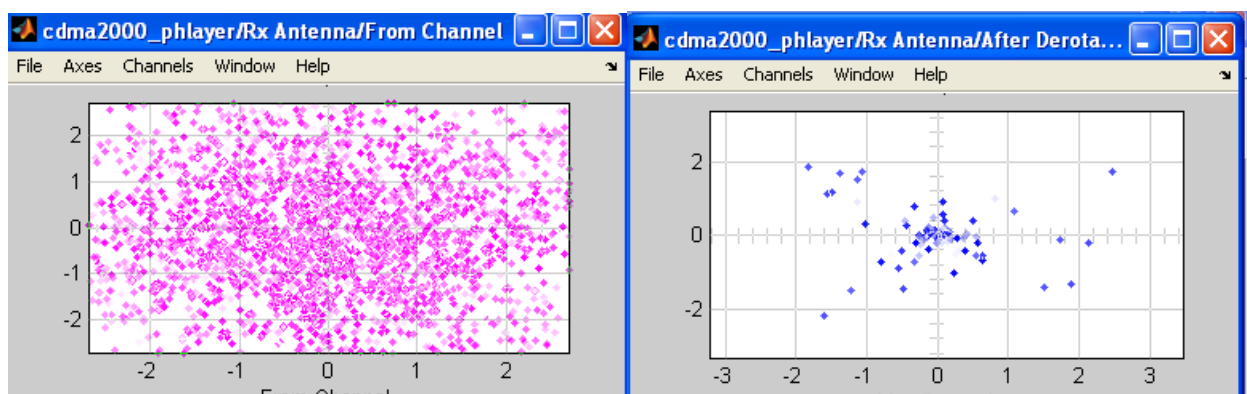
В блоці розширення Communications Blocksets наявна модель системи cdma2000, яка приведена нижче.

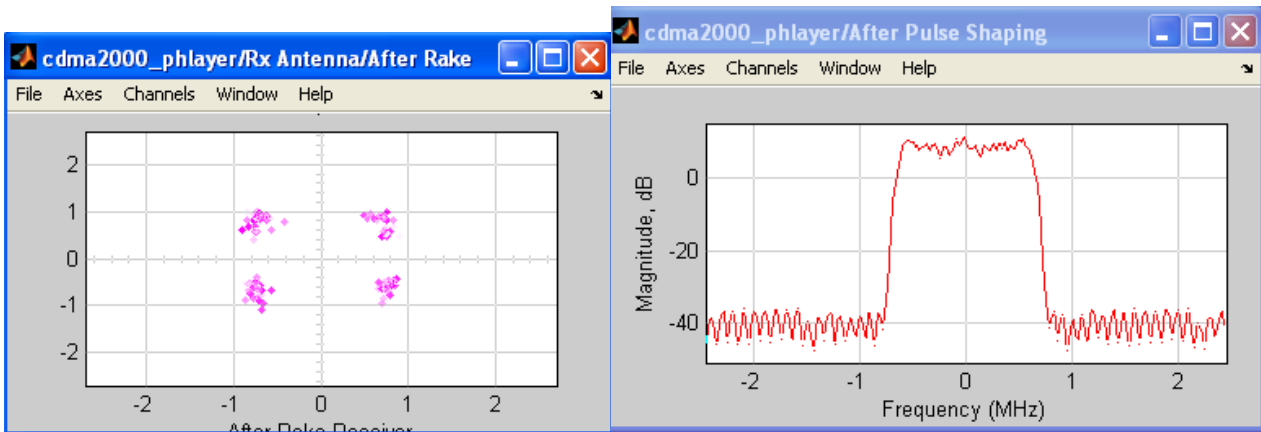


В даній моделі приведено окремий блок, в якому можна задавати параметри для моделювання. Нижче приведено приклад вибору швидкостей передачі.

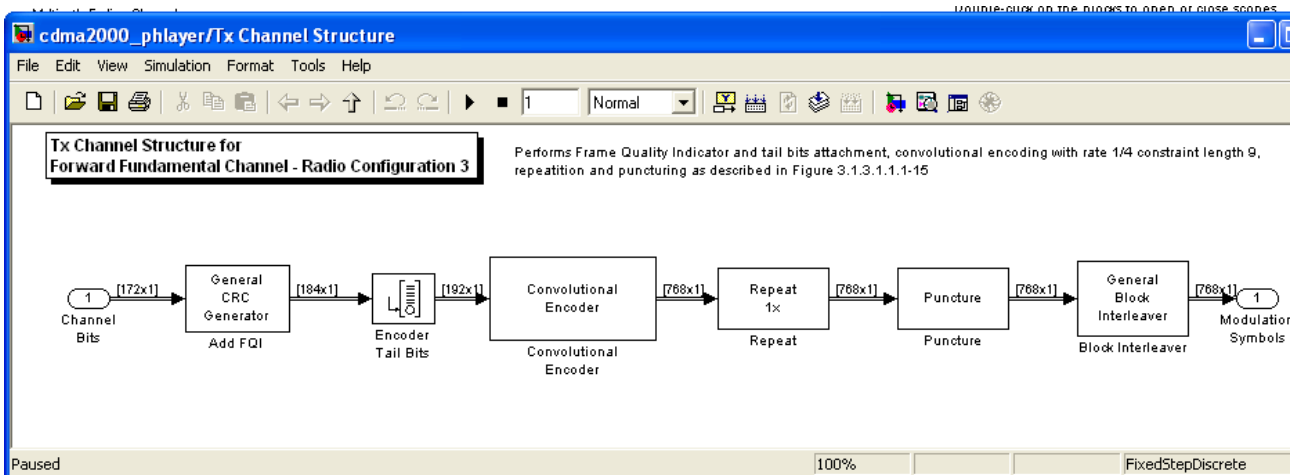


Аналогічно, як і в попередніх моделях, можна подивитись осцилограми в різних точках моделі.



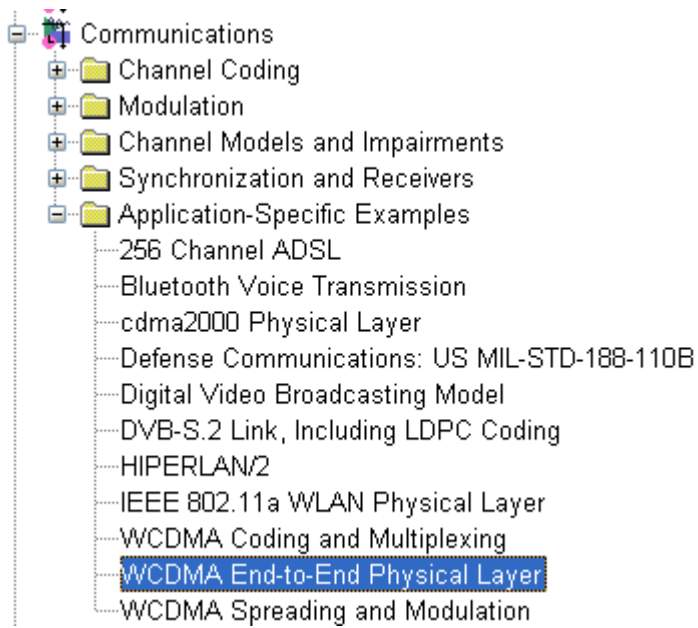


Також можна більш детально подивитись структуру окремих блоків, наприклад, передавача.

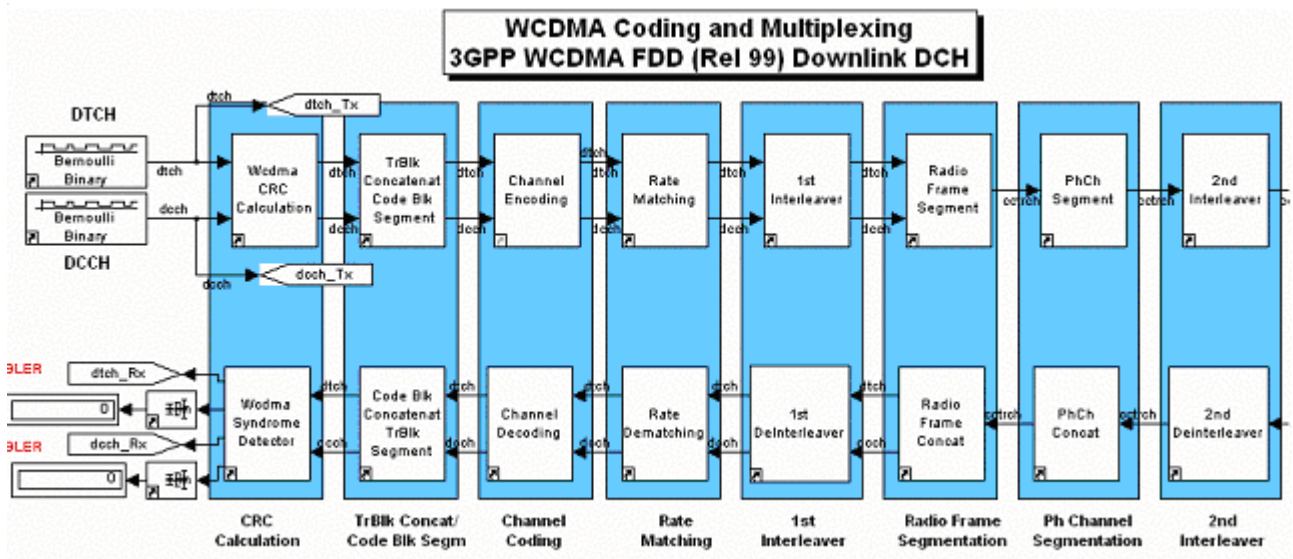


4.4. Моделі системи WCDMA

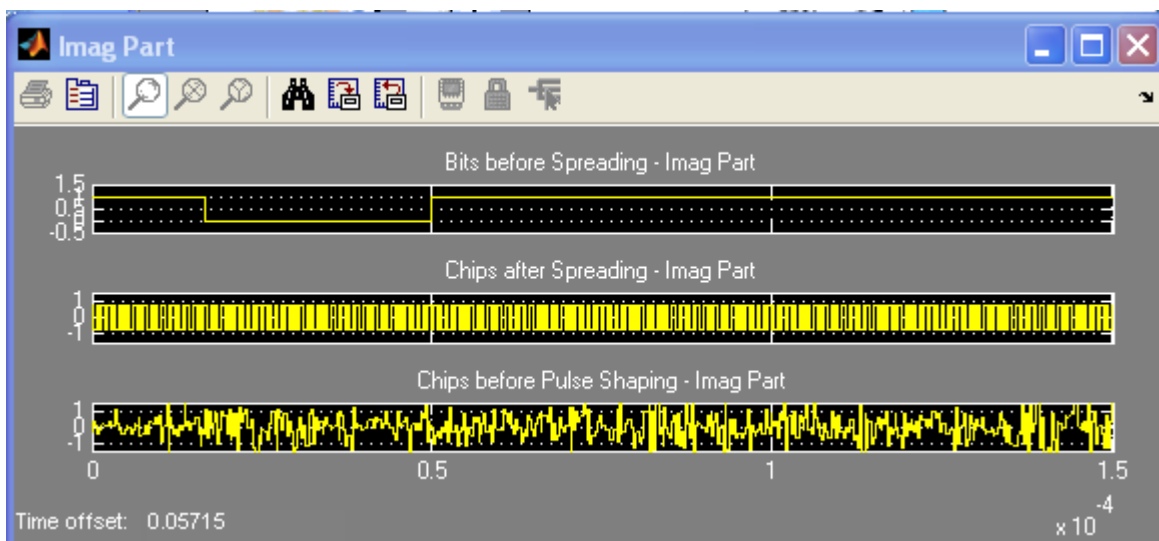
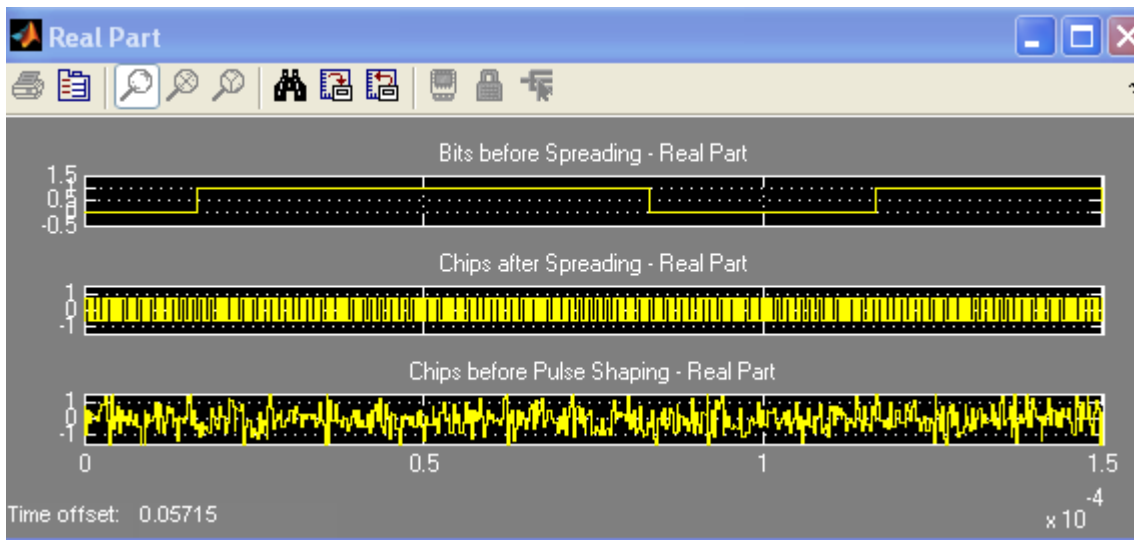
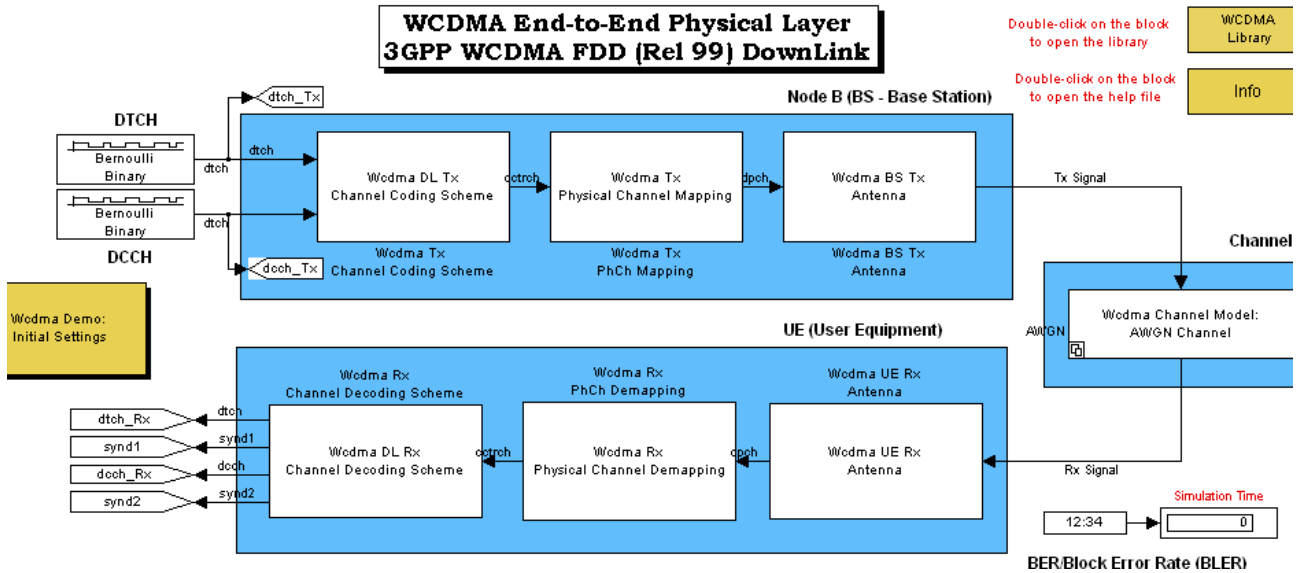
В блоці розширення Communications Blocksets наявні три моделі системи WCDMA.

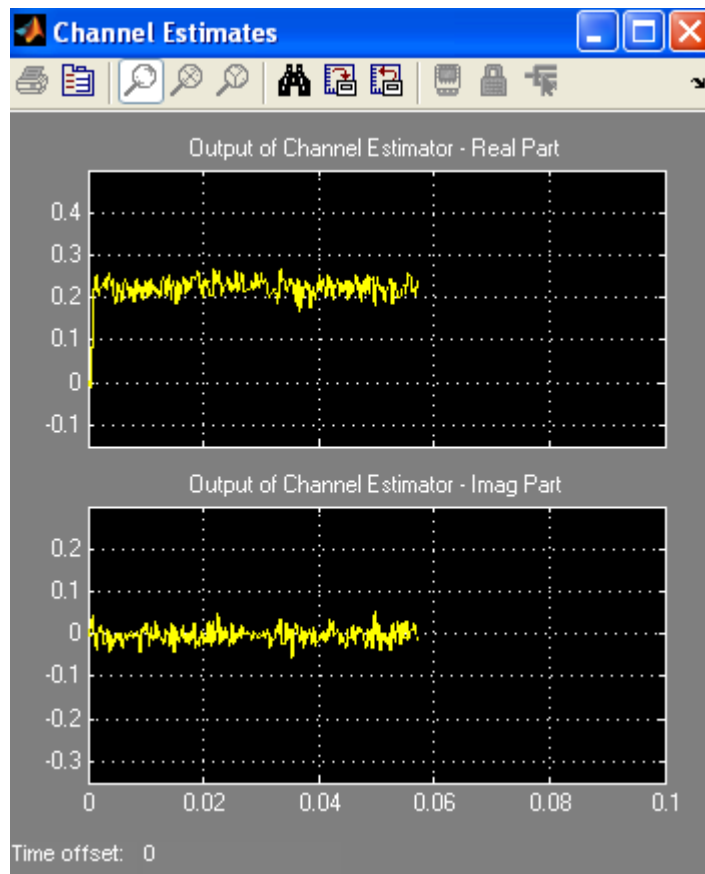


Нижче приведена кожна з трьох моделей та осцилограми до одної з моделей.



WCDMA End-to-End Physical Layer 3GPP WCDMA FDD (Rel 99) DownLink





Частина 2.
Системи коміркового зв'язку

5. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ КОМІРКОВИХ МЕРЕЖ GSM

Коміркові мережі (англ. Cellular Mobile Networks), це мережі, що сьогодні найбільш динамічно розвиваються. Ця телекомунікаційна техніка дозволяє задовольнити комунікаційні потреби людини на землі навіть під час руху. В недалекому майбутньому передбачається, що коміркові мережі дозволять повну персоніфікацію телекомунікаційних послуг. У світі вже виникають *мережі персонального зв'язку* (англ. Personal Communication Networks). Разом з багатьма іншими техніками мобільного зв'язку, що використовують радіоканал, як середовище для передачі інформації, громадські коміркові мережі становлять предмет зацікавлень мобільного наземного радіозв'язку.

За міжнародними оцінками до 1985 року розвиток різних типів телекомунікаційних послуг в мобільному наземному радіозв'язку запізнювався, що найменше, на десять років в порівнянні з послугами, що надавалися за допомогою систем стаціонарної телекомунікації. Цей стан відносився навіть до розвинутих країн, таких як США, Японія, Західна Європа та скандинавські країни. Тільки невелика кількість власників автомобілів цих країн мали під час руху доступ до громадської телефонної мережі. Ситуація діаметрально змінилася під час впровадження до експлуатації перших коміркових систем. До кінця вісімдесятих років в Європі і США інстальовано коміркові мережі з передачею аналогових сигналів в розмовному каналі в смугах 450 МГц і 900 МГц. Перші громадські коміркові мережі впроваджено на початку вісімдесятих років в Скандинавії, Великій Британії та в США, а від другої половини вісімдесятих розпочався розвиток коміркових мереж другої генерації з передачею цифрових сигналів в розмовному каналі в смугах 900 МГц і 1800 МГц. Серед них американська система ADC (англ. American TDMA Digital Cellular system), японський стандарт JDC (англ. Japanese Digital Cellular standard) і європейський стандарт GSM/DCS (англ. Europe's digital Global Standard for Mobile telephony/ Digital Cellular System). Однак до цієї пори,

виходячи із кількості абонентів, що обслуговуються системами, переважають аналогові системи. Передбачається, що коміркові мережі з цифровими методами передачі сигналів будуть домінувати лише після 2000 року (рис.5.1).

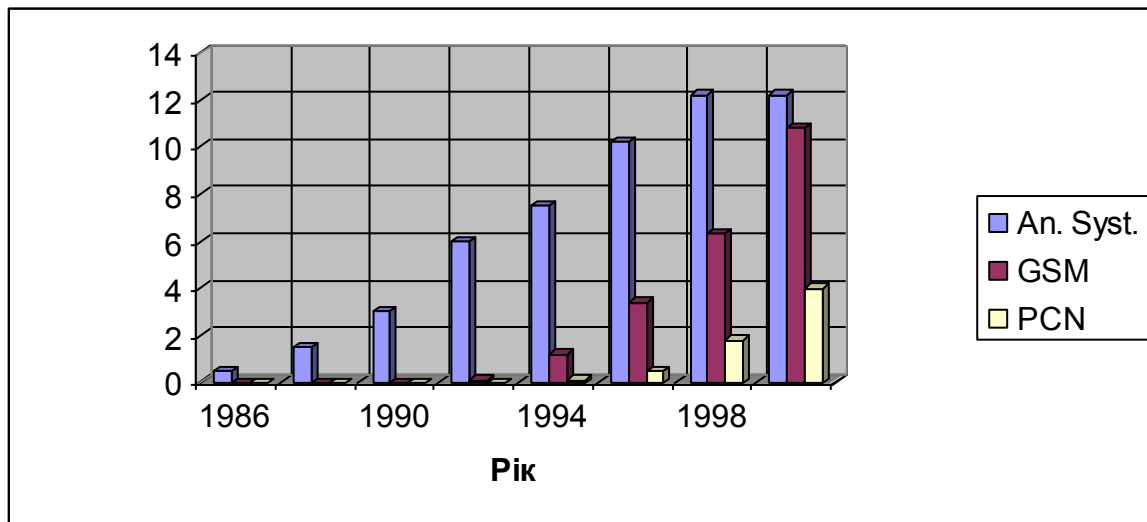


Рис.5.1 Стан розвитку коміркових мереж в Європі в 1986-2000 роках

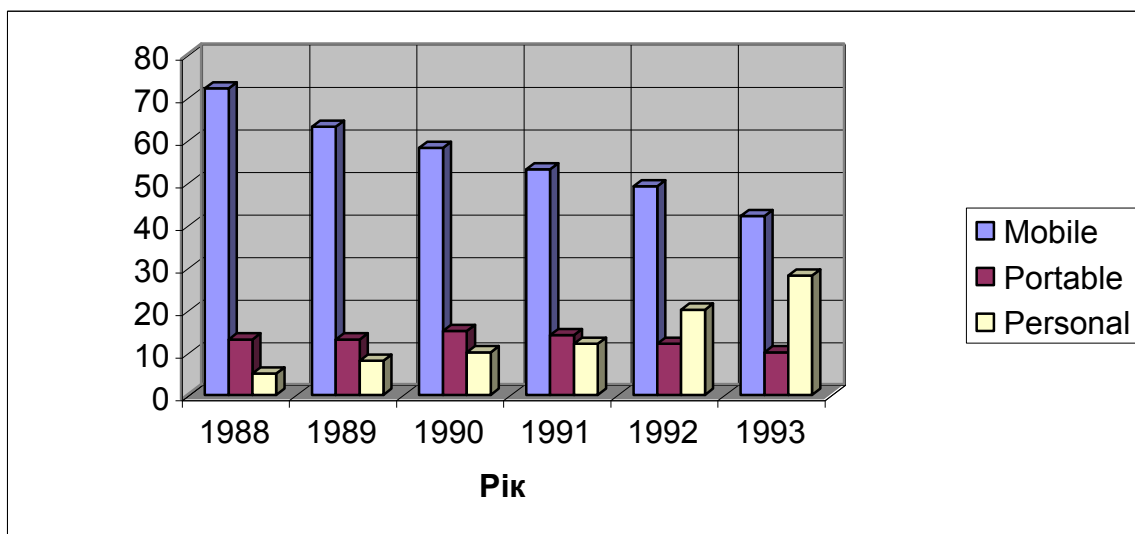


Рис.5.2 Співвідношення наявного мобільного обладнання

В Європі під кінець 1988 року біля 1,5 млн. абонентів використовували послуги коміркових мереж. В 1992 році кількість абонентів зросла до 6 млн., чи на 300%. Такою динамікою приросту числа нових абонентів не може похвалитися ніяка інша система телекомунікації на світі.

До 1980 року серед головних стримуючих причин розвитку мобільних систем радіокомунікацій можна назвати такі:

- брак технічних можливостей для утворення постійних абонентських ліній на основі радіоканалу;
- обмеження числа радіоканалів, що виділені для мобільних систем зв'язку;
- низька якість передачі сигналів в радіоканалах.

Згадані перепони були подолані у 80-х роках в мобільних наземних системах нової генерації, що отримали назву *коміркові мережі*. Однак такий динамічний розвиток коміркових мереж не був би можливим без появи на телекомунікаційному ринку швидких, багатофункціональних мікропроцесорів і мікроелектронних пристроїв із великою ступінню інтеграції.

У світі сьогодні проводяться дуже інтенсивні дослідження, що спрямовані на створення можливості надання ще ширших послуг при зменшенні коштів на створення і експлуатацію обладнання, що входить до складу системи, а також здешевлення абонентського обладнання.

5.1. Коротка історична довідка

Вже перші спроби встановлення зв'язку за допомогою радіохвиль вказували на природній спосіб зв'язку між об'єктами, коли хоча б один знаходиться в русі. У 1887 році відомий італієць, один із творців радіо, Guglielmo Marconi встановив радіозв'язок із морським буксиром на відстані 29 км. Під час Першої світової війни були проведені несміливі спроби встановлення за допомогою радіохвиль зв'язку між рухомими об'єктами.

Перша система радіотелефонного зв'язку з наземними рухомими об'єктами була впроваджена в 1921 році в Детройті (США). Вона дозволяла встановлювати зв'язок між автомобілями поліції цього міста. Подібна система була введена в експлуатацію в 1932 році в Нью-Йорку. Обидві системи працювали в діапазоні до 2 МГц. У 1933 році Федеральна комісія зв'язку (англ. Federal Communications Commission -USA FCC) розпочала експерименти із встановлення радіозв'язку в чотирьох каналах смуги 30-40 МГц. І в 1938 році

було прийняте рішення про можливість використання цієї смуги частот на території США. Друга світова війна затримала подальший розвиток мобільних систем, але принесла значні досягнення в освоєнні вищих частотних діапазонів. В 1945 році в лабораторіях Белла було розпочато експериментальні дослідження над створенням мобільних систем в діапазоні 150 МГц. Коли в 1946 році FCC виділила частоти 35 МГц і 150 МГц для мобільного зв'язку, Белл розпочав масове виробництво відповідної апаратури. Він створив дві системи мобільного зв'язку, одну в Грін Бей біля озера Мічіган (штат Вісконсін) в смузі 35 МГц, а другу в Сент Луїсі (штат Міссурі) в смузі 150 МГц. Ці системи працювали в сімплексному режимі, а виклик абонента відбувався за допомогою оператора, що знаходився на базовій станції. У діапазоні 150 МГц було використано 3 радіоканали із шириною смуги 60 кГц кожний. Абонент повинен був шукати вільний канал за допомогою ручки настроювання свого приймача, намагаючись подати сигнал виклику на базову станцію. Такий самий тип послуг, але в дуплексному режимі і за допомогою 12 каналів, кожний із смугою 30 кГц, було впроваджено у 1956 році у діапазоні 450 МГц. Від тієї пори всі роботи йшли в напрямку вдосконалення якості послуг і освоєння вищих частотних діапазонів. У 1964 році Белл створив нову систему мобільного зв'язку в смузі 150 МГц, що отримала назву IMTS (англ. Improved Mobile Telephone Service) версії МК, яка працювала в дуплексному режимі з автоматичним пошуком вільних радіоканалів. В 1969 році з'явилася нова версія дуплексної системи IMTS версії MJ з автоматичним пошуком каналів в смузі 450 МГц і з кращими параметрами передачі. До 1970 року послугами таких систем вже користувалися 800 тис. абонентів, а автомобілів у США на той час було близько 100 млн.

Різкий брак вільних радіоканалів призвів до того, що вже в шестидесятих роках у США було розпочато роботу над новою мережею наземної мобільної радіокомунікації, що пізніше отримала назву *коміркової*. Визнаючи величезне значення для народного господарства мобільного зв'язку, у 1970 році FCC прийняла рішення про перепризначення деяких частотних діапазонів, зокрема

призначених для телебачення. Так сумарна смуга частот в 115 МГц була виділена між 806 МГц і 947 МГц для мобільного зв'язку. Від цього часу у США з великим піднесенням почалися пошукові роботи, що закінчилися створенням декількох різних коміркових систем. Найкращою виявилася система, що була створена фірмою Bell American Telephone and Telegraph Company. Вона отримала назву AMPS (англ. Advanced Mobile Phone Service). В проектуванні AMPS став в пригоді досвід, що був отриманий AT&T за час експлуатації мережі 1MTS, яка була збудована у 1964-1969 роках. Досвід показував, що збільшення телефонних розмов відбувається, як правило, в центральній частині великих міст і господарських центрів, на відносно невеликій території. Намагаючись задовольнити такі потреби, маючи невелику кількість радіоканалів, було прийнято рішення про зменшення радіуса дії базових станцій до таких розмірів, щоб кожний радіоканал міг бути використаний багаторазово на території, що обслуговується системою. В кінцевому результаті була створена така мережа, яка складалася з базових станцій малого радіуса дії і отримала назву *коміркової*.

Перший, істотний принцип, що був закладений в системах нової генерації, на фоні інших, що до цього часу експлуатувалися, полягав у тому, що з'явилися базові станції з суттєво різними радіусами дії. Радіус дії, в цьому випадку, обернено пропорційний до щільності трафіку (рис. 5.3).

Другий принцип коміркової мережі виникає з можливості розбудови і пов'язаний з різною кількістю абонентів і тим самим кількістю розмов, що відбуваються на даній території. Території з великою щільністю трафіку можуть з часом переміщуватися з одного району в інший. Для того коміркову мережу було замислено так, щоб можна було адаптувати її до нових, змінених умов без необхідності збільшення числа радіоканалів. Мережа набула можливості природної розбудови на старих територіях, а щільність трафіку стала значно перевищувати її попередні можливості (рис. 5.4).

Адаптування мережі до нових вимог трафіку полягає у впровадженні до неї нових базових станцій із меншим радіусом дії при одночасному обмеженні

радіуса дії старих.

Третій принцип побудови коміркових мереж полягав у тому, що з часом до мережі можна було впровадити нові базові станції із малим радіусом дії. Поява в мережі комірок із все меншими розмірами тягне за собою значний зріст імовірності встановлення телефонних розмов, що тривають довше ніж час перебування рухомого абонента в зоні дії однієї базової станції (рис. 5.5).

Тим самим, мережа повинна була б автоматично перемикає один раз почату телефонну розмову з однієї базової станції до іншої без переривання розмови.

Всі ці принципи, що є істотними для сучасних радіотелекомунікаційних мобільних систем, були притаманні системі AMPS фірми AT&T.

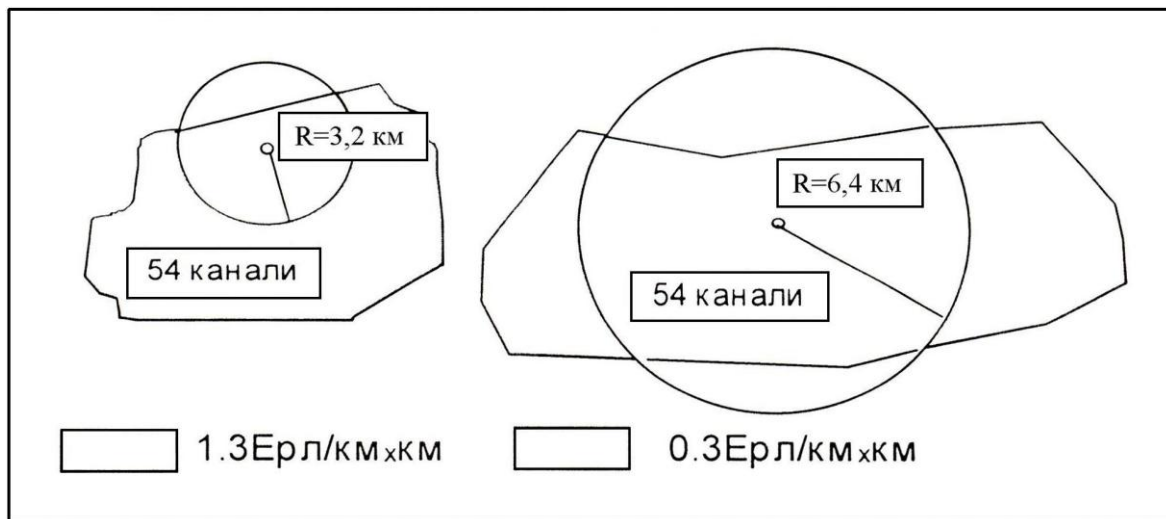


Рис.5.3 Перший принцип побудови коміркової мережі – обернена залежність радіуса дії від щільності трафіку

Після опрацювання концепції системи концерн Белла розпочав клопотання на отримання дозволу на побудову і експлуатацію її в межах США. При цьому домагалося визнати право на використання 666 дуплексних радіоканалів в смузі 806 до 947 МГц. Такі монополістичні домагання зустріли великий опір зі сторони американських фірм, що виготовляли радіообладнання (наприклад, Motorola, Western Electric та інші).

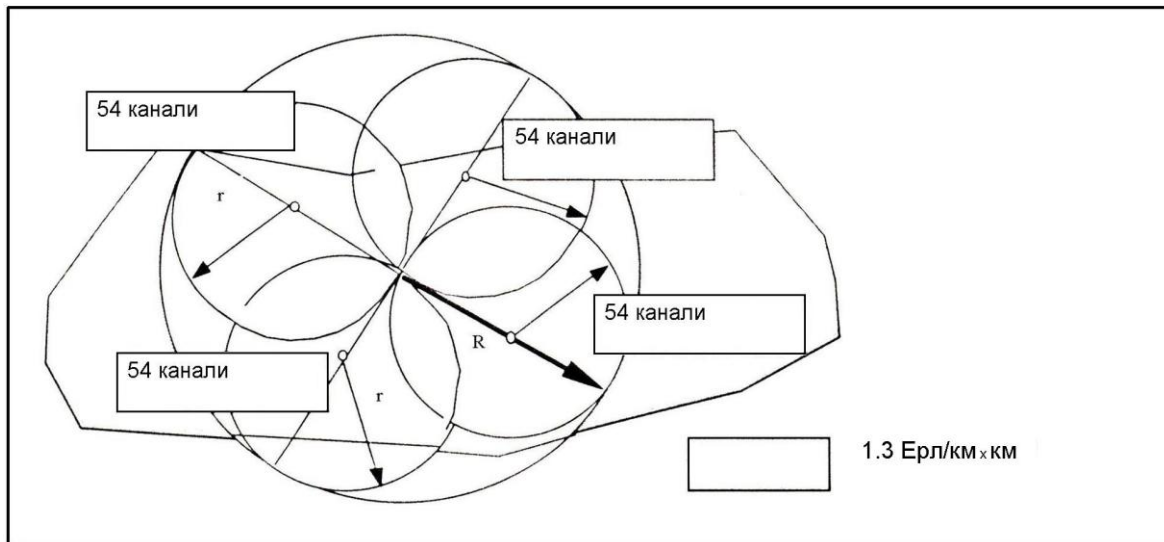


Рис.5.4 Другий принцип побудови коміркової мережі – заміна старих базових станцій більшою кількістю нових, із меншим радіусом дії

Суперечка тривала декілька років і закінчилася розділом концерну Белла на декілька незалежних виробництв. Роздібнено не тільки фірми, що виробляли обладнання, але і ті, що надавали послуги в галузі мобільного зв'язку. AT&T змушено зробити систему AMPS, як комерційну систему, доступною для всіх. Виділену кількість радіоканалів 666, а потім 834, було розділено на 333 і 417 відповідно. Дозвіл на побудову мобільної мережі в США отримало дві конкуруючі між собою фірми. У випадку більшої кількості бажаючих, вибір проводився на основі жеребкування. Дотримувалися правила, що одна з фірм змушена була спеціалізуватися на провідному зв'язку, а друга на радіозв'язку. Кожна з фірм отримала по 333 (417) радіоканалів. На фірми було покладено обов'язок забезпечення послуг всім бажаючим, що зголосяться, аж до насичення системи. Фірми, що надавали послуги, не мали права бути пов'язаними з фірмами, що виробляли обладнання. Виробникам були створені можливості повної конкуренції, надаючи їм всі параметри системи AMPS, забезпечуючи повну співпрацю обладнання із заданою якістю передачі. Все це привело до дуже швидкого розвитку коміркової мережі на території США.

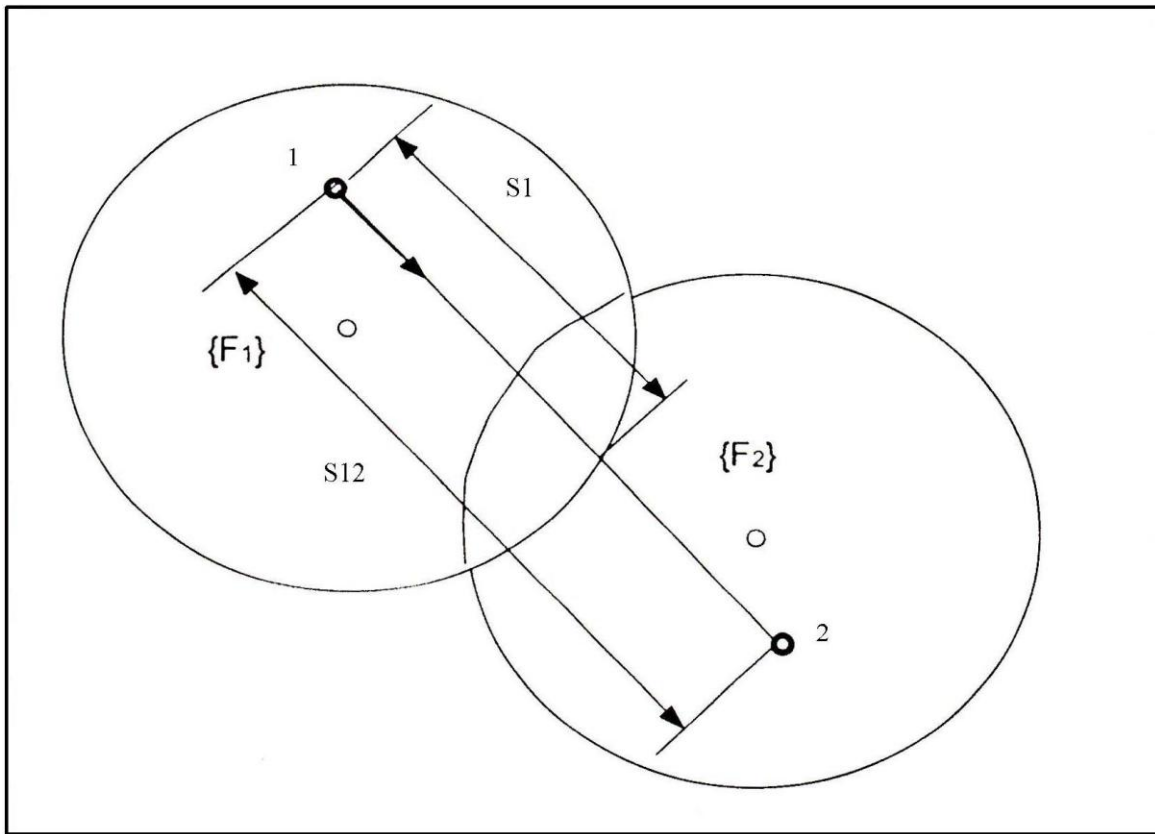


Рис.5.5 Третій принцип побудови коміркової мережі – перемикання розмов при перетині межі зони дії базової станції

Радіус дії комірки R[км]	Середнє число перемикань розмов
16 – 24	0.2
3.2 – 8.0	1 – 2
1.6 – 3.2	3 – 4

% перемикань в комірці з R=16 км	Середній час тривання розмови, хв
11.3	1.76
18.0	3
42.6	6
59.3	9

В таблиці 5.1 наведені основні технічні дані системи AMPS.

Виробництвом стаціонарного обладнання зайнялося декілька фірм, а мобільним обладнанням кілька десятків. Гостра конкуренція на ринку мобільного обладнання привела до постійного зниження їх цін. За даними з кінця сімдесятих років мобільне обладнання коштувало близько 300\$.

Про популярність системи AMPS може засвідчити той факт, що її використовували в багатьох країнах, наприклад в: Канаді, Австралії, Новій Зеландії, Південній Кореї, Сінгапурі, Гонконгу, на Філіппінах, Гаїті, Бразилії, Чилі, Аргентині, Перу, Венесуелі, Еквадорі, Таїланді.

5.2. Елементи коміркової мережі

На рис. 5.6 представлено спрощену схему коміркової мережі загального користування.

Її утворюють такі елементи:

- група мобільних станцій МС (англ. Mobile Telephone-MT, Mobile Station- MS, Mobile Unit-MU);
- група базових станцій БС (англ. Cell Site-CS, Base Station-BS);
- група територіальних комутаційних станцій МАТС (англ. Mobile Telecommunications Switching Office - MTSO, Mobile Services Switching Centre - MSC);
- радіоканали: мовні і для виклику;
- кабельні лінії: телефонні і для швидкої передачі даних.

Таблиця 5.1

Радіоканали і частотні діапазони	
Мобільна станція – базова	825 – 845 МГц
Базова станція – мобільна	870 – 890 МГц
Дуплексний відступ	45 МГц
Міжканальний відступ	30 МГц
Модуляція в розмовному каналі	ЧМ

Максимальна девіація частоти	12 кГц
Номери розмовних каналів	A: 1-312; B: 355 – 666
Номери викличних каналів	A: 313 – 333; B: 334 – 354
Система сигналізації	
Частотні сигнали встановлення зв'язку	SAT1=5.97 кГц; SAT2=6 кГц; SAT3=6.03 кГц
Частотні сигнали роз'єднання зв'язку	ST=10 кГц
Система керування і контролю	
Модуляція	FSK
Код передачі	Манчестер
Швидкість передачі	10 кбіт/с
Надлишковий код	BCH
Поверхневі структури	
Макс. радіус гексагональної комірки	12.8 км
Мінім. радіус гексагональної комірки	1.6 км
Число комірок в ансамблі для секторних антен	7
Число комірок в ансамблі для ненапрямлених антен	12
Потужність передавачів	
Базова станція	40 Вт
Мобільна станція	6.3 – 10 Вт

Більшість мобільних станцій, що працюють в коміркових мережах, це станції, які змонтовані на транспортних засобах і на плавзасобах. Зустрічаються також і переносні станції і персональні, що обладнані передавачами з меншою передавальною потужністю, а отже і меншим радіусом дії. На рис. 5.2

представлено процентне співвідношення різноманітного мобільного обладнання, яке використовується в Європі.

В регіонах з малою щільністю рухомих абонентів коміркова мережа може використовуватися для обслуговування стаціонарних абонентів.

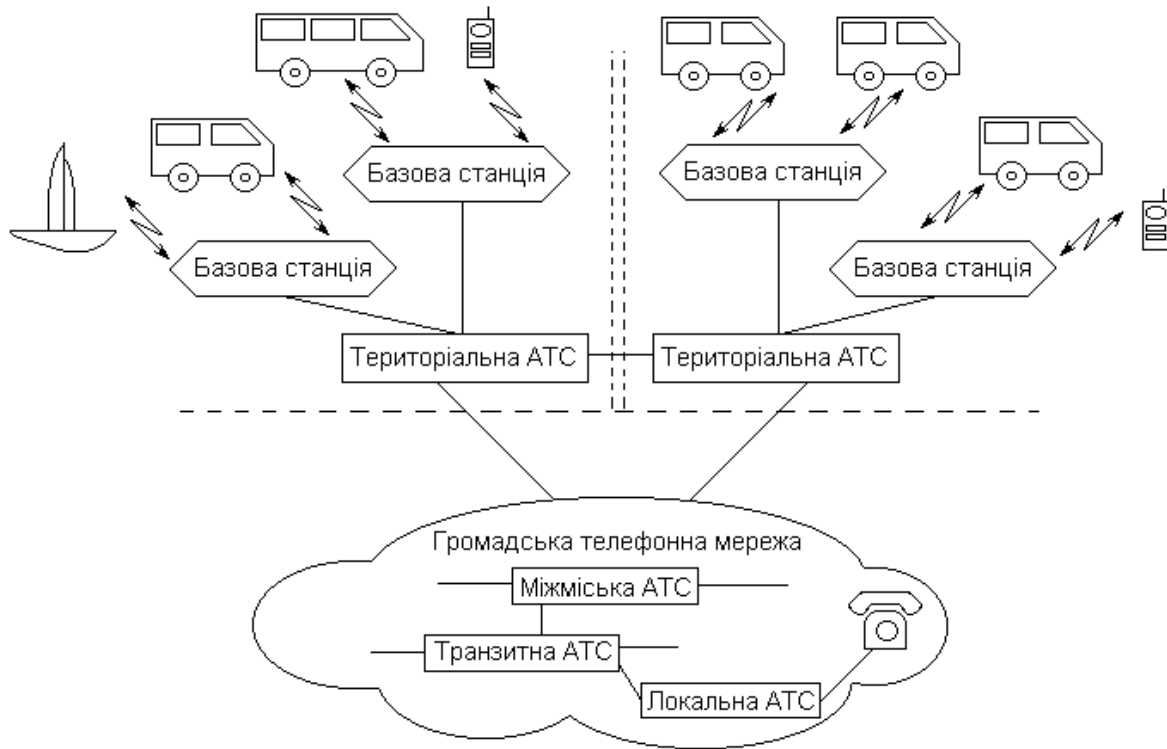


Рис.5.6 Блок-схема громадської коміркової мережі.

Кожна телефонна розмова, що згенерована на мобільній станції, проводиться за допомогою відповідної базової станції. Це вимагає резервування на базовій станції одного дуплексного радіоканалу і відповідного приймально-передавального обладнання. Тому на базовій станції є стільки приймально-передавальних комплектів, скільки дуплексних розмовних каналів їй виділено. Іншими словами, кожному дуплексному радіоканалу відповідає не менше одного комплекту приймально-передавального обладнання. Крім цього базова станція повинна мати принаймні один передавач, що повинен працювати без перерви на спеціально виділеному радіоканалі. Це передавач для виклику (англ. *foreward setup channel*). Така робота носить назву «робота вниз». Повинен також бути щонайменше один приймач, що має працювати в режимі прослуховування

(англ. revers setup channel). Це робота “вверх”. Крім цього на базовій станції повинен бути комплект вимірювальних приймачів, які мають працювати в багатьох радіоканалах і забезпечувати роботу приймально-передавального комплексу.

Всі базові станції розташовуються на виділеній адміністративній території коміркової мережі - MSA (англ. Mobile Service Area), яка має зв'язок із телефонною мережею загального користування - PSTN (англ. Public Switched Telephone Network). В комірковій мережі може використовуватися одна або більше територіальних MATC. Вони з'єднані між собою виділеними лініями швидкої передачі даних або використовують існуючу телефонну мережу. Кожна територіальна MATC з'єднана з однієї сторони з підпорядкованими їй базовими станціями, а з другої з телефонною мережею загального користування.

5.3. Обслуговування абонентів

В комірковій мережі рухомий абонент, на відміну від абонента громадської телефонної мережі, не використовує власну абонентську лінію. Він може тільки використовувати групу радіоканалів даної комірки. Базова станція для абонента становить вузол доступу до радіоканалів. Кожний абонент коміркової мережі постійно приписаний до однієї територіальної MATC, що для нього є материнською. Під час руху по всій території, що обслуговується мережею, абонент повинен мати впевненість у тривалому наданні всіх послуг. Тому система повинна вміти локалізувати абонента.

5.3.1. Локалізація рухомого абонента

Локалізаційні проблеми, що пов'язані із визначенням місцезнаходження абонента на визначеній території мережі, починаються з моменту входження абонента в зону дії довільної базової станції. Входження абонента до мережі можна ототожнити з першим ввімкненням мобільного обладнання. На рис. 5.7 представлений алгоритм роботи системи при локалізації абонента. З моменту

появи в мережі абонента з конкретним ідентифікаційним номером, його приймач мобільної станції MSx розпочинає автоматичний пошук всіх викличних каналів і вибирає той, що має найбільшу потужність сигналу. Відбувається це за допомогою простих вимірів рівня в приймачі мобільної станції. У знайденому викличному каналі передаються, через рівні проміжки часу, ідентифікаційні сигнали базової станції BSc. Мобільна станція, приймаючи ці сигнали, автоматично вмикає передавач і за допомогою каналу для оголошень, що пов'язаний із викличним, передає свій ідентифікаційний номер на базову станцію BSc, яка у свою чергу надсилає його до своєї територіальної MATC - MSCz. В цій MATC номер мобільної станції порівнюється з реєстраційними номерами абонентів, для яких дана MATC є материнською.

У випадку співпадіння (англ. home mobile) до відповідного реєстру вписується номер базової станції, в зоні дії якої знаходиться абонент. Якщо ж номер абонента у реєстрі не фігурує, то разом з номером базової станції, в зоні дії якої він знаходиться, його номер вписуються у реєстр мандруючих гостей (англ. roamer). Після цього до материнської MATC цього абонента, що визначається з номера його мобільної станції MSx, по каналах швидкої передачі даних пересилається інформація про його місцезнаходження. Записавши інформацію про локалізацію абонента у відповідних реєстрах його материнської територіальної MATC, до мобільної станції MSx пересилається *сигнал підтвердження*. Цей сигнал по викличному каналу попадає до мобільної станції і призводить в ній вписування ідентифікаційного номера базової станції, в зоні якої він знаходиться і за допомогою якої він зв'язався із територіальною MATC. З цього моменту мобільна станція переходить в стан очікування виклику. В такому стані мобільна станція сама може спробувати встановити телефонний зв'язок.

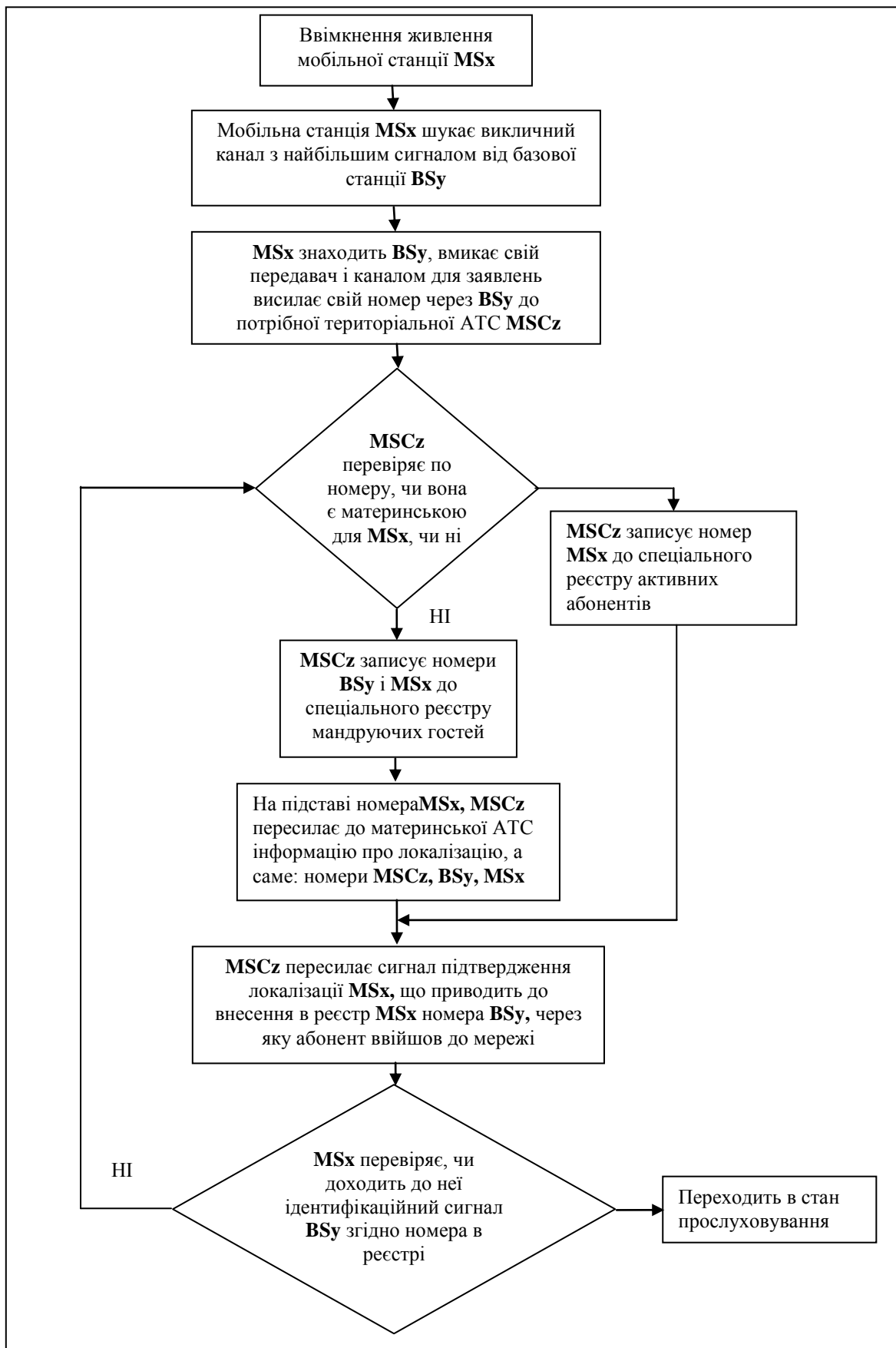


Рис.5.7 Алгоритм локалізації абонента в комірковій мережі.

Цей стан триває стільки, скільки приймається ідентифікаційний сигнал від базової станції, згідно номера, що записаний в реєстрі цієї станції. Іншими словами, цей стан утримується до тих пір, поки мобільна станція знаходиться в зоні дії базової станції BSc. У випадку втрати радіосигналу у викличному каналі, що пов'язував мобільну MSx і базову BSc станції, мобільна станція знову починає шукати викличний канал із найбільшим рівнем сигналу. При цьому, знайшовши новий викличний канал і переконавшись, що прийнятий ідентифікаційний сигнал базової станції не відповідає записаному номеру в реєстрі, мобільна станція автоматично повторює всю процедуру локалізації.

5.3.2. Виклик рухомого абонента телефонної мережі загального користування

В цьому підрозділі прослідкуємо шлях встановлення зв'язку, коли абонент з громадської телефонної мережі хоче провести розмову з рухомим абонентом коміркової мережі. Для простоти приймемо, що рухомий абонент знаходиться в зоні дії материнської територіальної MATC. Цей тип зв'язку має назву *зв'язок, що закінчується у рухомого абонента* (англ. mobile-completed call). Всі операції такого виду зв'язку зображені на рис. 5.8.

Виклик (англ. paging) (рис. 5.8a).

Стаціонарний абонент з телефонної мережі загального користування (ТМЗК) за допомогою своєї локальної АТС висилає виклик до рухомого абонента, з яким хоче розмовляти. Виклик проходить через ТМЗК і направляється до територіальної АТС (MATC), що є материнською для рухомого абонента, якого викликають. Територіальна АТС після отримання номера абонента, що викликається, перетворює його на ідентифікаційний номер того ж абонента, але в комірковій мережі. Далі повідомляє всі базові станції, що їх обслуговує, про пошук рухомого абонента. Базові станції через викличний канал розшукують його, передаючи між ідентифікаційними сигналами додатково сигнал виклику.

Вибір базової станції (англ. cell site selection) (рис. 5.8b). Мобільна станція абонента, якого викликають, після початку виклику вписує до свого реєстру ідентифікаційний номер базової станції, в зоні дії якої він знаходиться, або тієї, що його знайшла.

Відповідь на виклик (англ. page reply) (рис. 5.8c).

Рухома станція через канал оголошень, що був вибраний автоматично, виходячи з найвищого рівня сигналу, пересилає до базової станції підтвердження отримання виклику.

Базова станція по спеціальних, виділених лініях швидкої передачі даних пересилає підтвердження далі до територіальної АТС, що обслуговує дану базову станцію.

Визначення розмовного каналу (англ. channel designation) (рис. 5.8d).

Після отримання підтвердження виклику територіальна АТС вибирає з набору незайнятих радіоканалів, що призначені даній базовій станції, розмовний канал (англ. idle voice channel), який об'єднаний із кабельним зв'язком (англ. associated land-line trunk). Далі до базової станції, від якої отримано підтвердження виклику, пересилається по швидких каналах передачі даних інформацію про номер виділеного дуплексного розмовного каналу. Базова станція через викличний канал інформує про цей факт рухоми станцію викликаного абонента. Мобільна станція автоматично достроюється до виділеного їй розмовного каналу і вмикає свій передавач. Передавач, у свою чергу, висилає по розмовному каналу до базової станції спеціальний тестуючий сигнал - SAT (англ. Supervisory Audio Ton). Базова станція, отримавши сигнал SAT, інформує територіальну АТС про встановлення зв'язку з абонентом у визначеному нею радіоканалі.

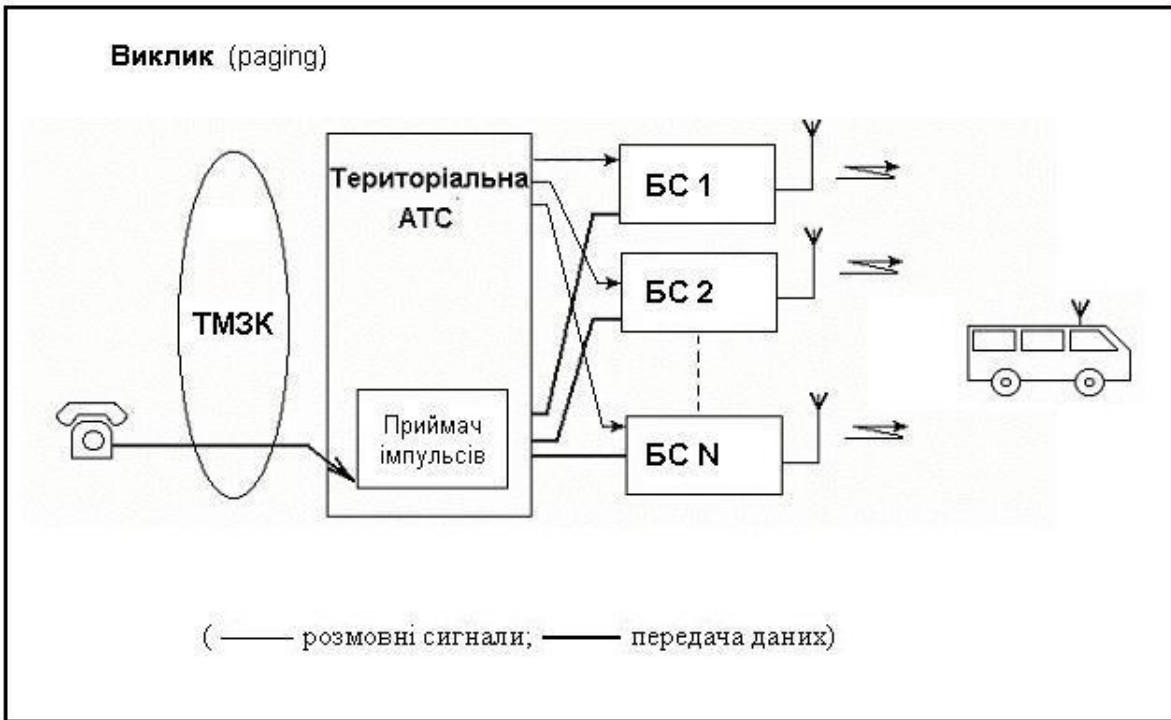


Рис.5.8а Схема виклику рухомого абонента з телефонної мережі загального користування (ТМЗК)

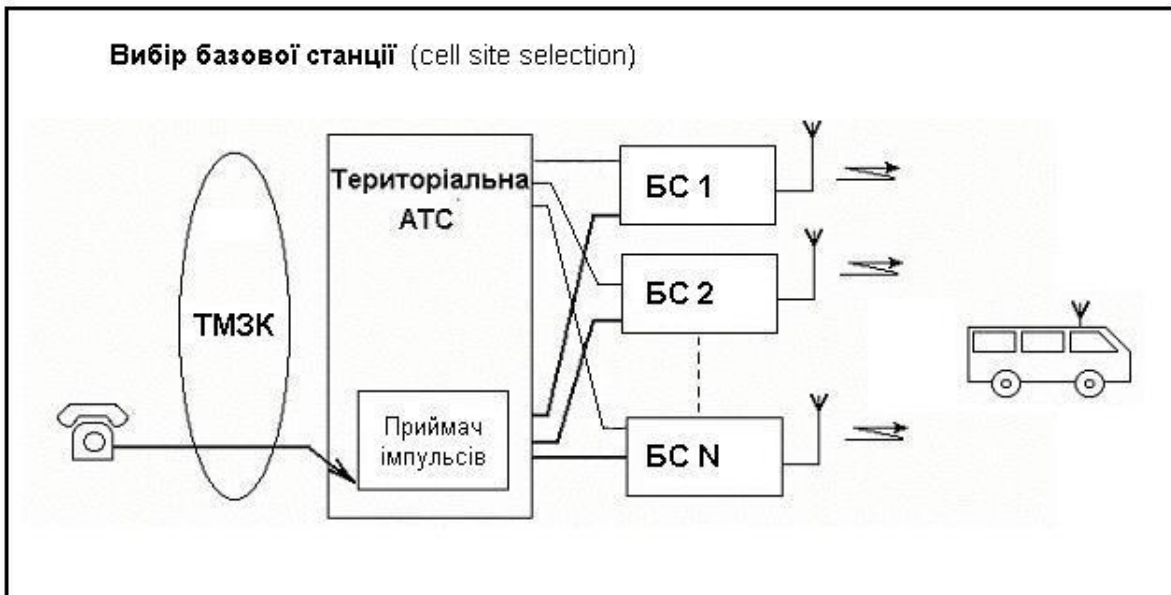


Рис.5.8b Схема вибору базової станції рухомим абонентом

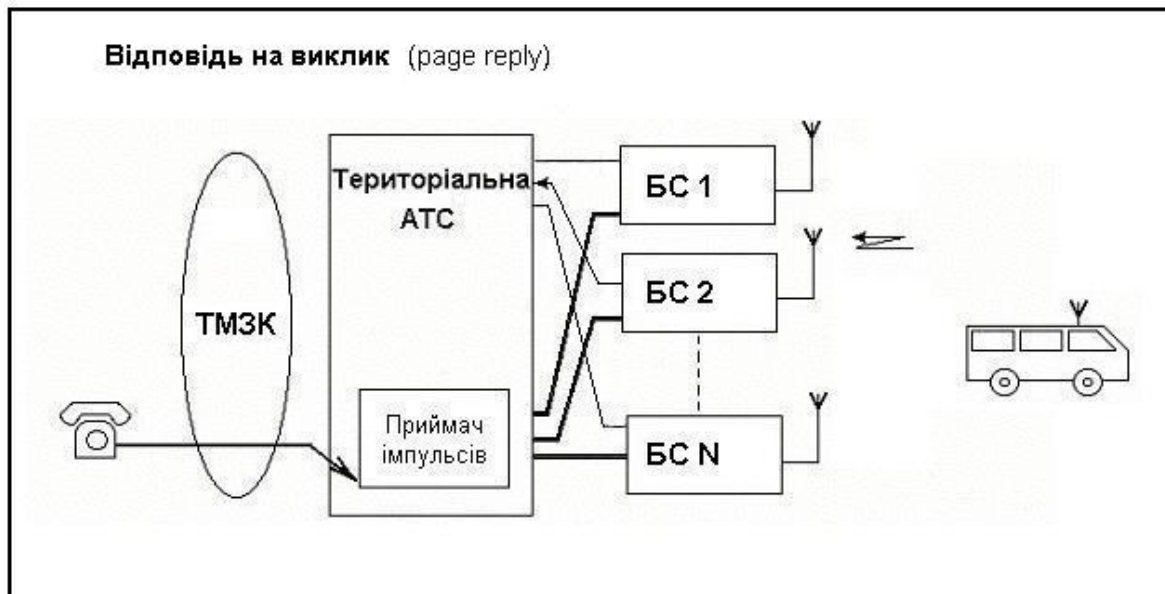


Рис.5.8с Схема відповіді на виклик рухомого абонента з телефонної мережі загального користування

Стан готовності (англ. alerting) (рис. 5.8е).

В цьому моменті, на наказ з територіальної АТС, що обслуговує рухомого абонента, базова станція через розмовний канал вводить передавач абонента в стан готовності, посылаючи сигнал SAT. Він ще раз підтверджує базовій станції стан готовності своїх приймально-передавальних пристроїв до отримання розмови. Таким чином утворюється замкнута дорога для сигналів виклику, що направляються з територіальної АТС до мобільної станції викликаного абонента.

Розмова (англ. talking) (рис. 5.8f).

У рухомого абонента починає лунати дзвінок. В момент, коли абонент підносить телефонну трубку, базова станція інформує територіальну АТС про цей факт, і АТС перестає подавати сигнали виклику (дозвону), створюючи одночасно дорогу для розмовного сигналу.

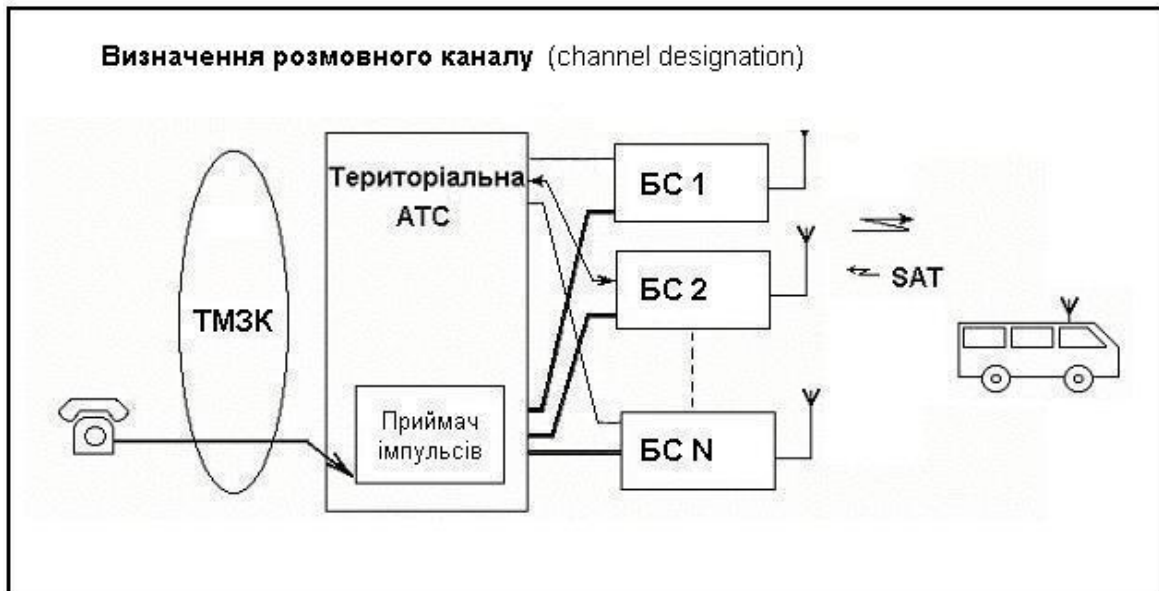


Рис.5.8d Схема визначення розмовного каналу

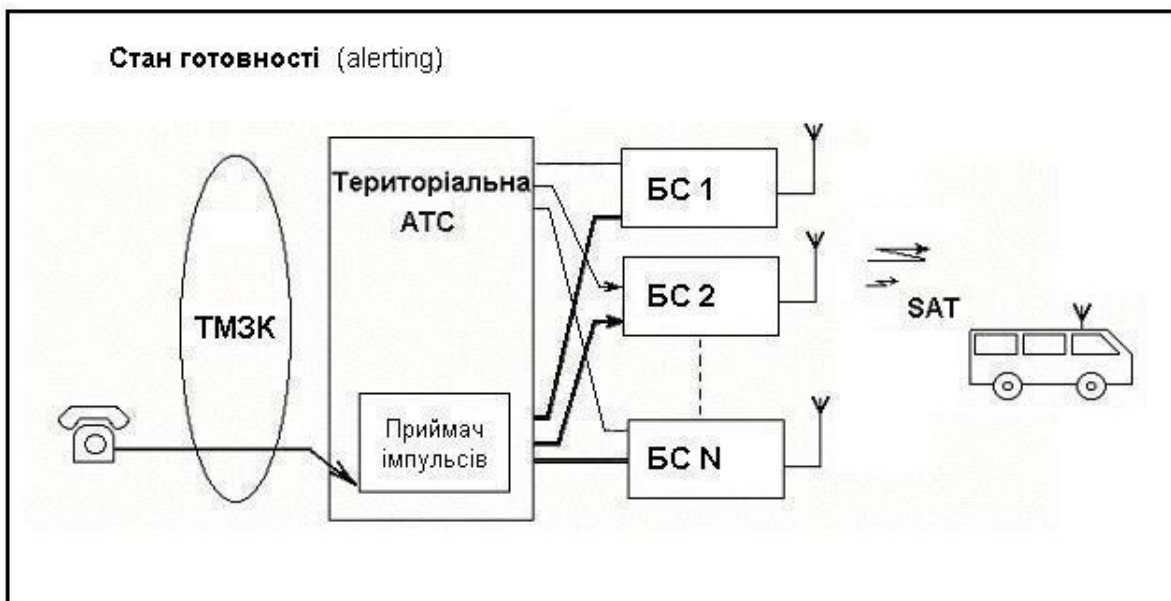


Рис.5.8е Схема встановлення стану готовності

5.3.3. Виклик стаціонарного абонента з коміркової мережі

Розглянемо етапи встановлення зв'язку рухомим абонентом коміркової мережі з стаціонарним абонентом телефонної мережі. Цей тип має назву – *зв'язок, що ініціюється рухомим абонентом* (англ. mobile-originated call). Операції, що пов'язані із таким типом зв'язку, проілюстровані на рис. 5.9.

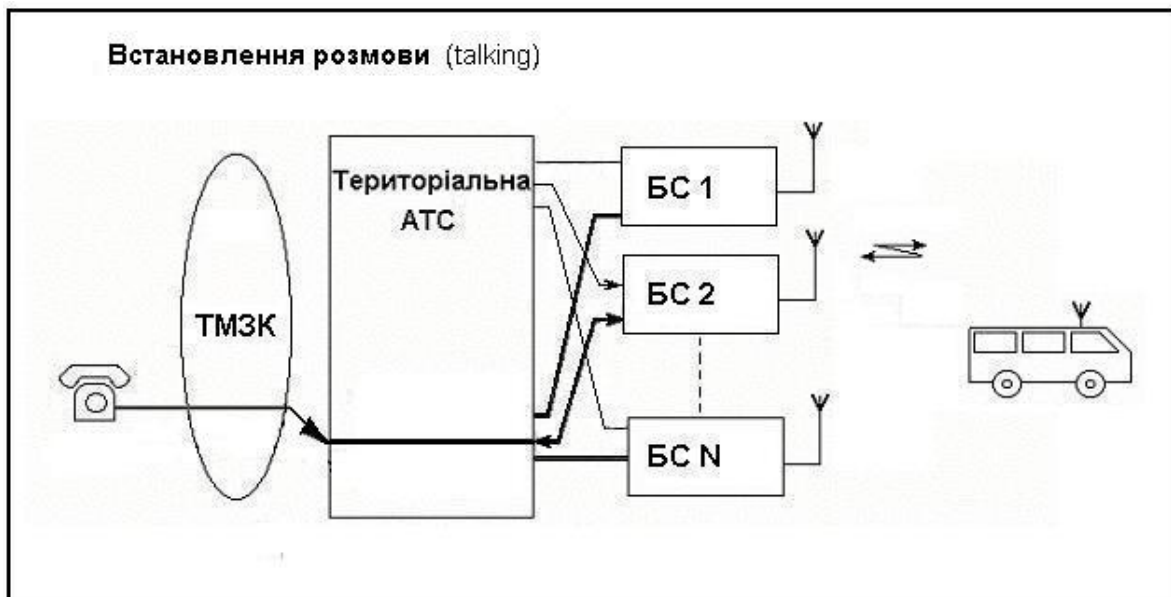


Рис.5.8f Схема встановлення розмови

Вступна ініціатива (англ. prerigination) (рис. 5.9a). Рухомий абонент розпочинає встановлення зв'язку від введення до спеціального реєстру пам'яті своєї мобільної станції повного номеру стаціонарного абонента з громадської телефонної мережі. У цьому випадку ситуація відрізняється від такої, яка має місце при встановленні зв'язку між двома стаціонарними абонентами телефонної мережі. У випадку стаціонарної телефонії абонент, раз від разу, отримує з'єднання зі своєю локальною АТС і вводить номер бажаного абонента. В комірковій мережі радіоканал є надзвичайно цінним середовищем, тому спочатку записується номер абонента в пам'ять. Це дозволяє не займати зайвий час радіоканал, а спокійно коректувати необхідний номер.

Вибір базової станції (англ. cell site selection) (рис. 5.9b).

Приймач мобільної станції переглядає всі викличні канали і після знаходження каналу, у якого найвищий рівень потужності сигналу, затримується на ньому. Передавач вибраного каналу, що розташований на базовій станції, в зоні дії якої знаходиться рухомий абонент, періодично передає ідентифікаційні сигнали. Мобільна станція вписує до спеціального реєстру ідентифікаційний номер базової станції, з якою встановлено зв'язок.

Ініціювання зв'язку (англ. origination) (рис. 5.9с).

З реєстру пам'яті мобільної станції висилається номер стаціонарного абонента, що викликається з стаціонарної телефонної мережі, і ідентифікаційний номер рухомого абонента, який викликає.

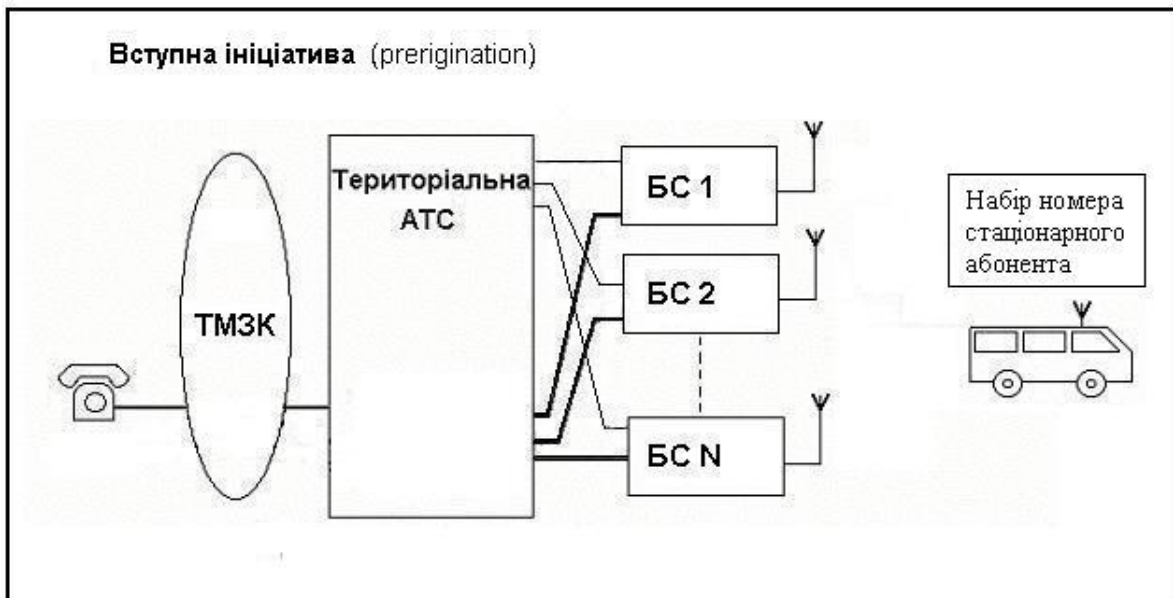


Рис.5.9а Схема вступної ініціативи (виклик стаціонарного абонента з коміркової мережі).

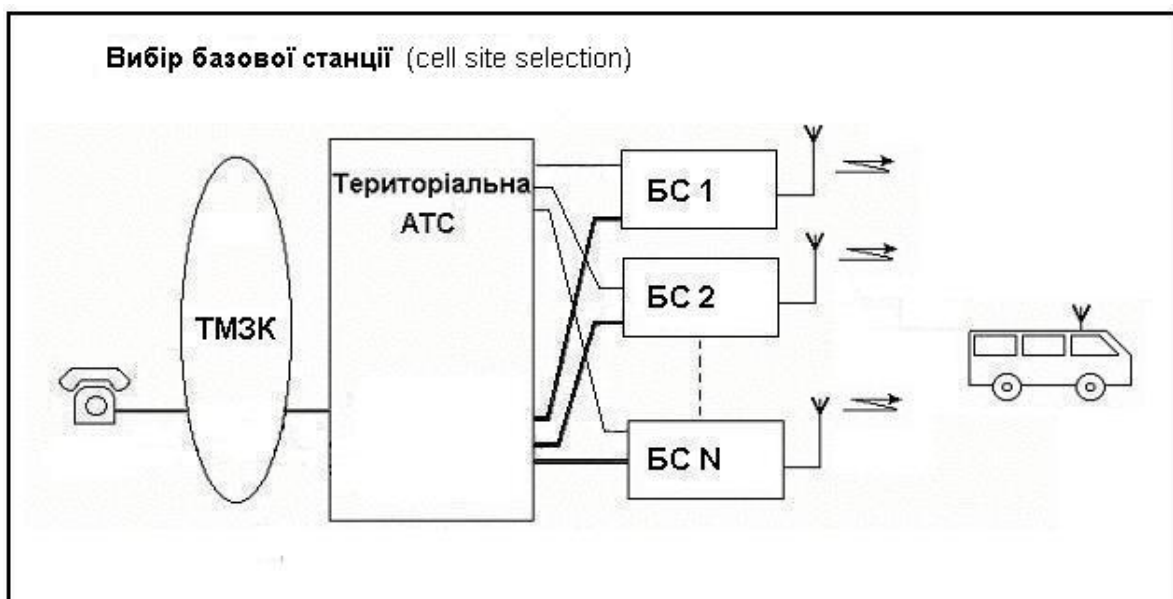


Рис.5.9б Схема вибору базової станції

Передача обох номерів відбувається в каналі викликів. Базова станція після отримання номерів пересилає їх далі до територіальної АТС, використовуючи для цього виділені канали швидкої передачі даних.

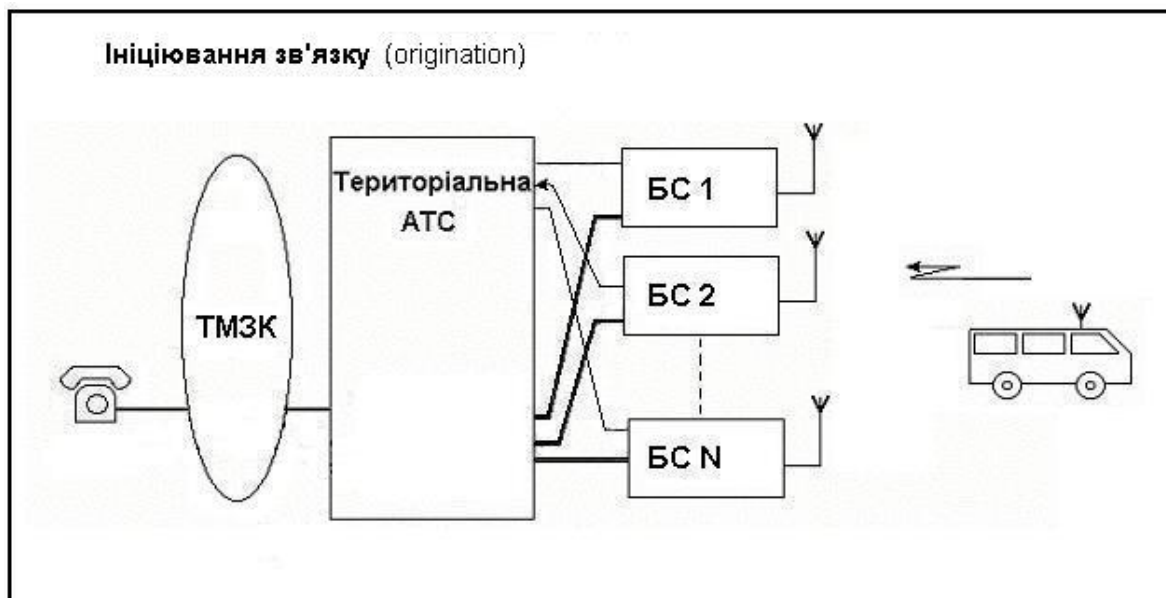


Рис.5.9с Схема ініціативи встановлення зв'язку

Визначення розмовного каналу (англ. channel designation) (рис. 5.9d). Після отримання номерів абонентів (того, що викликають і того, що викликає) територіальна АТС вибирає вільний дуплексний розмовний канал на базовій станції, що прислала їй обидва номери. Потім, за допомогою ліній швидкої передачі даних, до базової станції пересилається інформація про номер виділеного розмовного каналу.

Базова станція по викличному каналу інформує мобільну станцію про виділений розмовний канал. Мобільна станція настроює своє обладнання до того каналу і, вмикаючи передавач, висилає тестуючий сигнал SAT. Базова станція, отримавши сигнал SAT, по лінії передачі даних інформує територіальну АТС про встановлення зв'язку із мобільною станцією в розмовному каналі.

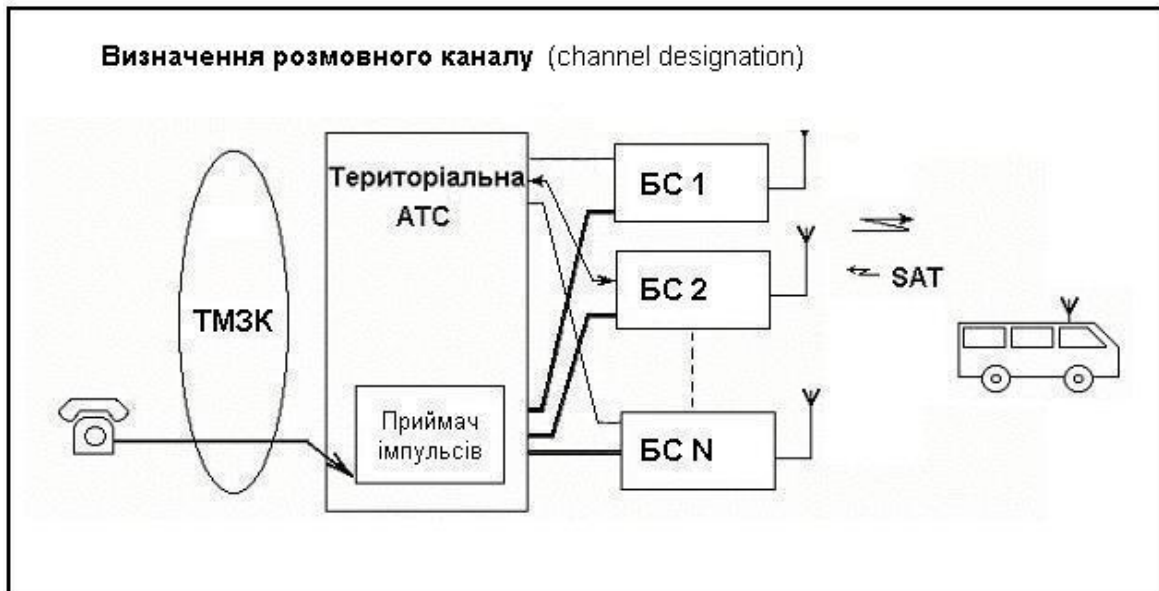


Рис.5.9d. Схема ініціативи встановлення зв'язку

Сигналізація зв'язку (англ. digit outpulsing) (рис. 5.9e).

Після отримання інформації про встановлення зв'язку між базовою станцією і мобільною станцією в розмовному каналі, територіальна АТС, використовуючи стандартну техніку сигналізації, здійснює зв'язок через стаціонарну телефонну мережу із стаціонарним абонентом. Одночасно, базова станція, отримавши наказ від територіальної АТС, через розмовний канал вводить приймач абонента в стан готовності, передаючи сигнал SAT.

Розмова (англ. talking) (рис. 5.9f).

Після створення всієї дороги для сигналу в громадській телефонній мережі відповідна локальна АТС висилає до абонента, якого викликають, сигнал дзвінка. В момент підняття телефонної трубки починається етап розмови.

5.3.4. Автоматичне перемикання розмов між комірками

Під час тривалих розмов може виникнути ситуація, коли рухомий абонент з однієї комірки переходить до іншої. Іншими словами, абонент коміркової мережі може перейти із зони дії однієї базової станції в зону дії іншої, що пов'язано із рухом абонента в межах дії коміркової мережі. Тому актуальним є автоматичне перемикання в комірковій мережі розпочатої розмови з однієї

базової станції до сусідньої без переривання самої розмови. З тією метою розмовний канал весь час знаходиться під наглядом як зі сторони мобільної станції, так і базової станції, що в даний момент її обслуговує.

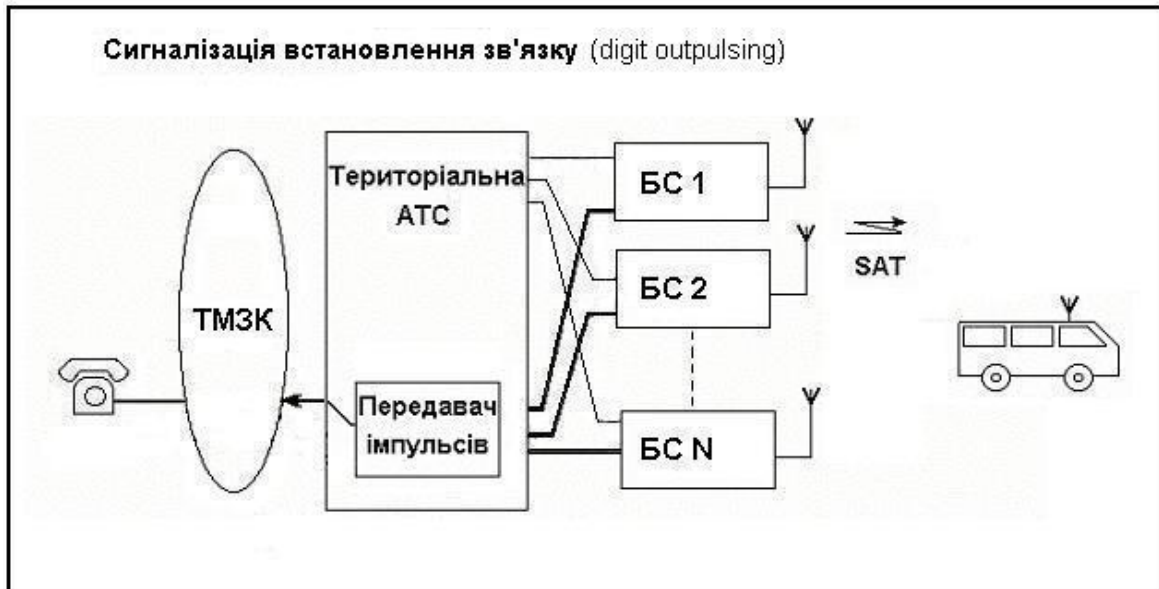


Рис.5.9е Схема сигналізації встановлення зв'язку

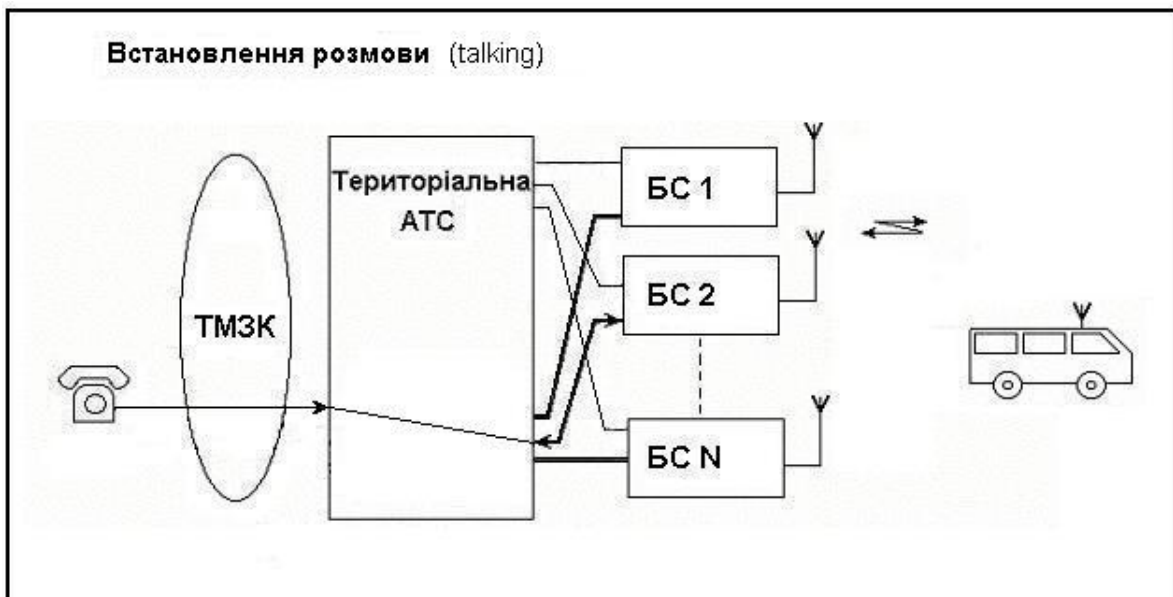


Рис.5.9f Схема встановлення розмови

У випадку підтвердження з будь-якої сторони погіршення передачі система переходить до етапу перемикання розмови (англ. handoff). Операції, що пов'язані із перемиканням розмови проілюстровані на рис. 5.10.

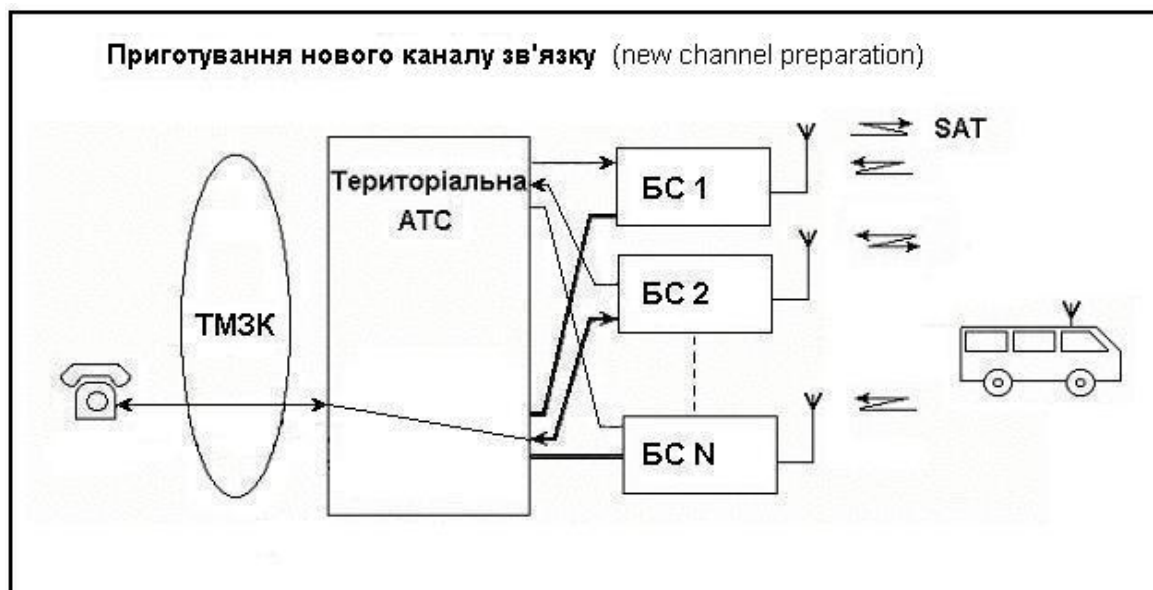


Рис.5.10а Схема приготування нового каналу зв'язку

Приготування нового каналу (англ. new channel preparation) (рис. 5.10а).

У випадку погіршення якості розмовного зв'язку в першу чергу інформується через базову станцію територіальну АТС. Остання реагує виданням наказу до сусідніх базових станцій, щоб вони ввімкнули свої вимірювальні приймачі. Сусідні до базової станції, що обслуговує рухомого абонента, базові станції починають пересилати до територіальної АТС результати вимірювання радіосигналів в радіоканалах. Ці дані аналізуються територіальною АТС, яка приймає рішення про те, чи даний абонент повинен бути прийнятий іншою базовою станцією, чи ні. Якщо результати вимірів вказують на те, що абонент перейшов в зону дії іншої базової станції, територіальна АТС вибере вільний дуплексний розмовний канал із ряду радіоканалів, що виділені новій базовій станції, яка по кабельних лініях отримує наказ прийняти на обслуговування даного абонента. Нова базова станція починає передавати в розмовному каналі тестовий сигнал SAT.

Перестроювання мобільної станції (англ. mobile retune command) (рис. 5.10b). Територіальна АТС пересилає інформацію про новий розмовний канал і новий сигнал SAT до базової станції, що до цієї пори обслуговувала рухомого

абонента, а базова станція в свою чергу пересилає інформацію до мобільної станції. Мобільна станція після отримання інформації про прийняття її новою базовою станцією висилає спеціальний сигнал по розмовному каналу ST (англ. Signalling Ton), виключає свій передавач і перестроює його на новий розмовний канал, яким починає передавати тестуючий сигнал SAT.

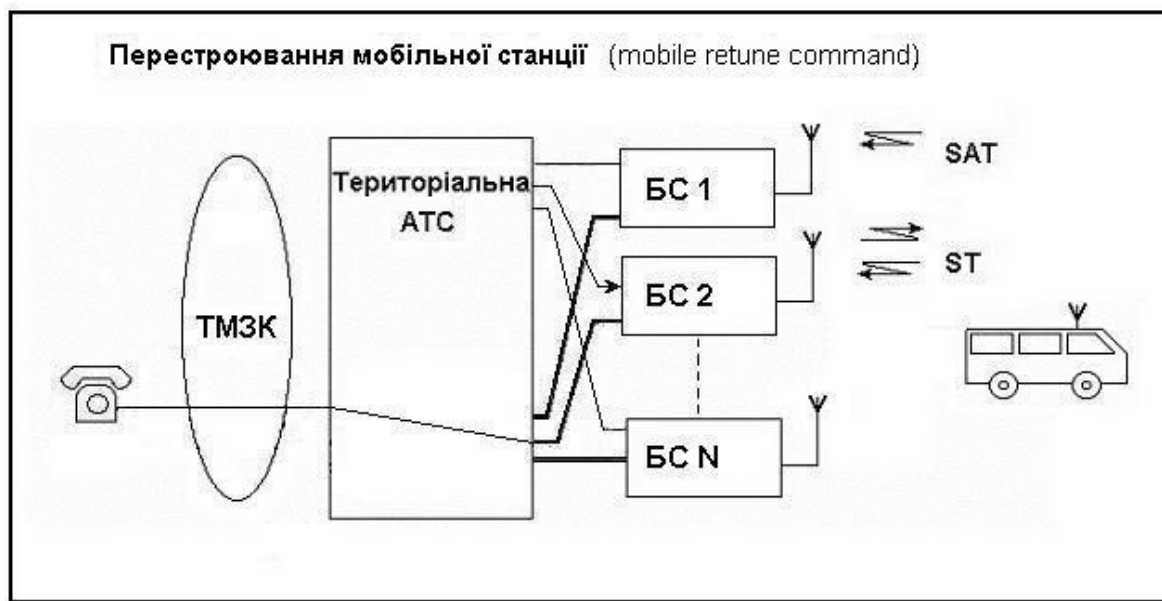


Рис.5.10b Схема перестроювання мобільної станції

Реконфігурація зв'язку (англ. channel/path reconfiguration) (рис. 5.10c).

Стара базова станція після отримання сигналу ST про вимкнення передавача мобільної станції інформує територіальну АТС про припинення обслуговування абонента. Територіальна АТС приступає до реконфігурації зв'язку, направляючи його на нову базову станцію, що прийняла на себе обслуговування абонента. В цей час нова базова станція, отримавши від мобільної станції в розмовному каналі властивого тестуючого сигналу SAT, інформує про це територіальну АТС. З цього часу територіальна АТС визнає перемикавання абонента і зв'язане з цим закінчення реконфігурації. Залишення абонента однією і прийняття до обслуговування іншою, сусідньою, базовою станцією пов'язане з необхідністю перемикавання синтезатора частоти в мобільній станції із старого дуплексного каналу на новий. Такий шлях вимагає

вимкнення на певний час приймально-передавального обладнання мобільної станції. Випадкова перерва в розмові, що викликана операціями перемикавання абонента, не повинна тривати довше, ніж 100 мс, що звичайно може призвести до втрати декількох звуків або короткого слова.

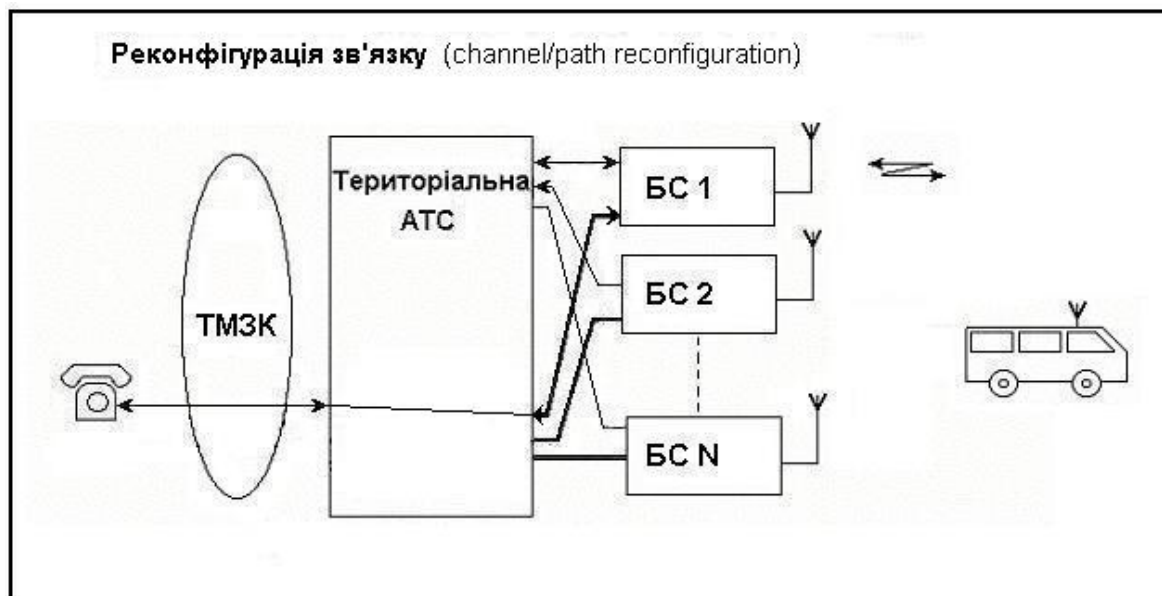


Рис.5.10с Схема реконфігурації зв'язку

Вимушений рух в каналах, що призначені для оголошень і викликів, викликаний великим числом швидких перемикань телефонних розмов, був у коміркових мережах першої генерації однією з головних причин, що обмежували надмірне зменшення розмірів комірок.

Друга причина була в різному рівні інтерференційних завад на входах мобільних приймачів, що виникали в результаті поділу комірок.

5.3.5. Роз'єднання розмов в комірковій мережі

Розглянемо операції, що проводяться при роз'єднанні розмов в комірковій мережі. Ці операції однаково можуть бути ініційовані як стаціонарним абонентом, так і рухомим. Розглянемо роз'єднання, що *ініціюються рухомим абонентом* (англ. *mobile-initiated disconnect*). Цей тип роз'єднання представлено на рис. 5.11.

Звільнення зв'язку (англ. release) (рис. 5.11a).

Після закінчення розмови передавач мобільної станції висилає по розмовному каналу спеціальний сигнал ST до базової станції, що її обслуговує, і сам вимикається. Базова станція, отримавши сигнал вимкнення передавача мобільної станції, передає до територіальної АТС спеціальний сигнал звільнення кабельного зв'язку.

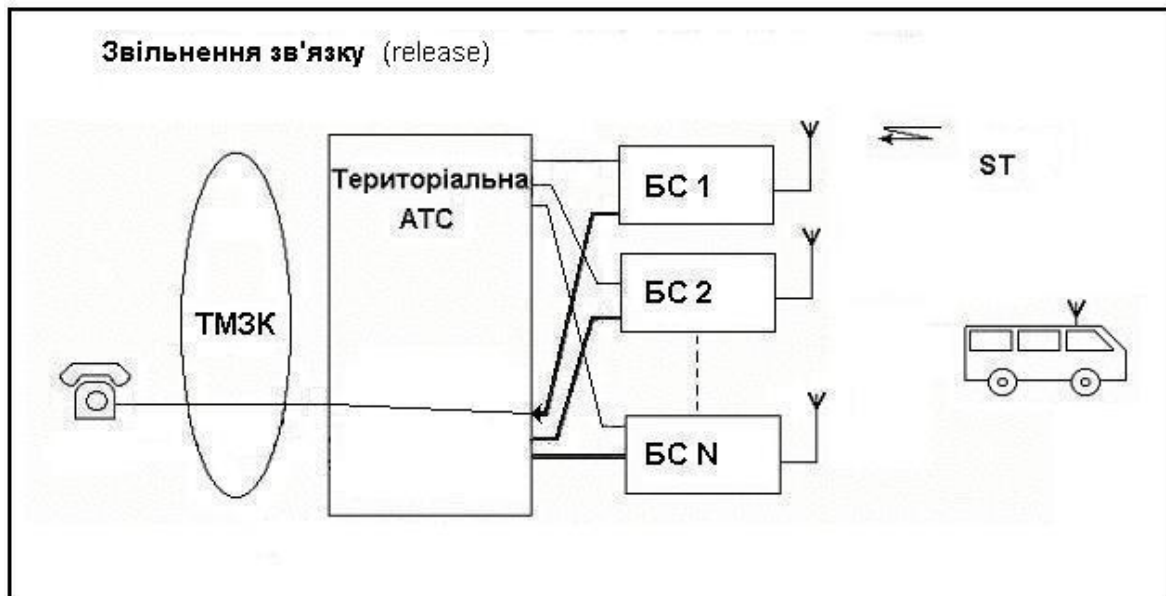


Рис.5.11а Схема звільнення каналу зв'язку

Перехід в бездіяльний стан (англ. idle) (рис. 5.11b).

Сигнал звільнення кабельного зв'язку, дійшовши до територіальної АТС, викликає в ній звільнення всього комутаційного обладнання, яке бере участь у реалізації зв'язку, а також пересилання до громадської телефонної мережі сигналу роз'єднання розмови.

Вимкнення передавача базової станції (англ. transmitter shutdown) (рис. 5.11c). Територіальна АТС по лініях швидкої передачі даних інформує базову станцію про роз'єднання розмови, що направлено до громадської телефонної мережі, і дозволяє базовій станції звільнити все обладнання, яке було використане у створенні цього зв'язку. Звільнене обладнання може бути використане для встановлення інших зв'язків.

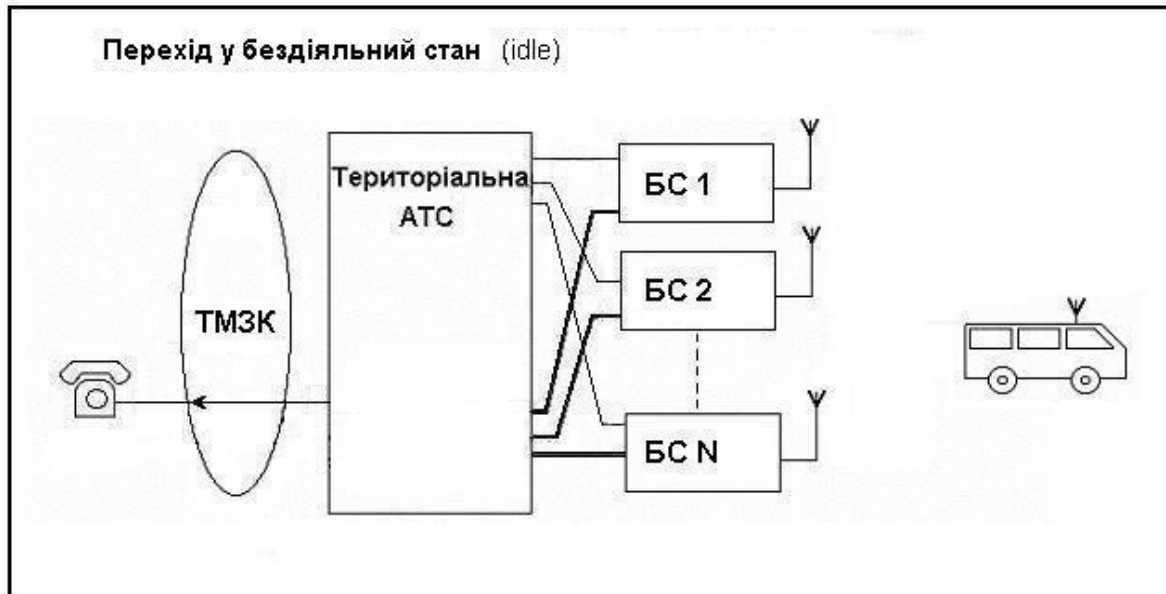


Рис.5.11b Схема переходу у бездіяльний стан

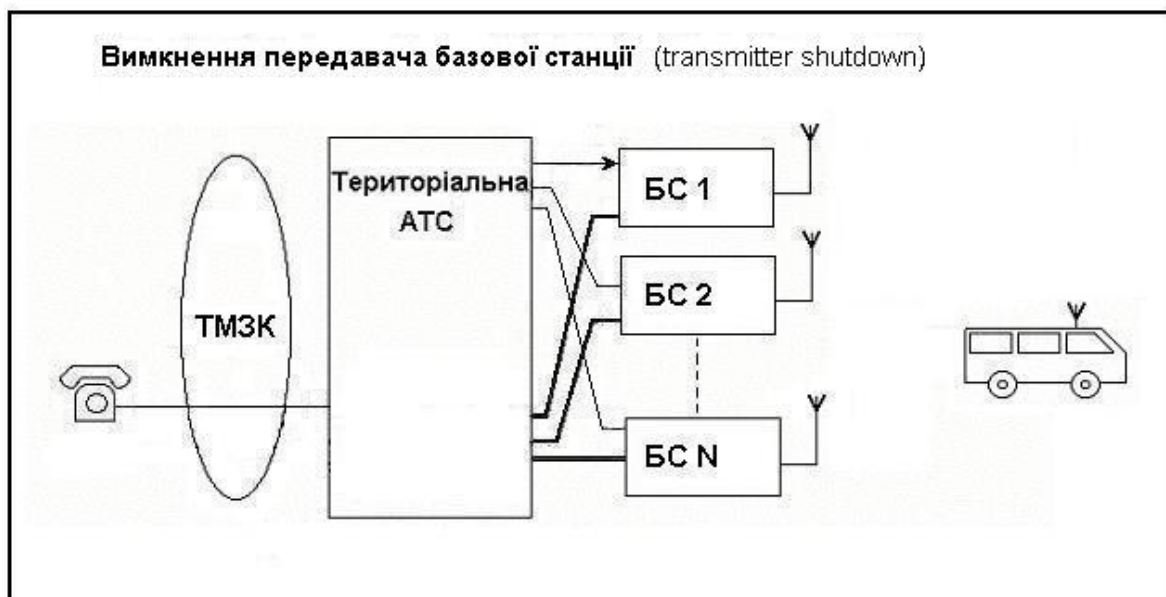


Рис.5.11c Схема вимкнення передавача базової станції

Роз'єднання розмови може бути ініційоване також стаціонарним абонентом телефонної мережі загального користування. Цей тип роз'єднання називається *роз'єднанням, що ініціюється системою* (англ. *system-initiated disconnect*). Схематично він представлений на рис. 5.12.

Перехід в бездіяльний стан (англ. idle) (рис. 5.12a).

З стаціонарної телефонної мережі до територіальної АТС доходить сигнал про роз'єднання розмови. Територіальна АТС зразу звільняє комутаційне обладнання, що було задіяне в процесі реалізації зв'язку в сторону до стаціонарної телефонної мережі.

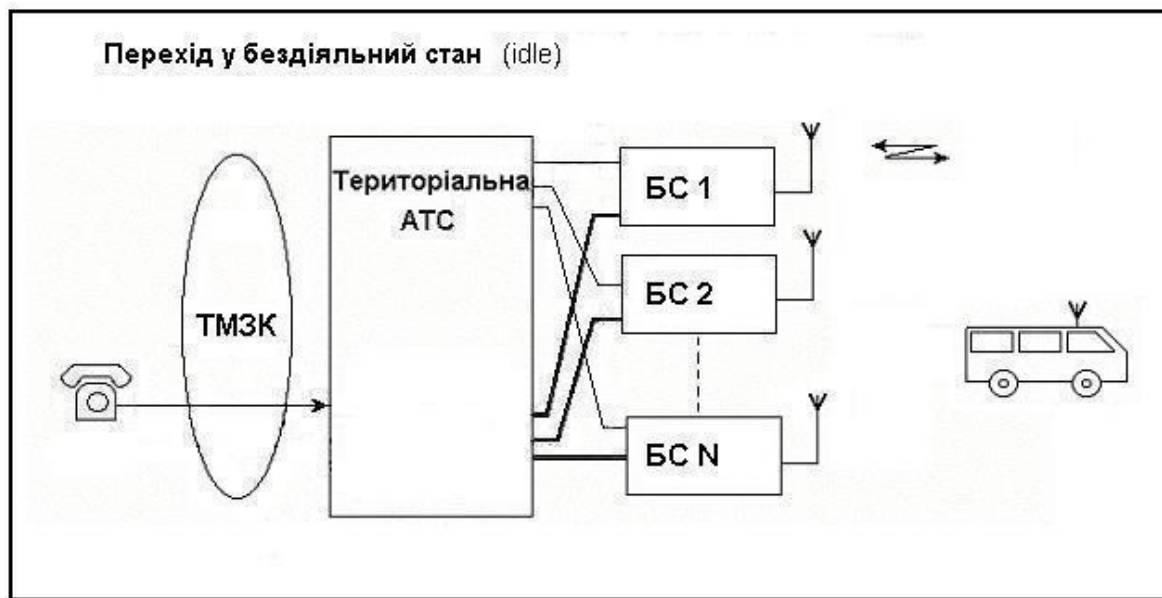


Рис.5.12а Схема переходу в бездіяльний стан

Управління звільненням зв'язку (англ. ordered) (рис. 5.12b).

Територіальна АТС висилає по каналах швидкої передачі даних до базової станції відомості про звільнення комутаційного обладнання, яке брало участь в кінцевому зв'язку. Базова станція пересилає ці відомості далі через розмовний канал до мобільної станції. Мобільна станція підтверджує прийом повідомлення, вимикає свій передавач, передавши в розмовному каналі спеціальний сигнал вимкнення ST. Це є той самий сигнал, що був у випадку роз'єднання з ініціативи рухомого абонента.

Вимкнення передавача базової станції (англ. transmitter shutdown) (рис. 5.12c). Територіальна АТС, розпізнавши сигнал вимкнення передавача мобільної станції, що дійшов до неї від відповідної базової станції, дозволяє останній звільнити все обладнання, яке використовувалося у встановленні даного зв'язку. Від цього часу обладнання може бути використане до реалізації

іншого зв'язку.

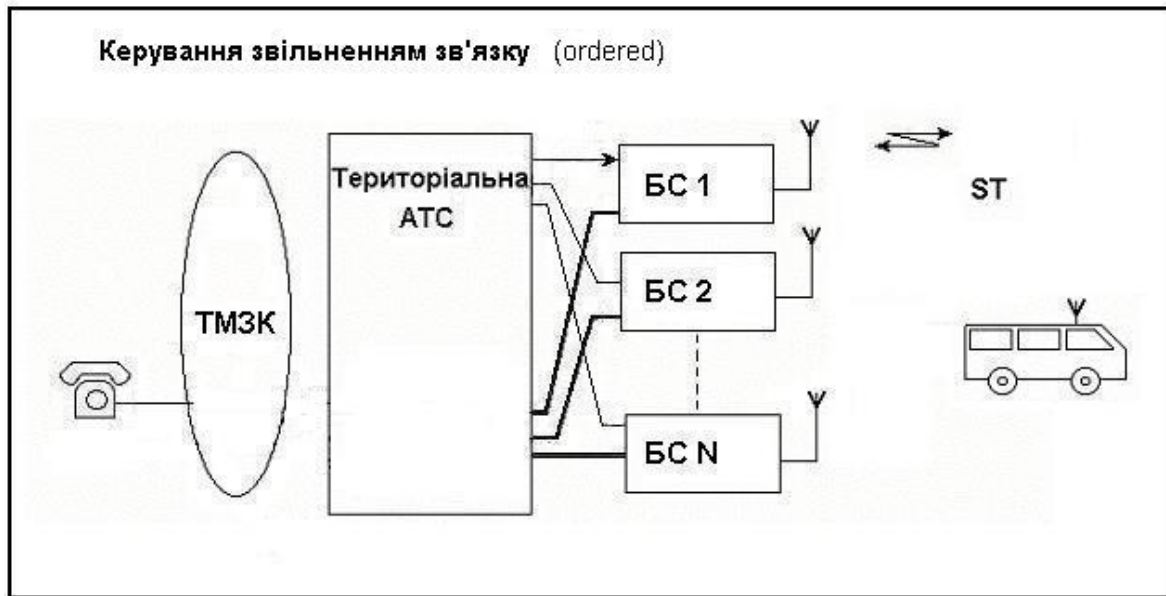


Рис.5.12б Схема керування звільненням зв'язку

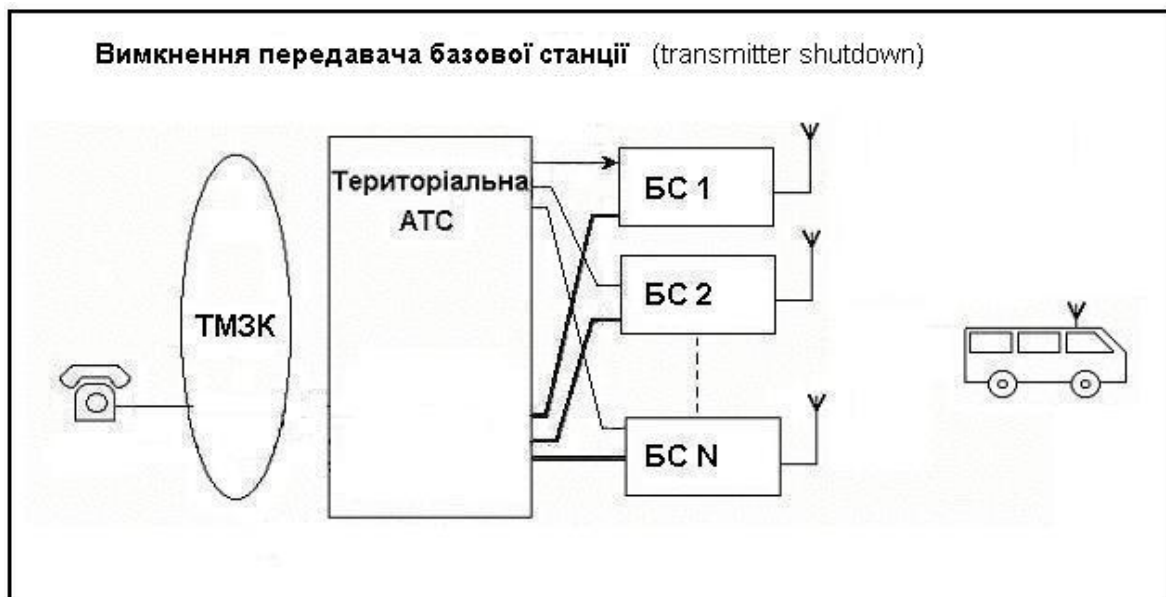


Рис.5.12с Схема вимкнення передавача

5.3.6. Заключення

Підсумовуючи сказане вище, треба ствердити, що найістотніші елементи в обслуговуванні наступні:

- локалізація рухомого абонента;

- релокалізація з перенесенням розмови до сусідньої комірочки мережі;
- встановлення зв'язку;
- роз'єднання зв'язку;
- автоматичне регулювання потужності передавачів мобільних станцій.

Автоматичне регулювання потужності передавачів мобільних станцій представляє собою дуже важливий елемент охорони всіх розмовних приймальних каналів базових станцій перед переорієнтацією і втратою чутливості у випадку сильного зближення мобільної станції до базової. Надмірний рівень потужності переданого сигналу з мобільної станції виявляється базовою станцією, після чого до мобільної станції передається в викличному каналі наказ на зменшення потужності передавача мобільної станції. Глибина регулювання потужності сягає 40 дБ.

5.4. Поверхневі структури коміркових мереж

Типова коміркова мережа функціонує у двовимірному просторі і складається із стаціонарних станцій, таких як територіальні АТС і базові станції, та станцій мобільних. Цей двовимірний простір розділений на зони, кожна називається коміркою і обслуговується однією базовою станцією. Під зоною (коміркою) будемо розуміти певний фрагмент електромагнітного поля, що існує у двох вимірах геометричного простору, визначається часом, частотою і рівнем потужності сигналу. Для міжзонового зв'язку типу рухомий абонент - рухомий абонент або рухомий абонент - стаціонарний абонент громадської телефонної мережі використовуються або кабельні (оптоволоконні) лінії з громадської телефонної мережі, або виділені кабельні (оптоволоконні) і радіорелейні лінії. Але для внутрішньозонового зв'язку типу мобільна станція - базова станція використовуються радіоканали.

Забезпечення взаємної розв'язки між комірками відбувається за рахунок виконання норм внутрішньосистемної (між зонами-комірками) і міжсистемної (між комірковою мережею і іншими радіосистемами) електромагнітної

сумісності. Причому, в комірковій мережі існує умова, що виконання умов електромагнітної сумісності не повинно погіршувати ефективного використання частотних засобів мережі. З цієї точки зору в комірковій мережі з'являються структурні проблеми. Вони стосуються:

- розділу даного простору на комірки;
- розташуванням базових станцій в межах виділених комірок;
- призначення робочих частот для кожної комірки.

Для структурного аналізу мережі, чи поділу її на комірки з наступним призначенням робочих частот, використовується *сіткова модель*.

Під сіткою радіосистеми будемо розуміти ансамбль пронумерованих точок, що розташовані згідно певного закону на площині. Точкам відповідає дійсне положення базових станцій, разом із номерами груп робочих частот, які виділені кожній станції для внутрішньозонового зв'язку. Сітка необов'язково повинна бути регулярною просторово-спектральною структурою (рис. 5.13).

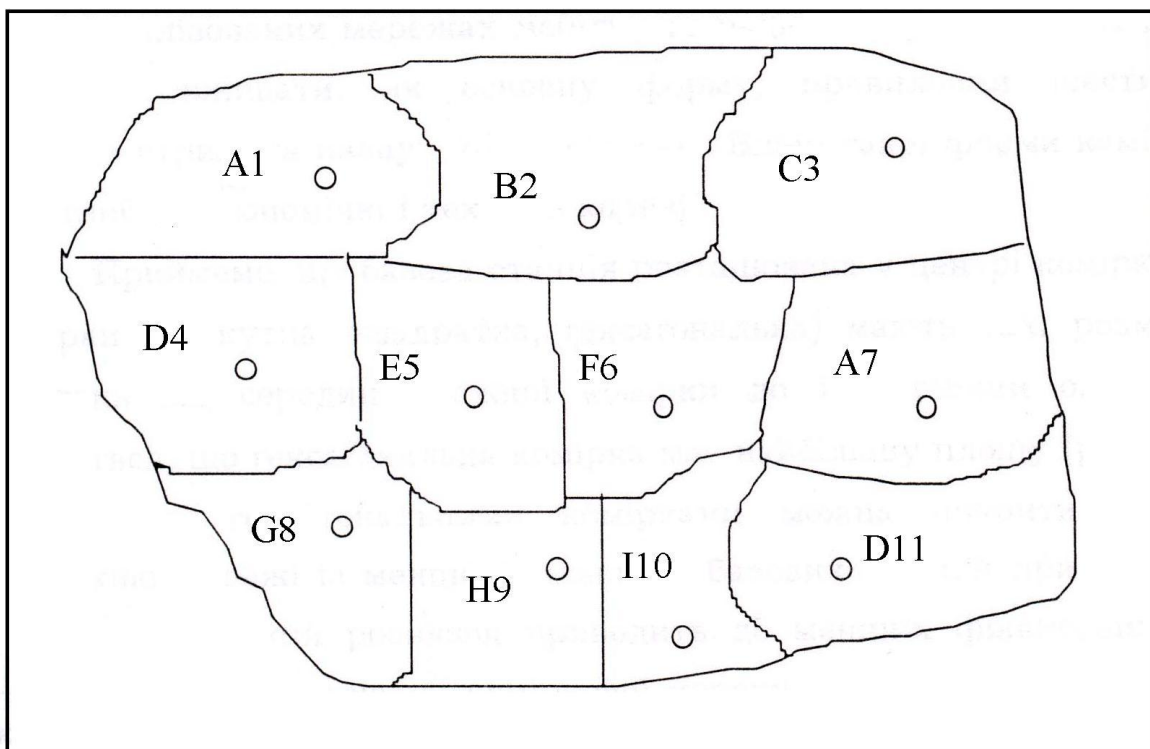


Рис.5.13 Приклад сітки з 11 комірок і підансамблем з 9 радіоканалів (від А до І).

Сітковою моделлю будемо називати об'єкт з впорядкованою геометричною структурою, регулярною в міру можливого. Тим самим сіткова модель тільки наближено може представляти дійсне розташування базових станцій і розділ простору на комірки. При адаптації сіткової моделі для коміркової телефонії з'явилася проблема вибору регулярної форми комірки, яка обслуговується базовою станцією. Вибір регулярної форми комірки повинен проводитися, в міру можливості, принаймні на етапі проектування мережі, до простої і одночасно точної межі зони дії базової станції.

Точний опис межі зони дії конкретної базової станції та взаємне їх розташування дозволяють вже на етапі проектування мережі на початкові виключення спільноканальних завад в сусідніх комірках.

Спроби впровадження нерегулярних форм комірок призводили до великих проблем, особливо тоді, коли в даній комірці зростало навантаження. Проблеми адаптації даної комірки до нового трафіку значно спрощувалися у випадку регулярних форм. Регулярні форми дозволяють вже на етапі проектування мережі так спланувати взаємне розташування базових станцій, що використовують однакові канали (спільноканальні), щоб забезпечити найнижчий рівень впливу інтерференційних завад на якість передачі сигналів в радіоканалах.

5.4.1. Форми комірок в коміркових мережах

Спорядження базової станції антеною з ненапрявленою характеристикою направленості (діаграмою направленості) призводить до природного обмеження її зони дії у вигляді кола. В центрі кола знаходиться базова станція. Прийняття на етапі проектування мережі форми комірки у вигляді кола непридатне, бо покриття простору або не буде забезпечено жодною базовою станцією, або буде забезпечуватися більше, ніж однією (рис. 5.14).

З'являються або отвори, або накладання. Враховуючи, що жодна з цих ситуацій не повинна мати місце, прийнято апроксимувати коло

багатокутником. Запропоновано при цьому такі форми комірок (рис. 5.15):

- рівносторонній трикутник;
- квадрат;
- правильний шестикутник.

Такі комірки дозволяють позбутися непокриття, або перекриття відповідної території. Крім цього, це єдині правильні багатокутники, якими можна однорідно покрити бажану геометричну поверхню. В наш час, в реалізованих мережах мобільного радіозв'язку в сіткових моделях прийнято вживати, як основну форму, правильний шестикутник. Комірка отримала назву - гексагональна. Вибір такої форми комірки має свої глибокі економічні і технічні корені.

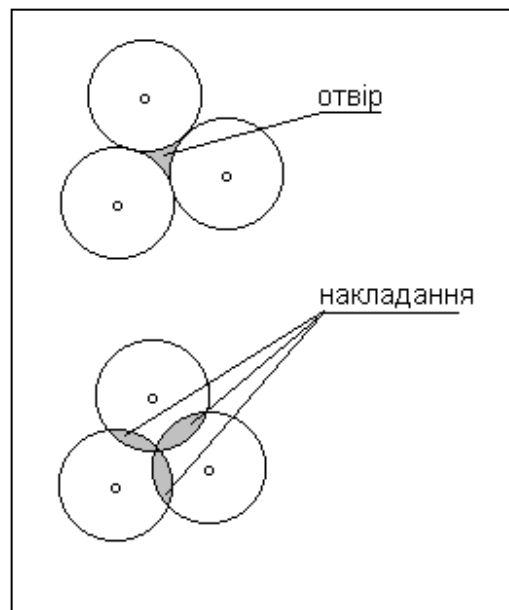


Рис.5.14 Отвір і накладання при використанні колових комірок

Прийmemo, що базова станція розташована у центрі комірки. Якщо комірки (трикутна, квадратна, гексагональна) мають такі розміри, що відстань від середини кожної комірки до її вершини однакова, то виявиться, що гексагональна комірка має найбільшу площу (рис. 5.16).

Отже гексагональними комірками можна покрити конкретну поверхню мережі із меншою кількістю базових станцій при однаковому радіусі дії. Такий розв'язок приводить до менших фінансових витрат при практичній реалізації коміркової мережі.

З вибором форми комірки пов'язана також проблема перемикання телефонних розмов з мобільними абонентами. На рис. 5.15 представлено трикутні комірки А, що мають 12 безпосередніх сусідів. Квадратні комірки В - 8, а комірки С тільки 6. З рис. 5.15 випливає, що гексагональна сітка вимагає переведення в стан очікування лише 6 базових станцій. Для порівняння: трикутна сітка потребує 12, а квадратна 8 базових станцій, що означає більший рух в каналі для викликів і оголошень.

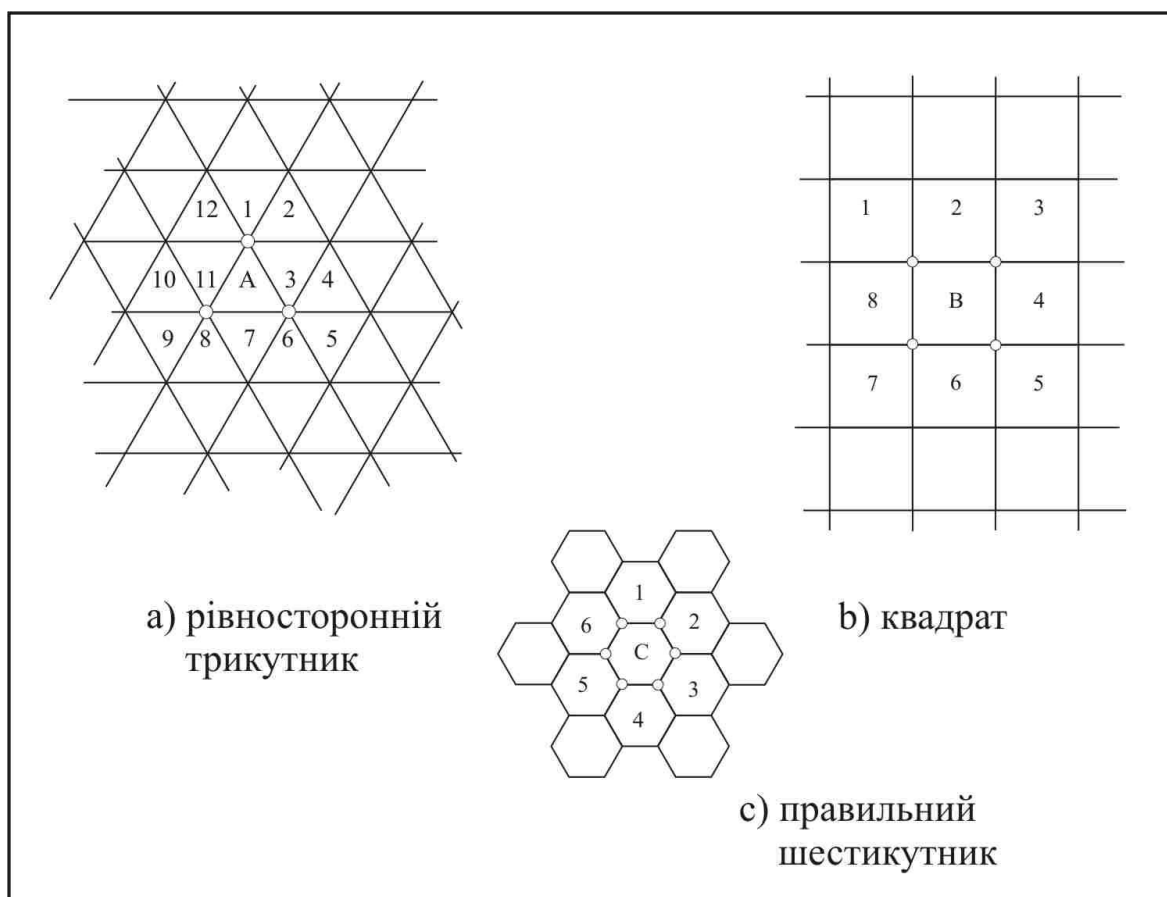


Рис.5.15 Пропоновані форми комірок

Прийняття регулярної форми гексагональної комірки має єдине істотне значення на етапі проектування і просторового планування ансамблю

радіоканалів. Це багатократне використання їх в різних регіонах мережі. При аналізі інтерференційних спільноканальних завад і оцінки відношення потужності сигнал/інтерференційні завади приймається, що зона дії базових станцій з ненапрямленими антенами є колом. В дійсності, враховуючи кліматичні умови, рельєф місцевості та умови забудови, зони дії базових станцій приймають нерегулярні форми (рис. 5.17).

5.4.2. Принципи проектування коміркових мереж

В даному розділі коротко розглянемо, без глибокого вникання в топологічну теорію сіткових моделей, як основні комірки, що використовують той самий ансамбль радіоканалів, розташовані одні відносно інших в комірковій мережі.

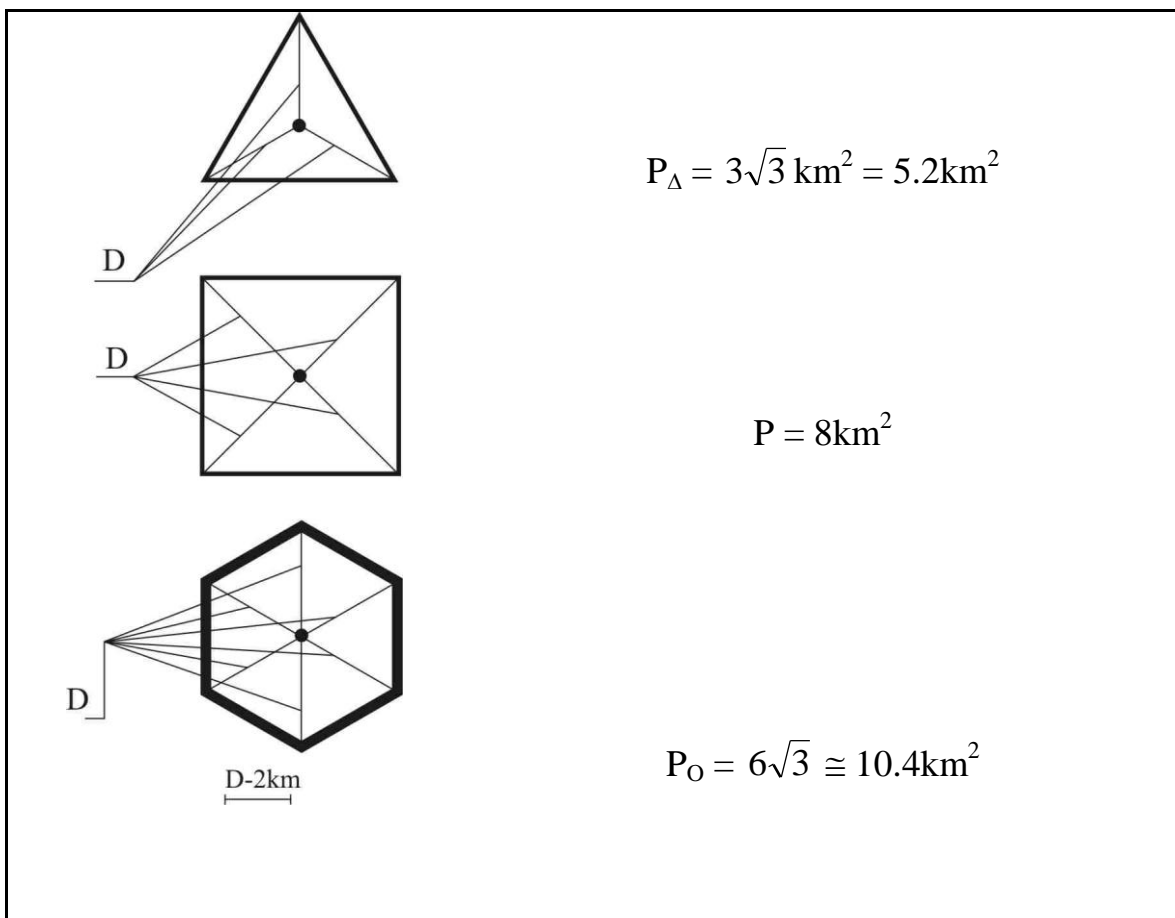


Рис.5.16 Вибір гексагональної комірки, як основної

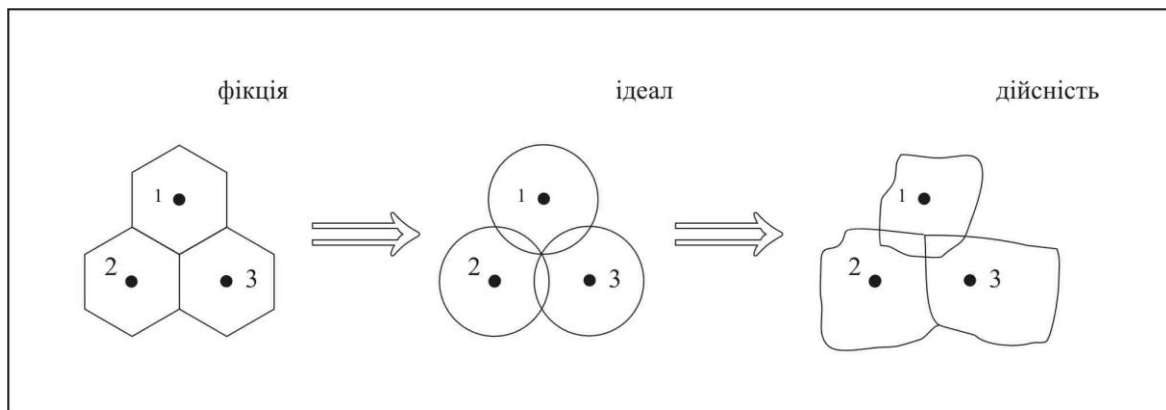


Рис.5.17 Фікція, ідеальна та дійсна форми комірок в мобільній радіокомунікації

Перший крок проектування коміркової мережі полягає у накладанні на дану географічну територію структури типу медових стільників з однаковими гексагональними комірками. Далі коміркам призначається підгрупа радіоканалів, яка звичайно позначається латинськими літерами: А, В, С,.... Наступним кроком визначаються спільноканальні базові станції, вибираючи з ряду натуральних чисел j плюс i , що змінюється від 0 до 2, $i \geq j \geq 0$, цей параметр називається shift parameters. Далі вибирається одна з комірок мережі, так звана відносна комірка (англ. reference cell), і призначається їй окреслений набір радіоканалів. Оскільки гексагональна комірка має шість безпосередніх сусідів, пошук відбувається в шести, ортогональних до сторін шестикутника, напрямках. По черзі, в кожному з шести напрямках, відраховується i прилеглих до себе комірок з наступним поворотом на кут 60град., наприклад, проти годинникової стрілки, відраховується j комірок (рис. 5.18). Виникають шість нових комірок, яким виділена та сама група каналів, що i відносній. Таким чином визначається шість найближчих спільноканальних базових станцій.

Наступним кроком встановлюється нова відносна комірка з виділеною їй підгрупою каналів, що відрізняється від попередньої, і повторюється описаний алгоритм. Так робиться доти, доки вся сітка не буде заповнена каналами. Існує чотири способи визначення комірок (базових станцій), що використовують однакову групу каналів - спільноканальних, що добре видно на рис. 5.19.

Комірки, яким виділено згідно описаного алгоритму різні взаємно

рознесені групи каналів, утворюють ансамблі комірок (англ. clusters). Число комірок в ансамблі (англ. number of cells per cluster), звичайно позначається N або K , становить один з найістотніших параметрів коміркової мережі. Число N означає, скільки різних, взаємно рознесених груп каналів належить передбачити, щоб покрити даний простір коміркової мережі. Можна показати, що число N гексагональних комірок в ансамблі пов'язане із j і i таким рівнянням:

$$N = i^2 + j^2 + i \cdot j.$$

Це у свою чергу означає, що число N гексагональних комірок в ансамблі може приймати тільки наступні значення:

$$N = 1, 3, 4, 7, 9, 12, 13, 16, 19, 21, 25. \dots$$

Числа 1, 3, 4 не можуть бути застосовані у випадку передачі мови з аналоговою модуляцією за рахунок дуже малої відстані між базовими спільноканальними станціями. На сьогодні, лише європейська система GSM, із цифровим способом передачі телефонних сигналів, допускає застосування ансамблів з трьох комірок. Американські цифрові системи ADC і японські JDC збудовані на базі ансамблів, що утворені відповідно із семи із чотирьох комірок.

В мережі, що створена із квадратних комірок, число K комірок в ансамблі зв'язане з j і i таким чином:

$$K = i^2 + j^2.$$

Ціле число K приймає такі значення:

$$K = 1, 2, 4, 5, 8, 9, 10, 13, 16, 17, 18, \dots$$

На рис. 5.18 представлено приклад квадратної сітки з п'ятикомірковим ансамблем ($i=2$, $j=1$). Алгоритм визначення спільноканальних станцій в квадратній сітці дуже подібний до алгоритму, який використовувався у

гексагональній структурі. Істотна різниця лише в тому, що спільноканальні комірки знаходяться у чотирьох напрямках з поворотом на 90 град.

Іншим, дуже важливим параметром коміркової мережі є коефіцієнт редукції рівня інтерференційних завад (англ. CIRF -Cochannel Interference Reduction Factor), що позначається літерою q . Коефіцієнт q представлений, як відстань D (рис. 5.20), відрізок між серединами двох найближчих спільноканальних комірок, і промінь R гексагональної комірки.

З рис.5.20 випливає, що відстань D пов'язана із радіусом гексагональної комірки R наступною залежністю:

$$D = \sqrt{(jR\sqrt{3})^2 + (iR\sqrt{3})^2 - 2(jR\sqrt{3}) \cdot (iR\sqrt{3}) \cos 120^\circ} = \\ = R\sqrt{3}\sqrt{j^2 + ji + i^2} = R\sqrt{3N}$$

Значення коефіцієнта q в гексагональній комірковій мережі можна визначити як:

$$q = \text{CIRF} = D/R = \sqrt{3N}$$

На рис. 5.21 представлено чотири приклади гексагональної сітки, що утворюється із ансамблів з $N=4, 7, 9$ і 12 комірок, для яких коефіцієнт q має значення: 3.46, 4.6, 5.2, 6.0.

Для квадратних сіток координатна відстань D' пов'язана з променем R комірки таким рівнянням (рис. 5.22):

$$D' = \sqrt{(iR\sqrt{2})^2 + (jR\sqrt{2})^2} = \\ = R\sqrt{2} \cdot \sqrt{i^2 + j^2} = R\sqrt{2K}$$

Тим самим значення коефіцієнта інтерференційних спільноканальних завад q' в мережі, що утворена з квадратних комірок, може бути записана як:

$$q' = \text{CIRF} = D'/R = \sqrt{2K} .$$

Отже, принципи проектування коміркових мереж полягають в наступному:

1. Накладання на дану географічну територію структури типу медових стільників з однаковими гексагональними комірками;
2. Призначення коміркам підгруп радіоканалів (А, В, С, ...);
3. Визначення спільноканальних базових станцій (вибирають з ряду натуральних чисел j плюс i , що змінюються від 0 до 2, $1 \geq j \geq 0$);
4. Вибирається відносна комірка мережі і призначається їй визначений набір радіоканалів;
5. Для гексагональної комірки визначається шість найближчих спільноканальних базових станцій (для квадратної - чотири);
6. Встановлюється нова відносна комірка з виділеними їй підгрупою каналів, що відрізняється від попередньої, і повторюється описаний алгоритм;

В мережі, що створена із квадратних комірок, число K комірок в ансамблі зв'язане з j і i таким чином:

$$K = i^2 + j^2.$$

Ціле число K приймає такі значення: $K = 1, 2, 4, 5, 8, 9, 10, 13, 16, 17, 18, \dots$

Число N гексагональних комірок в ансамблі пов'язане із j і i таким рівнянням:

$$N = i^2 + j^2 + i \cdot j$$

Це у свою чергу означає, що число N гексагональних комірок в ансамблі може приймати тільки наступні значення:

$$N = 1, 3, 4, 7, 9, 12, 13, 16, 19, 21, 25 \dots$$

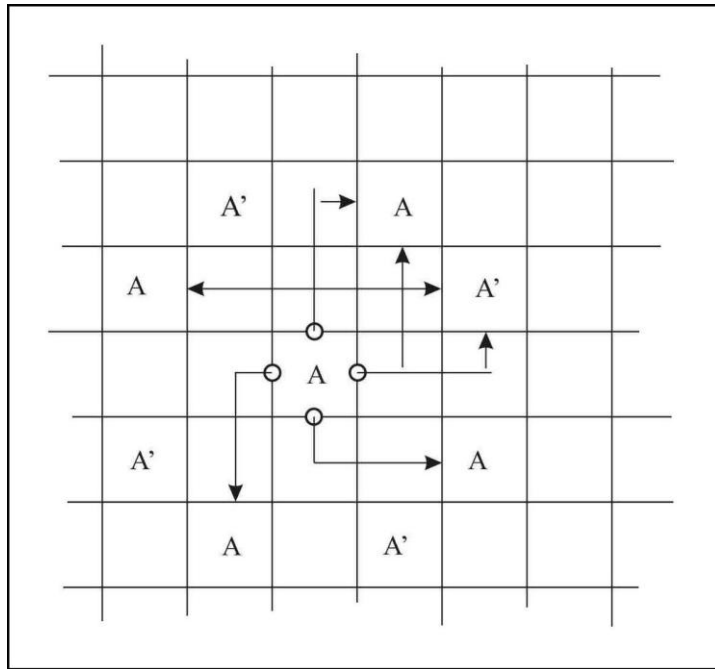


Рис.5.18 Квадратна сітка і п'ятикомірковий ансамбль ($i=2, j=1$)

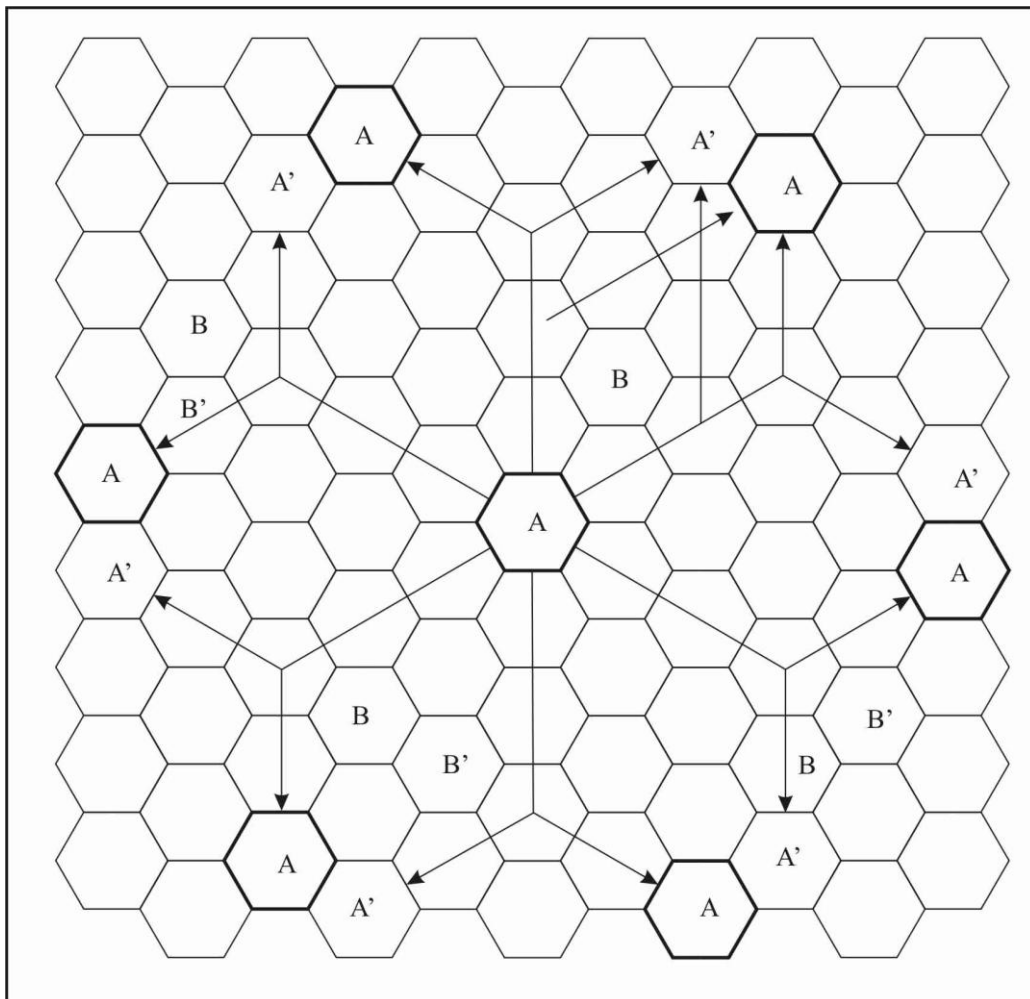


Рис.5.19 Алгоритм визначення спільноканалних комірок для $i=3, j=2$ ($N=19$)

Коефіцієнт рівня інтерференційних завад визначається наступними співвідношеннями (CIRF – Cochannel Interference Reduction Factor):

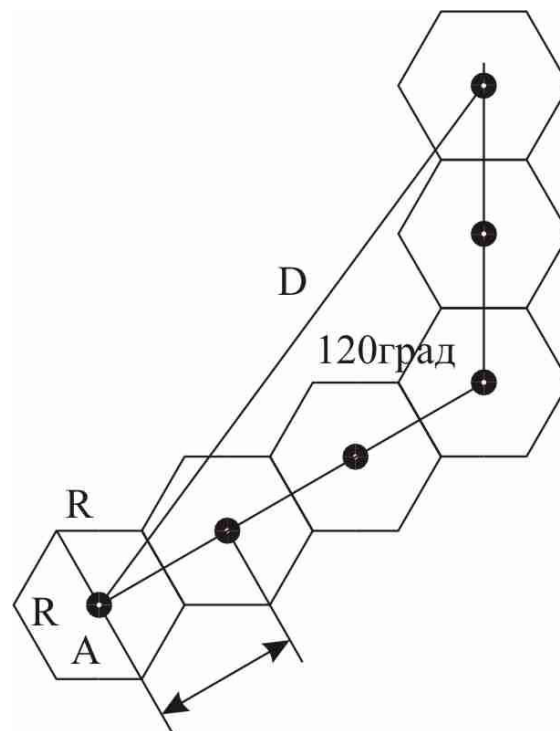
$$D = \sqrt{(jR\sqrt{3})^2 + (iR\sqrt{3})^2 - 2(jR\sqrt{3}) \cdot (iR\sqrt{3}) \cos 120^\circ} =$$

$$= R\sqrt{3}\sqrt{j^2 + ji + i^2} = R\sqrt{3N}$$

$$q = \text{CIRF} = D/R = \sqrt{3N}$$

$$N = 4; 7; 9; 12$$

$$q = 3.46; 4.6; 5.2; 6.0$$



$$R\sqrt{3} \quad N=19 \quad (i=3, j=2)$$

Рис.5.20 Залежність між D, R і N в гексагональній сітці

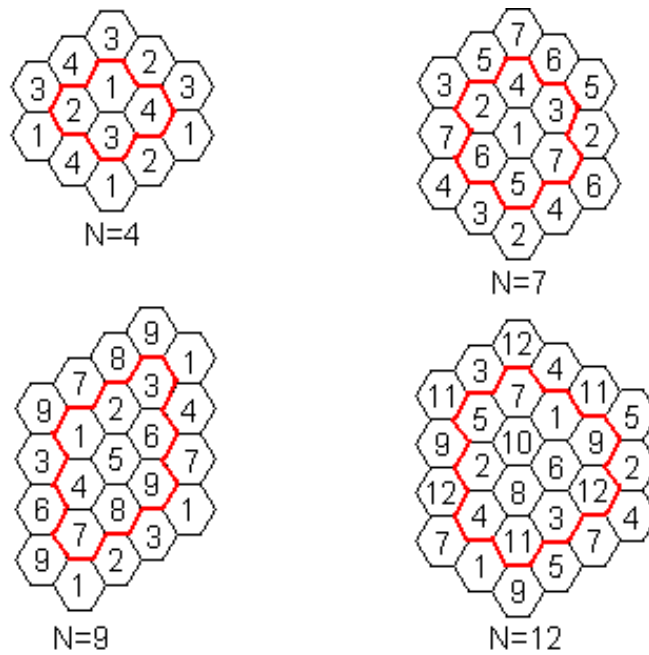


Рис.5.21 Приклади гексагональних сіток, що утворюють ансамблі з N=4, 7, 9 і 12 комірок

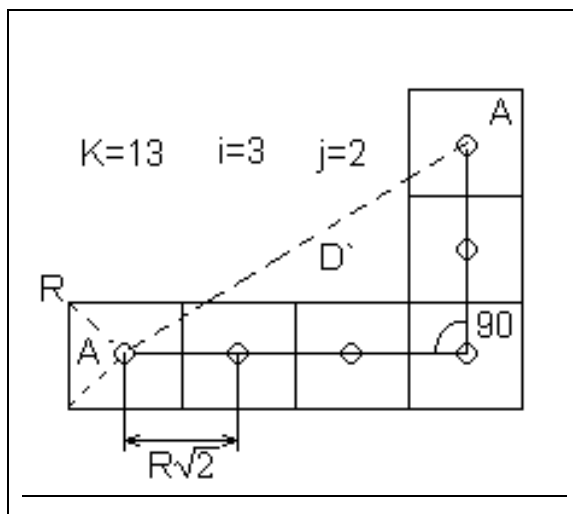


Рис.5.22 Геометричні залежності в квадратній сітці

$$D' = \sqrt{(iR\sqrt{2})^2 + (jR\sqrt{2})^2} = R\sqrt{2} \cdot \sqrt{i^2 + j^2} = R\sqrt{2K}$$

$$q' = CIRF = D/R = \sqrt{2K}$$

5.4.3. Спільноканальні інтерференційні завади

Практика проектування показує, що число N комірок в ансамблі в коміркових мережах приймається так, щоб як найбільше послабити вплив інтерференційних завад у сусідніх спільноканальних базових станціях, чи

абонентських станціях, що обслуговуються базовою. Як легко зауважити, чим більше число комірок N в ансамблі, тим вплив інтерференційних завад від сусідніх базових станцій, що працюють з однаковою групою радіоканалів, на якість передачі буде менший. Іншими словами, більше відношення потужності сигналу до потужності завад C/I в розмовному каналі отримується для більших значень N . З другої сторони збільшення числа N комірок в ансамблі економічно не вигідно. Тому в громадських коміркових мережах, в яких економічні питання виходять на перше місце, змагають до мінімізації відношення D/R , а потім і числа комірок в ансамблі N . Однак треба пам'ятати, що вибір оптимального значення D/R завжди компромісний між високою якістю передачі і великою ємністю мережі, чи числа споживачів коміркової мережі. В діючій на території США комірковій мережі системи AMPS вимагається відношення сигнал/завада на рівні не гірше ніж 18 дБ. Такий рівень забезпечує передачу телефонних сигналів в радіоканалі аналогових систем на рівні якості телефонних розмов в телефонній мережі загального користування. На рис. 5.23 приведено залежності якості передачі телефонних сигналів для аналогових, GSM і ADC систем в залежності від відношення C/I .

В системах рухомої радіокомунікації аналіз радіуса дії корисних і заважаючих базових станцій ґрунтується на простому поширенні радіохвиль із врахуванням землі. В таких моделях середня потужність корисного сигналу є обернено пропорційна до четвертої степені відстані. Використовуючи просту модель поширення радіохвиль, обмежують допустиме значення коефіцієнта інтерференційних спільноканальних завад q в мережі, що складена з гексагональних комірок, для якої відношення C/I більше від 18 дБ.

З рис. 5.24 виникає, що шість найближчих спільноканальних базових станцій до станції, яка локалізована в середині комірки A_1 , знаходяться на відстані D . Якщо прийняти, що станції мають ненапрявлену антену, то середня потужність корисного сигналу на вході приймача рухомої станції в комірці A_1 , буде пропорційна до R^{-4} , а потужність завад до $6 \cdot D^{-4}$. Тим самим відношення C/I можна представити як:

$$C/I = R^{-4} / 6D^{-4} = 1 / 6q^{-4},$$

а в децибелах:

$$C/I = 101g \frac{q^4}{6}.$$

В цій ситуації, для забезпечення в мережі необхідної якості передачі телефонних сигналів ($C/I \geq 18$ dB), значення коефіцієнта q повинно бути більшим від 4,41. Так як значення цього коефіцієнта пов'язане із числом комірок N в ансамблі залежністю

$$q = \sqrt{3 \cdot N},$$

то найменше число з ряду 1, 3, 4, 7, 9, 12, ..., для якого $q \geq 4.41$, дорівнює $N=7$. Для $N=7$ комірок в ансамблі відношення $C/I=18.72$ дБ, а $q=4.6$.

Проаналізовані нами випадки інтерференційних спотворень не можна віднести до найгірших. З метою оцінки числа N для найгіршого випадку використаємо рис. 5.25. Відношення C/I на вході приймача мобільної станції MS дорівнює:

$$\begin{aligned} \frac{C}{I} &= \frac{R^{-4}}{2(D-R)^{-4} + 2D^{-4} + 2(D+R)^{-4}} = \\ &= \frac{1}{2(q-1)^{-4} + 2q^{-4} + 2(q+1)^{-4}}. \end{aligned}$$

Якщо найгіршою з можливих ситуацій визнати випадок, коли радіус дії завади всіх шести спільноканальних станцій дорівнює $(D-R)$, то:

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-4}}{6(D-R)^{-4}} = \frac{1}{6(q-1)^{-4}}.$$

Це означає, що для отримання відношення $C/I \geq 18$ dB, при найгіршій із можливих конфігурацій, значення коефіцієнта q повинно бути більше, ніж 5.41. Найменше число N , для якого $q \geq 5.41$, є число $N=12$. Для $N=12$ коефіцієнт $q=6$, а відношення потужності до завади можна представити як: 20.17 dB $\leq C/I \leq$

22.45 дБ .

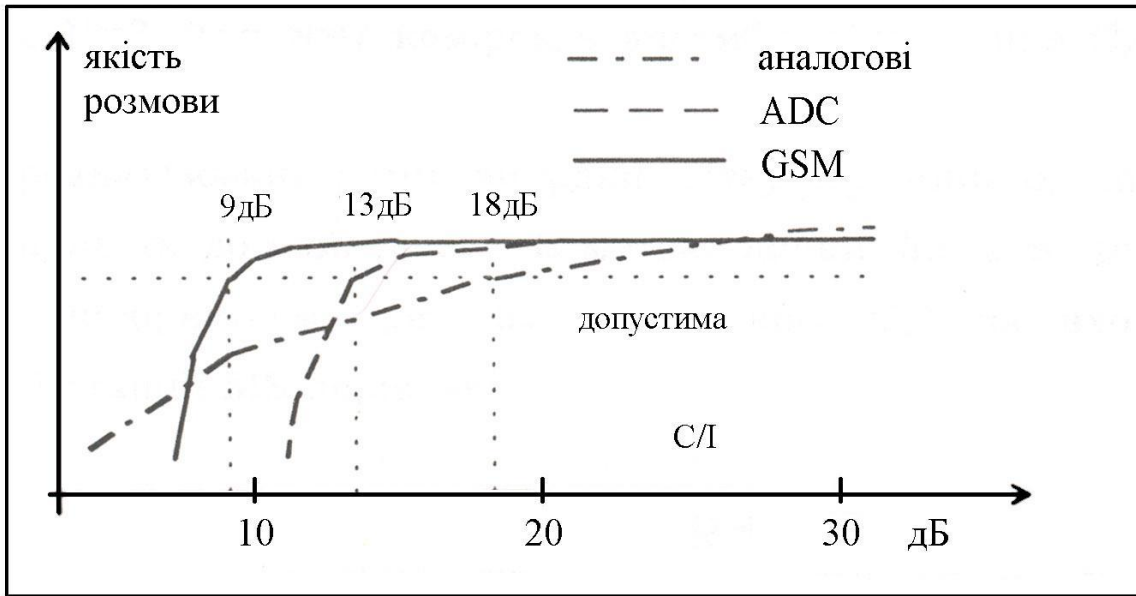
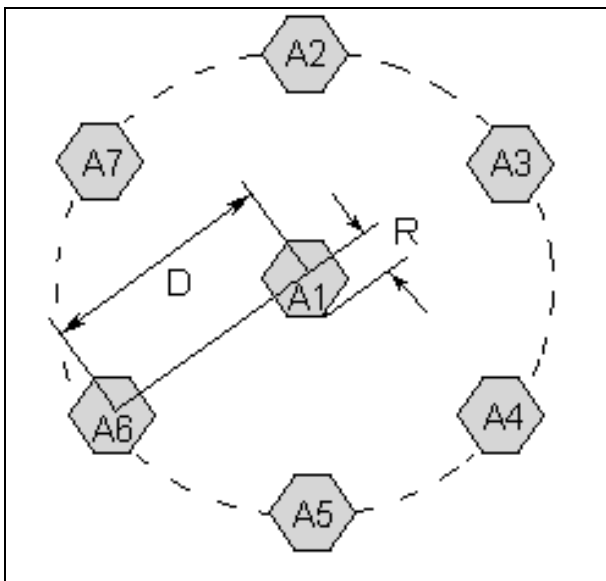


Рис.5.23 Якість передачі телефонних сигналів в коміркових мережах



$$C/I = R^{-4}/6D^{-4} = 1/6q^{-4}$$

$$C/I = 10 \lg \frac{q^4}{6}$$

$$q = \sqrt{3 \cdot N}$$

Рис. 5.24 Локалізація найближчих базових станцій в гексагональній мережі

З аналізу інтерференційних завад в комірковій мережі із базовими станціями, які мають ненаправлені антени, випливає, що мінімальне число комірок в ансамблі не може бути меншим, ніж $N=12$. Для тих самих базових

станцій, але працюючих в мережі із семикомірковим ансамблем, відношення потужностей С/І для найгіршого випадку буде рівне:

$$14.47 \text{ dB} \leq C/I \leq 17.35 \text{ dB}$$

і не буде достатня для забезпечення прийнятого критерію якості (18 дБ).

Зупинимось над питанням, як вплине на значення відношення С/І в мережі із семикомірковим ансамблем використання на базових станціях антен із шириною діаграми напрямленості на рівні половинної потужності, в 120 град і відповідно 60 град. Наслідком такої заміни антен буде розділ комірки на 3 (120 град) чи 6 (60 град) секторів, а також розділ числа каналів, які виділені базовій станції, на 3 чи на 6 розділених частотних підгруп. На рис. 5.26 представлено фрагмент коміркової мережі при N=7 мережі із секторними комірками з кутами 120 град. Чи 60 град. З аналізу рис. 5.26, для секторних комірок з 120 град, впливає, що рухома станція MS з комірки А1 піддана впливу двох спільноканальних базових станцій, тобто станцій А2 і А3. В мережі, що створена із секторних 60 град. комірок, та сама мобільна станція піддана впливу лише базової станції А2. Ці дві ситуації добре проілюстровані на рис. 5.27, на якому мобільна станція MS знаходиться в найгіршій позиції з точки зору інтерференційних завад. Для випадку на рис. 5.27а) відношення потужності С/І на вході приймача мобільної станції може бути подане як:

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-4}}{(D+0,7R)^{-4} + D^{-4}} = \frac{1}{(q+0,7)^{-4} + q^{-4}},$$

а для випадку на рис. 5.27b):

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-4}}{(D+0,7R)^{-4}} = \frac{1}{(q+0,7)^{-4}}$$

Після підстановки до попередніх рівнянь значень q=4.6 (N=7) отримаємо, що для секторних 120 град. комірок відношення С/І=24.56 дБ, а для секторних 60 град. комірок С/І=28.97 дБ, що значно перевищує рівень 18 дБ.

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-4}}{2(D-R)^{-4} + 2D^{-4} + 2(D+R)^{-4}} =$$

$$= \frac{1}{2(q-1)^{-4} + 2q^{-4} + 2(D+R)^{-4}}$$

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-4}}{6(D-R)^{-4}} = \frac{1}{6(q-1)^{-4}}$$

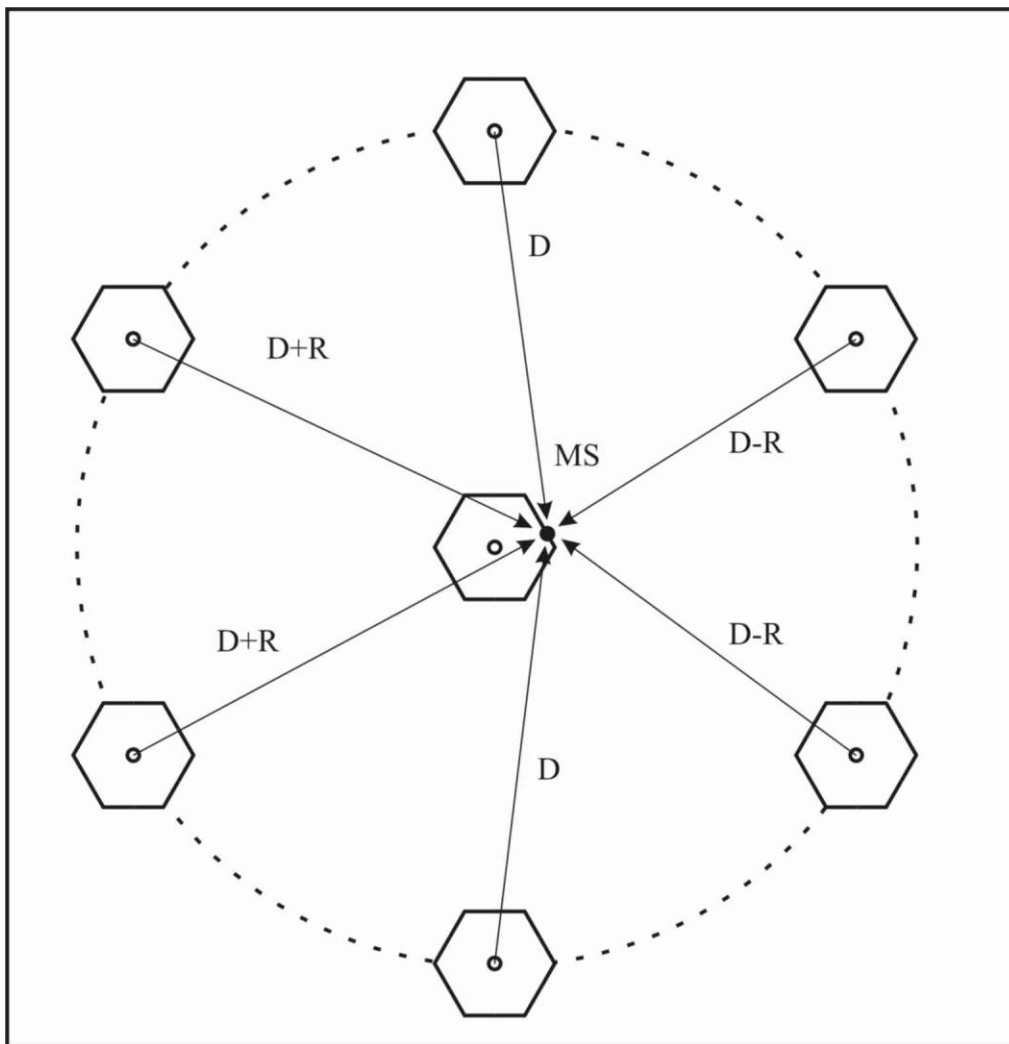


Рис.5.25 Найгірша конфігурація інтерференційних завад.

В таблиці 5.2 зведені значення відношення потужностей C/I на вході приймача мобільної станції в коміркових мережах з $N=3, 4, 7, 9, 12$ комірок в ансамблі і з різними характеристиками антен базових станцій.

Додатково в таблиці 5.2 зазначені (затінені поля) ті конфігурації коміркової мережі, які знайшли застосування на практиці (AMPS, NMT, TAGS). В цифрових системах ту саму якість в телефонному каналі, що і в системах аналогових, можна отримати при відношенні корисної потужності до потужності інтерференційних завад на рівні 13 дБ, або навіть на рівні 9 дБ (рис. 5.23).

5.4.4. Інтерференційні завади і ємність мережі

Коміркова технологія дала можливість отримати, практично, необмежену кількість абонентів.

Проблематика передачі радіосигналів, чи обслуговування абонентів в коміркових мережах має два взаємно-протилежні аспекти: аспект якості і кількості. Канал передачі в мобільних системах рухається разом із абонентською рухомою станцією. Для того необхідний постійний контроль якості сигналів, що піддаються сильним (глибоким) завмиранням та інтерференційним завадам. Цей контроль є дуже суттєвим, бо кількісний аспект вимагає зближення спільноканальних базових станцій на найменшу можливу відстань.

Кількісний опис роботи коміркової мережі базується на поняттях щільності телефонного руху (телетрафіку). Обмеження навантаження трафіка в групі виділених даній комірці радіоканалів проявляються у вигляді втрат, які найчастіше описуються значеннями імовірності блокади викликів новозгенерованих або перемикаючих розмов. Для постійного значення щільності телетрафіку, що обчислюється в ерлангах, на один квадратний кілометр поверхні при постійному опроміненні комірки, втрати тим більші, чим менше значення набору радіоканалів, що виділені коміркам в мережі. Питання якості обслуговування викликів разом із питанням якості передачі сигналів сильно пов'язані з проблемою вибору основної геометричної форми комірки а також числа комірок в ансамблі.

Розглянемо мережі, що утворені із квадратних та гексагональних комірок.

Кожна комірка квадратної сітки має чотири найближчих спільноканальних комірки (рис. 5.28), що розташовані на відстані D' , яка рівна:

$$D' = R\sqrt{2K},$$

де число K приймає значення $K=1, 2, 4, 5, 8, 9, \dots$

Гексагональна комірка має шість безпосередніх спільноканальних сусідів (рис. 5.24), які знаходяться на відстані D :

$$D = R\sqrt{3N},$$

де $N=1,3, 4, 7,9, 12,\dots$

$$q = D/R = 4.6$$

$$q = \sqrt{3} * N$$

$$N = 7$$

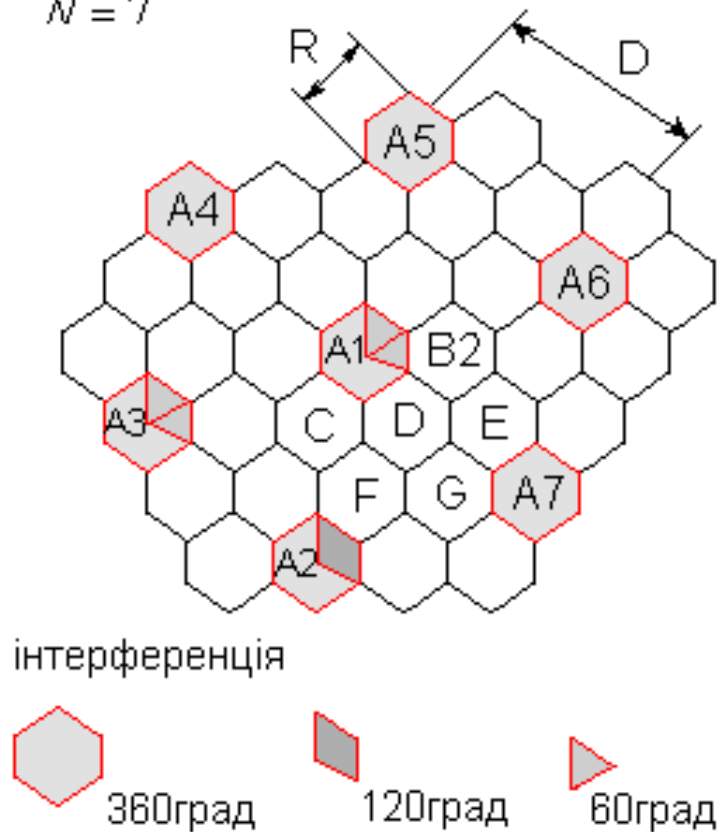


Рис.5.26 Конфігурація інтерференційних завад в мережі із семикоміркового ансамблю.

Нехай базові станції будуть розташовані в середині комірок і будуть мати ненапрямлені антени. Відстані, що відраховуються від середини до вершин

відповідної квадратної і гексагональної комірки, однакові і рівні R . Це рівнозначно тому, що радіуси дії базових станцій однакові в обох мережах. З моделі приземного поширення радіохвиль, що ґрунтується на залежності у четвертій степені, відношення потужності корисного сигналу до інтерференційних спільноканалних завад на вході приймача мобільної станції C/I для квадратної мережі буде рівне:

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-4}}{4D^{-4}} = \frac{1}{4q'^4}.$$

В аналогових мобільних системах відношення C/I , для забезпечення нормальної якості, повинно бути не менше ніж 18 дБ (рис. 5.23). Значення коефіцієнта спільноканалних інтерференційних завад для квадратної сітки буде:

$$10 \lg \frac{q'^4}{4} \geq 18 \text{dB},$$

$q' > 3.99$. Найменше ціле число для якого $q' > 3.99$ є $K=8$. При восьми комірках в квадратній сітці відношення C/I дорівнює 18.06 дБ. Для порівняння, в мережі з гексагональних комірок відношення $C/I=18.72$ дБ можна отримати вже при $N=7$. Менше число каналів в ансамблі - це менші втрати при однаковій щільності трафіку. В таблиці 5.3 представлено значення імовірності блокади викликів в одинарній комірці мережі, що збудована з квадратних і гексагональних комірок, для різного числа виділених системі каналів (112 і 224), а також значення щільності трафіку.

З таблиці 5.3 випливає, що при тих самих рівнях інтерференційних спільноканалних завад, гексагональна сітка відрізняється кращими параметрами руху, ніж квадратна. Тим самим вибір рівностороннього шестикутника, як оптимальної геометричної фігури, що створює просторово-спектральну структуру коміркової мережі, є виправданим.

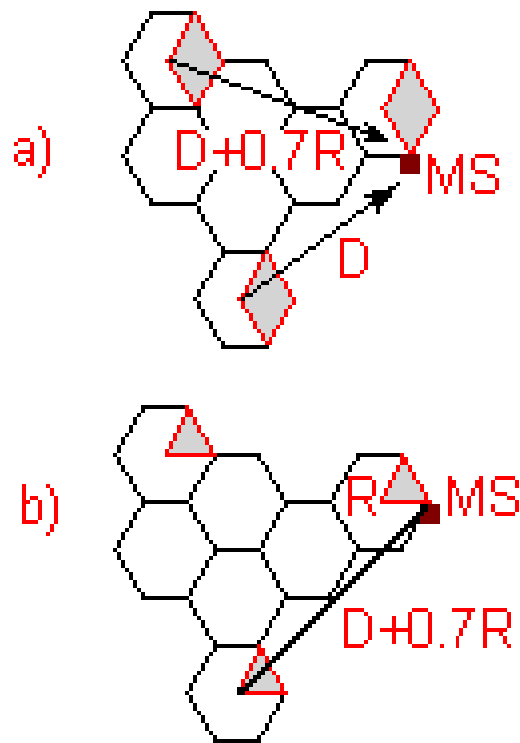


Рис.5.27 Визначення С/І для комірок: а) 120град.; б) 60 град.

Таблиця 5.2

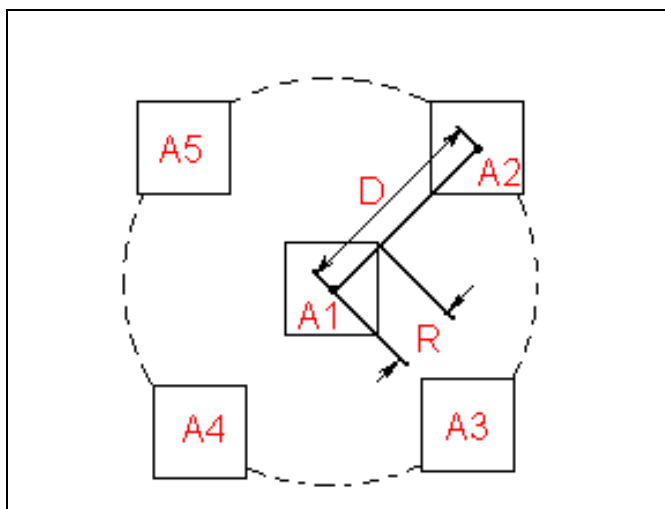
N	q	C/I dB		
		360	120	60
3	3.0	8.03	17.52	22.73
4	3.46	11.33	19.86	24.76
7	4.6	17.35	24.56	28.97
9	5.2	19.78	26.59	30.83
12	6.0	22.54	28.97	33.04

З точки зору критеріїв якості обслуговування викликів додаткових пояснень вимагає концепція мереж, що ґрунтується на секторних комірках. Такі комірки мають антени із шириною діаграми напрямленості на рівні половинної потужності рівною 120 град. Для того також проведено порівняння мереж, що збудовані із секторних комірок і мереж із комірками з ненаправленими антенами. Певна тривога відносно погіршення ємності мережі, що збудована на ансамблі гексагональних секторних (120 град) комірок, може

180

привести до розділу набору каналів, виділених комірці, на три розв'язані підгрупи. Кожна з трьох підгруп каналів обслуговує один сектор, поверхня якого рівна третині поверхні гексагональної комірки.

З даних, що були наведені в таблиці 5.2, випливає, що у випадку аналогових систем з гексагональними комірками і з ненапрямленими антенами число комірок в ансамблі рівне $N=12$ ($C/I=22.45$ дБ), а з секторними антенами (120 град) $N=7$ ($C/I=24.56$ дБ). Розглянемо систему із однакових комірок з радіусом $K=3.2$ км і 336 розмовних радіоканалів. Якщо поверхню гексагональної комірки апроксимувати колом з радіусом 3.2 км, то площа буде дорівнювати 32.17 кв.км. Площа поверхні одного сектора, відповідно 10.72 кв.км. Число розмовних каналів в комірці з ненапрямленою антеною становить 28, а в одному секторі мережі, при $N=7$ комірок в ансамблі, - 16. В таблиці 5.4 представлено, для різних значень щільності трафіку, імовірність блокади телефонних розмов в комірці з ненапрямленою і секторною антеною.



$$D' = R\sqrt{2K}$$

де число K приймає значення

$$K=1, 2, 4, 5, 8, 9, \dots$$

$$D = R\sqrt{3N}$$

де $N = 1, 3, 4, 7, 9, 12, \dots$

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-4}}{4D'^{-4}} = \frac{1}{4q^{1-4}}$$

Рис.5.28 Розташування найближчих спільноканальних базових станцій в мережі із квадратних комірок.

Обмеження навантаження трафіку, в групі виділених даній комірці радіоканалів, проявляються у вигляді втрат, які найчастіше описуються значеннями імовірності блокади викликів новозгенерованих або перемикаючих

розмов. Для постійного значення щільності телетрафіку, що обчислюється в ерлангах на один квадратний кілометр поверхні при постійному опроміненні комірки, втрати тим більші, чим менше значення набору радіоканалів, що виділені коміркам в мережі. Питання якості обслуговування викликів разом із питанням якості передачі сигналів сильно пов'язані з проблемою вибору основної геометричної форми комірки а також числа комірок в ансамблі.

В аналогових мобільних системах відношення С/І, для забезпечення нормальної якості, повинно бути не менше, ніж 18дБ (рис. 5.23). Значення коефіцієнта спільноканальних інтерференційних завад для квадратної сітки буде:

$$10\lg \frac{q'^4}{4} \geq 18\text{дБ},$$

$q' > 3.99$. Найменше ціле число для якого $Q^* > 3.99$ є $K=8$. При восьми комірках в квадратній сітці відношення С/І дорівнює 18.06дБ. Для порівняння, в мережі з гексагональних комірок відношення С/І=18.72дБ можна отримати вже при $N=7$.

Порівняння значення імовірності блокади викликів з останніх двох стовпчиків таблиці 5.4 приводить до висновку, що коміркова мережа, збудована на гексогональній секторній сітці, забезпечує не тільки кращу якість передачі, але надає кращі параметри по обслуговуванню трафіку.

5.5. Техніко-економічні аспекти практичної реалізації

Кожна, добре приготована до практичної реалізації, коміркова мережа вимагає складання проекту. Звичайно роботу над проектом починають від визначення регулярної сітки базових станцій, чи ряду точок, які представляють взаємне розташування антенних щогл базових станцій. На цьому етапі треба окреслити необхідну кількість базових станцій, а також територіальних комутаторів, що утворюють телекомунікаційну структуру коміркової мережі.

На рис. 5.29а представлено для прикладу сітку базових станцій. З представленої сітки можна утворити різні моделі гексагональних комірок. Одну модель, коли базові станції розташовані в середині комірок (англ. center-excited

cells), показано на рис. 5.29b. Друга модель, коли базові станції розташовані у трьох вершинах із шести гексагональної комірки (англ. corner-excited cells) (рис. 5.29c). Перша модель умовно ілюструє підхід, коли базові станції використовують ненапрявлені антени.

Таблиця 5.3

Щільність руху в ерл.	Імовірність блокади для мережі 112/8	Імовірність блокади для мережі 112/7	Імовірність блокади для мережі 224/8	Імовірність блокади для мережі 224/7
5	0.05%	0.005%	-	-
10	5.7%	2.2%	-	-
15	22%	14.5%	0.09%	0.005%
20	37%	29%	1.88%	0.34%
25	48%	41%	8.28%	3.08%

Таблиця 5.4

Щільність руху в Ерл./кв.км	Значення запропонован. руху в Ерл. в комірни 360гр. для N=12	Значення запропонован. руху в Ерл. в секторі 120гр. для N=7	Імовірність блокади в комірни 360гр. для N=12	Імовірність блокади в комірни 120гр. для N=7
0.47	15.12	5.04	0.09%	0.005%
0.54	17.37	5.79	0.49%	0.02%
0.58	18.66	6.22	1.01%	0.05%
0.71	22.84	7.61	4.96%	0.30%
0.81	26.06	8.69	10.1%	0.86%
1.67	53.72	17.91	49.7%	23.3%

Такий тип моделі сітки є застарілим і майже не застосовується в сучасних мережах. В другій моделі базові станції використовують три антени,

діаграмами напрямленості яких мають ширину на рівні половинної потужності 120 град (рис. 5.30).

Діаграми напрямленості кожної із антен формуються таким чином, щоб сумарна характеристика напрямленості всіх трьох антен повторювала гексагональну комірку. В останніх роках в коміркових мережах з цифровою передачею телефонних сигналів з'явилися нові сітки секторних комірок (рис. 5.31в), які дозволяють значну редукцію числа базових станцій (рис. 5.31а).

В сучасних коміркових мережах новий спосіб створення секторних комірок використовується у варіантах: 3/9 (GSM), 4/12 (JDC), 2/7 (ADC).

5.5.1. Антени базових станцій

Проблема вибору антен базових станцій тісно пов'язана із фінансовими можливостями. Основні вкладення коштів направляються на будівництво приміщень і антенних щогл. В початковій фазі побудови коміркової мережі інвестори змагаються до покриття визначеної поверхні мережі найменшою кількістю базових станцій. Тому часто приймають рішення на створення базових станцій із ненапрямленими антенами (англ. omnidirectional cell sites). Будівництво базових станцій із такими антенами вважається значно дешевшим, ніж із секторними. Можна показати, що більша вартість базових станцій із напрямленими антенами є уявною, бо такі станції дозволяють задовольнити різні потреби трафіка в значно меншій їх кількості, ніж дешевші з ненапрямленими антенами:

- По-перше - базові станції із напрямленими антенами забезпечують краще відношення потужності сигналу до потужності спільноканальних інтерференційних завад С/І, через використання властивостей напрямлених антен (рис. 5.26).
- По-друге - у випадку, коли порівнюються між собою коміркові мережі із ненапрямленими і напрямленими антенами, то при однаковому відношенні С/І, мережа із напрямленими антенами характеризується

меншим коефіцієнтом спільноканальних інтерференційних завад CIRF. Такий підхід приводить до меншого числа N комірок в ансамблі. Менше число комірок в ансамблі, в свою чергу, дозволяє виділити кожній комірці більше число розмовних каналів, що приводить до того, що мережа може обслуговувати більшу щільність трафіку (таблиця 5.4) при однаковій імовірності блокади розмов. Це може зсунути в часі вимоги утворення нових, менших комірок, а потім і будівництва нових базових станцій, з метою забезпечення більшої щільності трафіку.

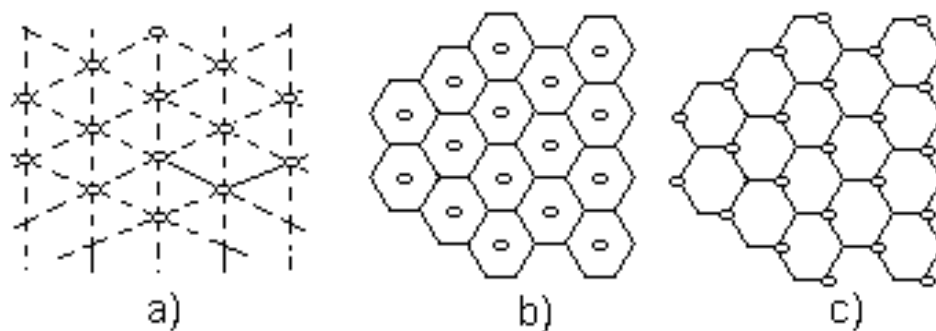


Рис.5.29 Розташування базових станцій в комірковій мережі

5.5.2. Локалізація антенних щогл базових станцій

Регулярна сіткова модель достатньо точно вказує на місце розташування антенних щогл. В практиці, однак, може виявитися, що немає можливості збудувати антенну щоглу там, де вказує модель.

Проблема відхилення від вимог проекту, в тому числі відхилення від точки локалізації антен базових станцій, треба розглядати з точки зору трьох критеріїв: коштів; якості передачі і ємності мережі, чи числа абонентів, що обслуговуються в часи пікового навантаження.

Детальний аналіз питання точності локалізації антени базової станції приводить до висновку, що локалізація антенної щогли базової станції найбільше впливає на якість передачі і майже не впливає на кошти та ємність мережі.

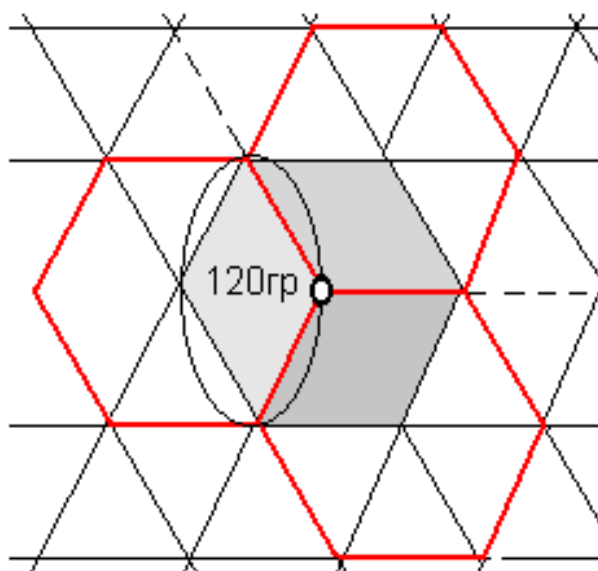


Рис.5.30 Діаграма направленості антени базової станції в мережі, що використовує секторні комірки

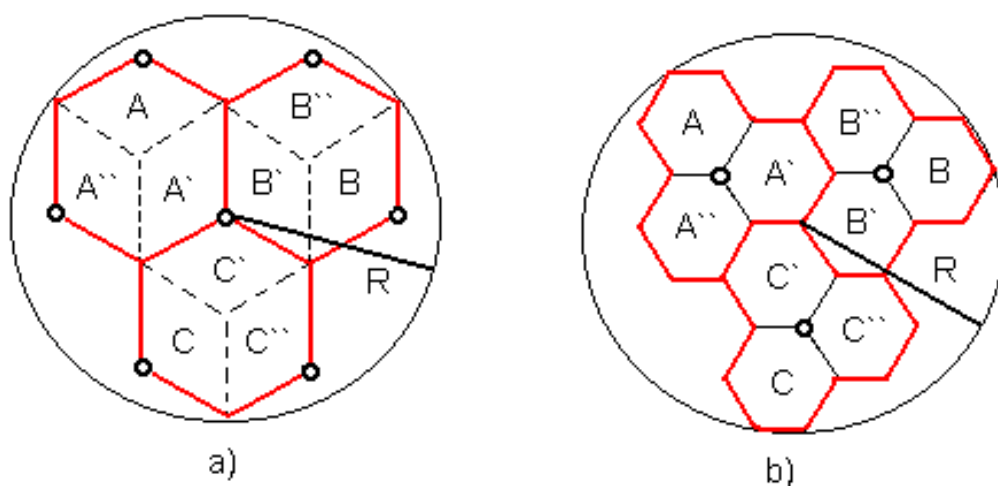


Рис.5.31 Варіант 3/9 коміркової мережі: а) старого і в) нового типів

Виходячи з цього, аналізуючи допустиме відхилення локалізації антен від оптимальної точки, що визначена сіткою, береться до уваги тільки вплив цього відхилення на погіршення відношення С/І. Практично приймається, що відхилення локалізації антен базової станції не повинно погіршувати відношення С/І більше ніж на 10%.

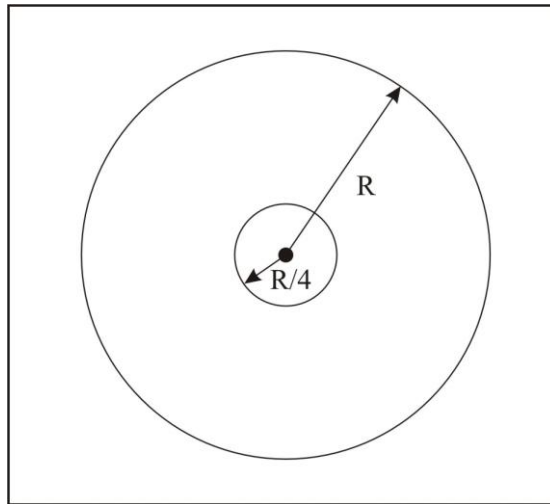


Рис.5.32 Локалізація антенної щогли базової станції

Це дозволяє розташовувати антенні щогли, по відношенню до оптимального, до $1/4$ радіуса комірки R (рис. 5.32).

5.5.3. Максимальний радіус комірок

Питання вибору максимального радіуса комірки становить частину дуже загальної проблеми отримання відповідного співвідношення між вкладеними коштами в коміркову мережу і якістю передачі, при недостатньому безпосередньому впливі максимального радіуса комірки на ємність мережі. З максимальним значенням радіуса комірки дуже сильно пов'язана потужність сигналу в радіоканалі, що також впливає на кошти і якість передачі в комірковій мережі. В громадських коміркових мережах потужності сигналів, що передаються із рухомих станцій, на порядок менші від потужності сигналів, які передаються базовою станцією.

На початку створення коміркової мережі встановлюється відносно великий розмір комірок, так, щоб їх число, необхідне для перекриття всієї території, було рівне або дещо більше від числа N зон в ансамблі. Такий підхід має дуже істотну перевагу. Полягає вона в тому, що конструктори мережі не стоять відразу перед проблемою виключення спільноканальних інтерференційних завад, які існують на даній території із своїм рельєфом, кліматом і забудовою, а

відштовхуються від проєктованих засад. В той же час, вся їхня увага може бути сконцентрована на пошуках високої якості передачі в радіоканалі, вибираючи відповідне відношення потужності корисного сигналу до потужності власних шумів приймального обладнання і технічних завад (англ. man-made noise). Вплив технічних завад на якість передачі в розмовному каналі коміркової мережі сильно залежить від індивідуального характеру завад в районі.

Дуже часто, на початковому етапі, збільшення потужності випромінених сигналів покращує якість передачі в радіоканалі. Однак, це тягне за собою зріст коштів, що призначені на експлуатацію мережі. З другої сторони це дозволяє зменшити число базових станцій, що в результаті може компенсувати затрачені кошти. Після закінчення початкового впровадження мережі і переходу до наступних етапів розвитку і розбудови мережі, значні фінансові переваги, що були пов'язані із збільшенням потужності сигналів, починають втрачатися.

Пристосовуючи мережу до нових, із більшою щільністю трафіку, умов, можна дійти до поділу великих комірок на менші з одночасним зменшенням радіуса дії базових станцій (рис. 5.33).

В коміркових мережах, що працюють в діапазоні 800 МГц-900 МГц, максимальна потужність, що подається на вхід передавальних антен рухомих станцій коливається на рівні від 10 до 11 дБВт. Впливає це із техніко-економічних можливостей масового передавального обладнання. Потужність передавачів базових станцій - 16 дБВт.

Рухомі станції звичайно використовують ненапрямлені антени із коефіцієнтом підсилення меншим ніж 2 дБ по відношенню до ізотропної антени, або 0 дБ, по відношенню до півхвильового диполя. На базовій станції монтуються антени із коефіцієнтом підсилення від 6 дБ до 8 дБ, по відношенню до півхвильового вібратора. Такі антени встановлюються на висоті від 30 до 60 м над поверхнею землі.

Якщо прийняти, що потужності передавачів і коефіцієнти підсилення антен базових станцій задані, то вибір максимального розміру комірки повинен бути компромісним між коштами і якістю передачі мовних сигналів в

радіоканалі. Іншими словами: чим більший радіус комірки тим менші кошти, але гірша якість передачі в розмовному каналі. Якість передачі мови в радіоканалі коміркової мережі не повинна бути гіршою від якості в стаціонарній телефонній мережі загального користування. Вимірювання в американській комірковій мережі AMPS показали, що якщо відношення потужності сигналу до потужності шумів на вході демодулятора FM становить 18 дБ, то якість передачі добра або дуже добра. Тому прийнято вважати, що достатня якість передачі в радіоканалі аналогових сигналів має місце тоді, коли відношення С/І більше 18 дБ на 90% поверхні, яка обслуговується. Численні дослідження фірми Bell AT&T в декількох містах США показали, що при вказаних рівнях потужності базових станцій і при певних умовах поширення радіохвиль, задовільне відношення С/І дає можливість створити комірки із радіусом дії в межах 12,87 км. При іншій передавальній потужності базової станції, коефіцієнті підсилення антени і умов поширення радіохвиль, максимальні розміри комірок можуть бути іншими.

5.5.4. Мінімальний радіус комірки

Наступна істотна справа, що пов'язана безпосередньо з практичною реалізацією коміркової мережі, це проблема окреслення мінімального значення радіуса комірки. Як відомо, з часом в деяких районах коміркової мережі може з'явитися потреба в розділі первинної комірки або сектори менших розмірів. Операція розділу первинної комірки виникає, по-перше, з факту приймання до мережі нового числа абонентів і по-друге, з рухливості самих абонентів, які можуть згромаджуватися в певному часі на невеликій території. Кожна коміркова мережа готова до протидії такому типу некорисних явищ без необхідності розширення зайнятих нею спектральних засобів.

У випадку появи на даній території мережі напруження телефонного руху, що перевищує попередні можливості послуг в комірці (рис. 5.33), впроваджуються нові базові станції при одночасному обмеженню радіусів дії старих.

Відносно простий алгоритм розділу гексагональної комірки дозволяє однозначно визначити місце локалізації нових станцій, ансамблі радіоканалів та ступінь зміни потужності передавачів. На рис. 5.34 представлено взаємне розташування трьох нових базових станцій D, E, F разом із вказанням виділених їм груп радіоканалів.

Групи радіоканалів нових станцій позначено арабськими числами 2, 5 і 7. Оскільки мережа складається із секторних комірок з кутом в 120 град., кожна група розділена на три розділені підгрупи, наприклад, група каналів, що позначена номером 2 складається з підгруп b, b', b". Місця розташування нових базових станцій визначаємо за допомогою накреслених відрізків, що зв'язують сусідні базові станції (відрізки АВ, ВС і АС). В середині кожного із відрізків, в точках D, E, F розташовуються нові станції (рис. 5.34).

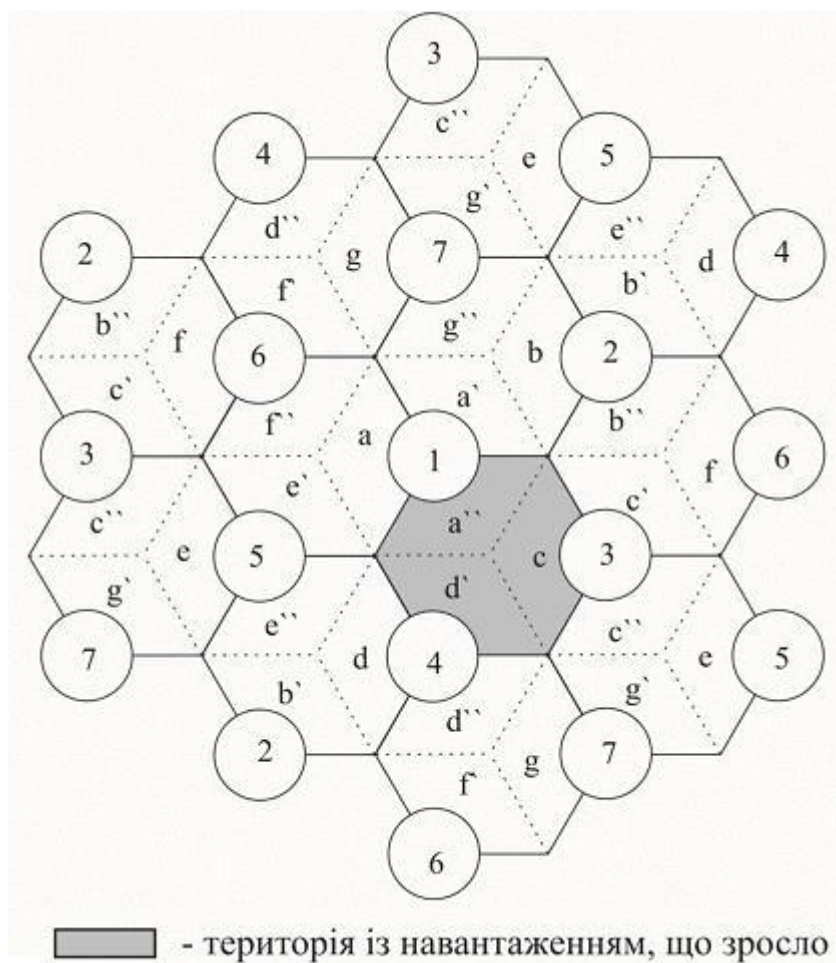


Рис.5.33 Вибраний фрагмент коміркової мережі із 7-ми комірковим ансамблем

Далі новим станціям виділяються групи каналів. З цією метою зв'язуються із собою прямою лінією дві найближчі спільноканальні станції з первинної мережі. Ці лінії проходять через точки розташування нових базових станцій. Для точки D це будуть точки I і J. В точках I і J знаходяться базові станції із групою каналів, що позначені номером 2. Всі нові базові станції, що є спільноканальними із старими, лежать посередині відрізка, довжина якого дорівнює координатній відстані $R = \sqrt{3N}$ первинної сітки (рис. 5.33), і використовують ту саму групу каналів. Наприклад, новій базовій станції, яка розташована в точці D, виділено групу каналів з номером 2, чи $\{b, b', b''\}$.

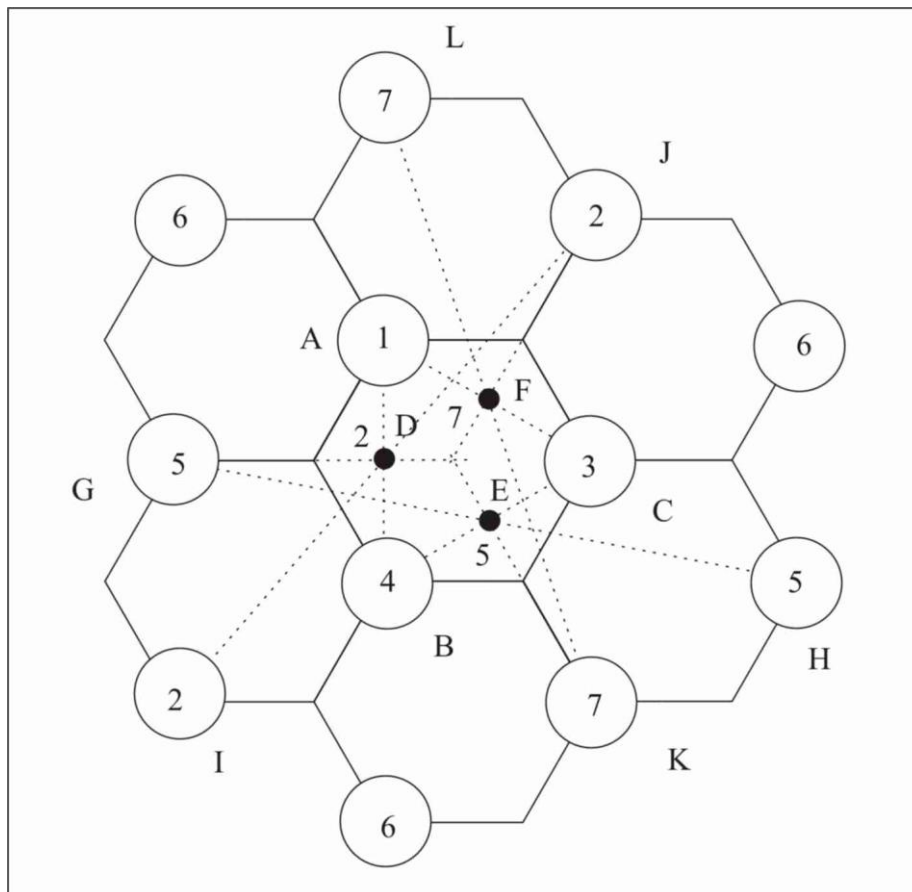


Рис.5.34 Визначення положення і груп каналів нових базових станцій

На рис. 5.35 представлено фрагмент коміркової мережі після поділу мережі, що була зображена на рис. 5.33, з метою забезпечення необхідних параметрів руху. Зменшення на половину радіуса дії нової комірки приводить

до поділу поверхні вихідної комірки на чотири нові. Зменшення поверхні комірки і виділення їй такого самого числа каналів, як і у первинної комірки, дає чотириразове збільшення її ємності (щільності руху). Таблиця 5.5 ілюструє це незвичке і корисне, з точки зору критеріїв руху, явище.

Кожний наступний поділ комірки приводить до росту числа базових станцій в комірковій мережі. Будівництво нових станцій вимагає додаткових фінансових витрат. Оскільки мережа має різну одночасну здатність послуг, капітальні вкладення можна розкласти на більшу кількість абонентів, не збільшуючи в такий спосіб коштів на експлуатацію всієї мережі. Операція впровадження до мережі нових станцій із меншим радіусом дії, а також скорочення дальності дії вживаних старих станцій, вимагає зниження потужності передавачів тих базових станцій.

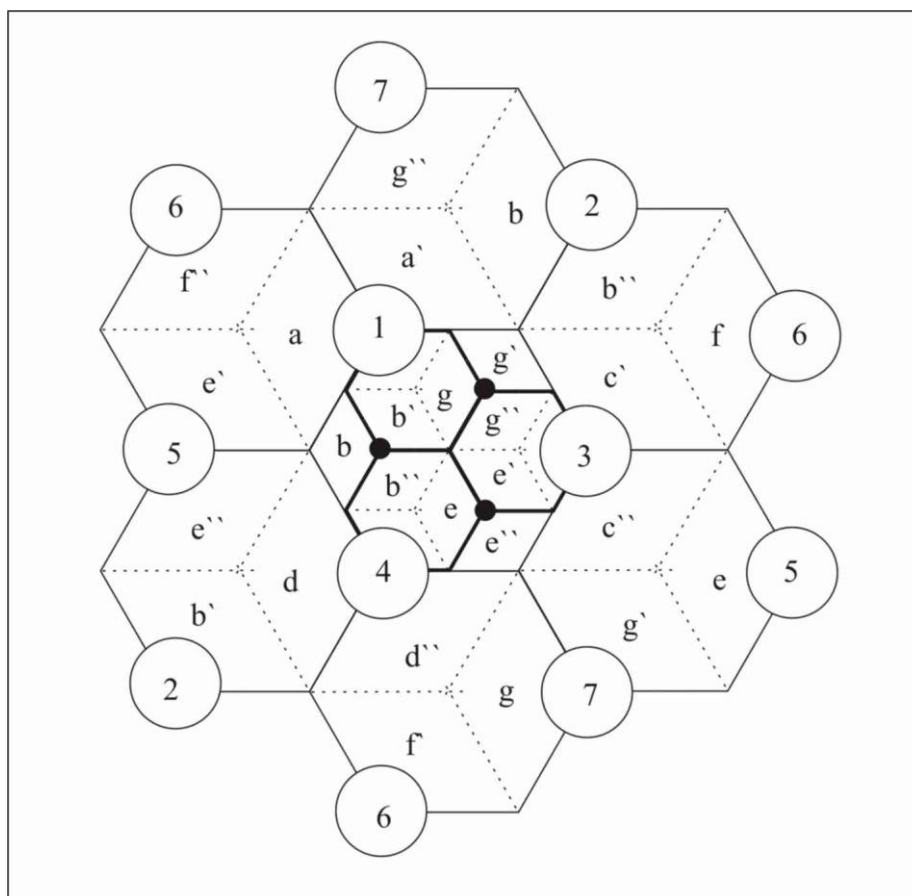


Рис.5.35 Фрагмент мережі (рис. 5.33) із впровадженням нових базових станцій

При дворовому зменшенні радіуса комірки і застосуванню моделі поширення радіохвиль, що базується на четвертій степені, зменшення потужності передавачів становить 12 дБ. Однак, при розділі великих комірок на менші, первинна коміркова мережа втрачає свою структурну однорідність, що призводить до істотної зміни електромагнітної сумісності всієї мережі.

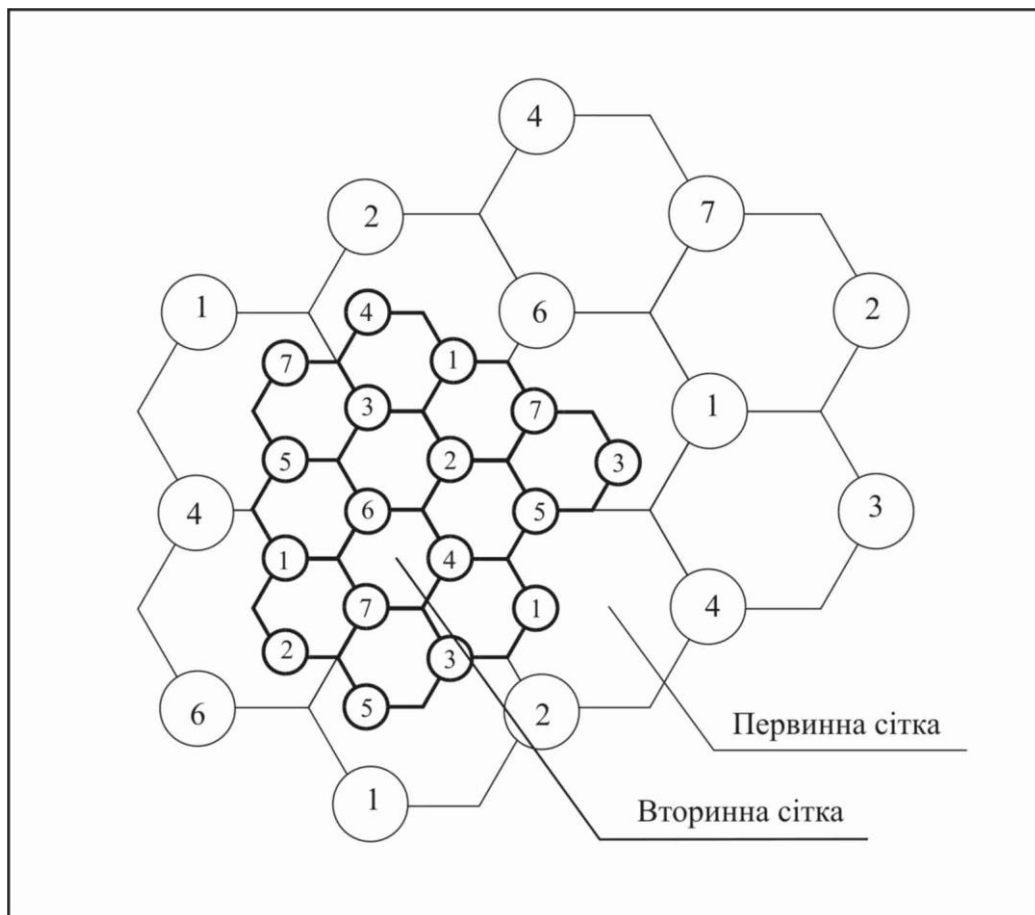


Рис.5.36 Первинна і вторинна сітки, що складаються із 7 комірок ($N=7$)

Приводить це до збільшення рівня інтерференційних завад в комірках нової вторинної мережі, яка накладена на первинну мережу (рис. 5.36). Подібно сильно відчувається зріст рівня інтерференційних спільноканальних завад в секторах комірок нової сітки. Детальніше ця ситуація ілюструється на рис. 5.37. З цього рисунка випливає, що найбільше завад в секторі е" комірки Е, через базові спільноканальні станції G і M, які розташовані на відстані $D/2$ і $\sqrt{3(D/2)}$,

де D -координатна відстань первинної мережі. Сектори e, e' комірки E піддаються впливу станцією $H (D/2)$ і $N (\sqrt{3}(D/2))$.

Це дуже негативне явище з точки зору критерію якості передачі в радіоканалі. Зріст рівня інтерференційних спільноканальних завад на вході приймача рухомої станції, на практиці, знімається за допомогою двох способів.

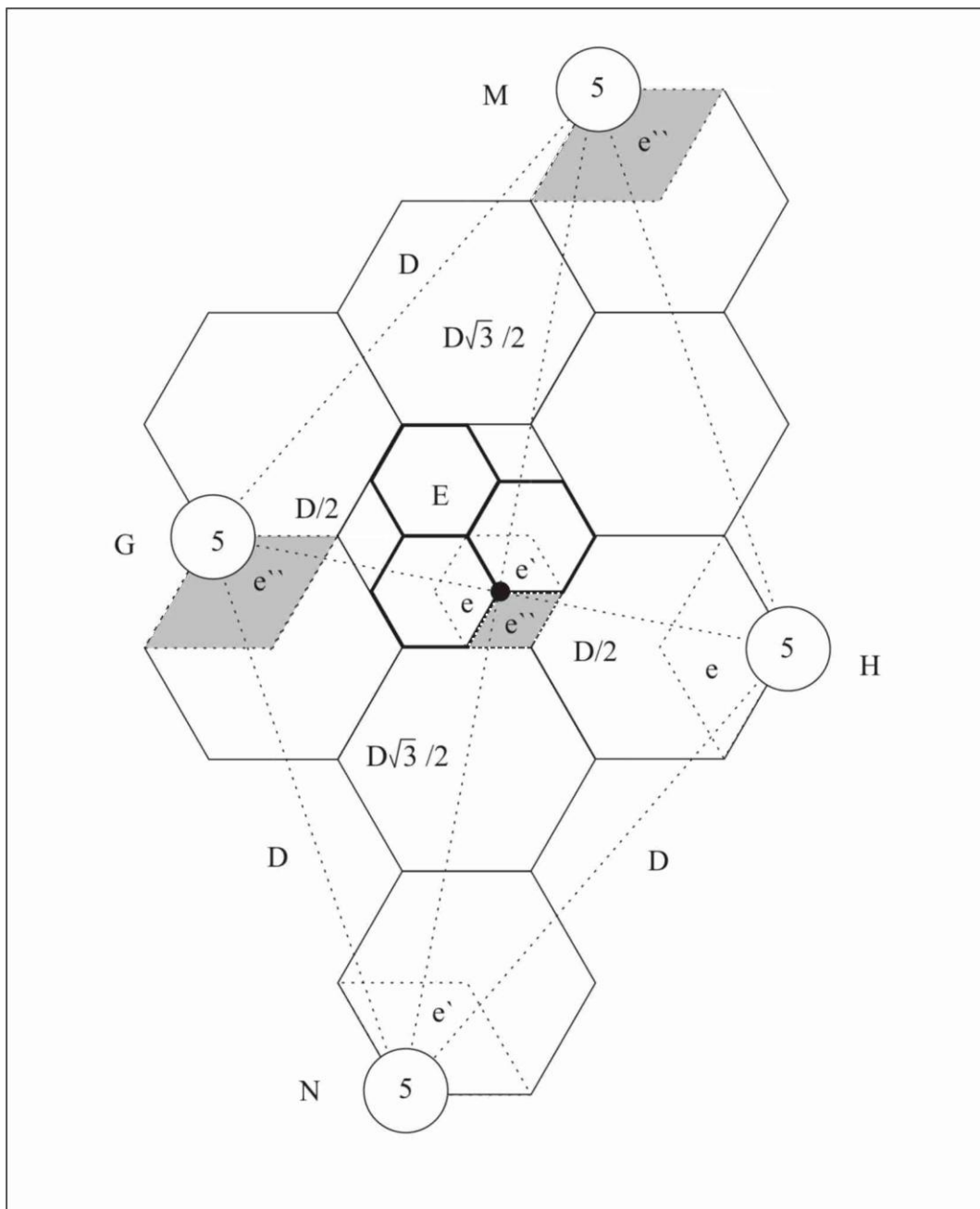


Рис.5.37 Джерела інтерференційних завад в неоднорідній комірковій мережі ($N=7$)

Перший спосіб полягає у виділенні в рамках підгрупи радіоканалів даного сектора або групи радіоканалів комірки, яка виділяється новій базовій станції (рис. 5.38). Радіосигнали в каналі цієї групи випромінюються із меншою потужністю з антен спільноканальних станцій, як нових так і старих. Такий підхід погіршує параметри руху мережі, поправляючи одночасно якість радіопередачі телефонних сигналів.

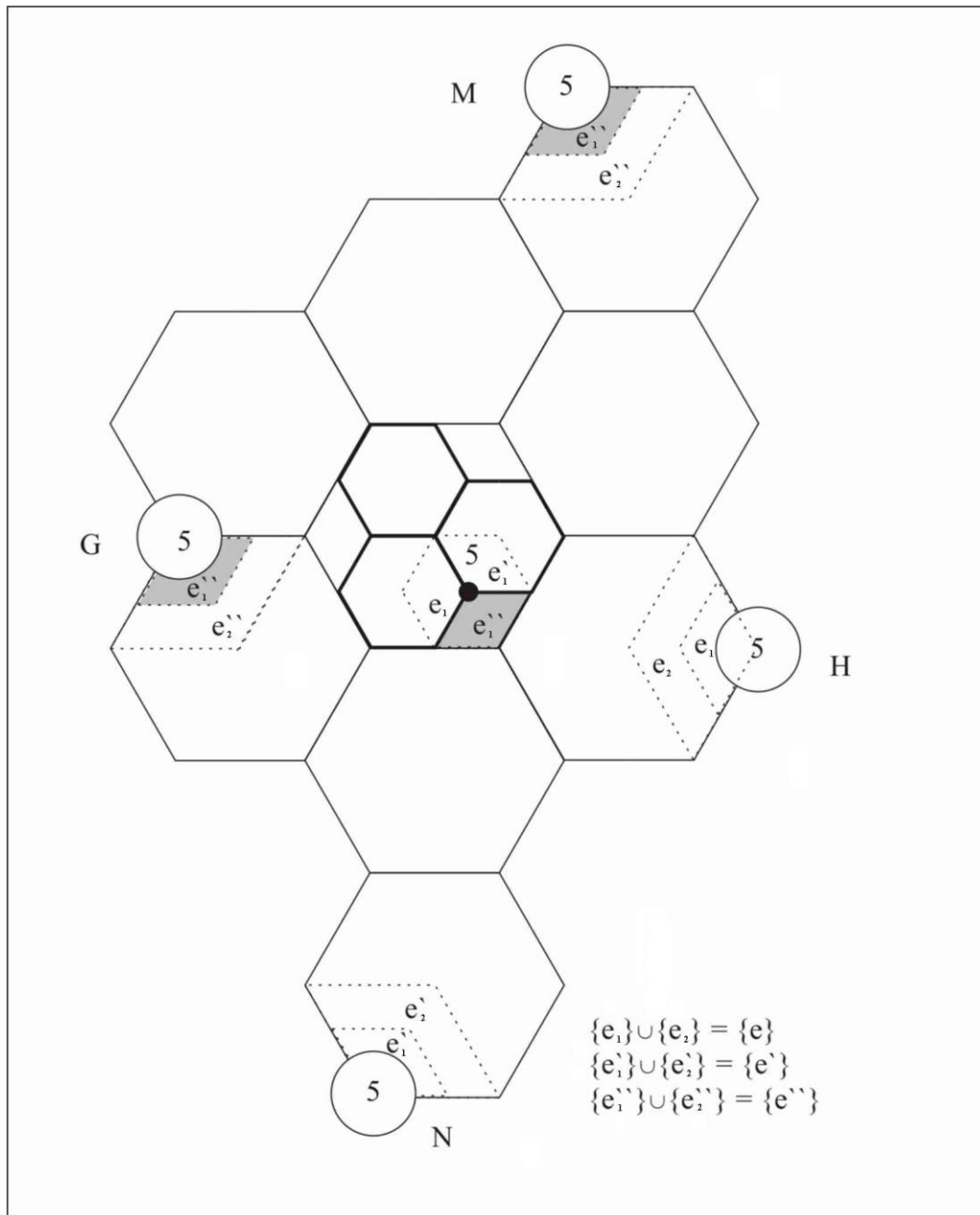


Рис.5.38 Зменшення інтерференції методом поділу каналів на групи в зменшених зонах дії

Другий спосіб приводить до змушеного, за рахунок зросту спільноканальних інтерференційних завад, поділу комірок, які необов'язково перевантажені обслуговуванням (рис. 5.39). При цьому, вигреш в ємності мережі залишається незмінним (таблиця 5.5), але різні тим часом експлуатаційні кошти, за рахунок будівництва нових станцій. Обидва способи виключення спільноканальних інтерференційних завад в комірках вторинної мережі використовуються на практиці.

Визначення кращого способу залежить від конкретної ситуації в даному районі коміркової мережі.

Дуже корисний, з точки зору трафіку, процес поділу комірки зустрічає в мережі сильні обмеження. Погіршення якості передачі, а отже і параметрів трафіку, коштів коміркової мережі змушують конструкторів до точного визначення мінімального розміру гексагональної комірки. В мережі системи AMPS мінімальний радіус гексагональної комірки прийнято в 1 земну милю (1.6 км). Це дозволяє, що найбільше, на триразовий поділ первинної, восьмимильної, мережі.

Таблиця 5.5

Щільність руху в Ерл/кв.км	Рух в секторі із радіусом		Імовірність блокування при	
	R=3.2 км	R=1.6 км	R=3.2 км	R=1.6 км
0.828	8.876	2.219	1%	$1.8 \cdot 10^{-7}\%$
0.917	9.828	2.457	2%	$7.2 \cdot 10^{-7}\%$
1.077	11.544	2.886	5%	$6.2 \cdot 10^{-6}\%$
3.311	35.504	8.876	57%	1%
3.666	39.312	9.828	61%	2%
4.306	46.176	11.544	66%	5%

Додаткова перепона в утворенні комірок із радіусом дії меншим ніж 1 миля, крім спільноканальних інтерференційних завад, полягає у проблемі

6.ЦИФРОВА СИСТЕМА КОМІРКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ GSM-900/1800

Ще кілька років тому система GSM відома тільки в вузькому колі спеціалістів, сьогодні робить блискучу кар'єру в цілому світі. Безперечно, вона є світовою переможницею в традиційних змаганнях між Європою, Північною Америкою і Японією. Крім країн Європи її прийняли десятки країн на інших континентах, а оператори з США та Японії підпишуть, правдоподібно, вже найближчим часом угоди, що дозволять абонентам їхніх мереж користуватися системою GSM. В Північній Америці розглядається також можливість застосування стандарту GSM для мережі особистого користування.

Блискуча кар'єра, яку роблять в цілому світі системи рухомих радіокомунікацій дивує кожного. А все ж почалося так недавно. Протягом довшого часу, починаючи з п'ятдесятих років, єдиними системами, що давали можливість безпроводної посылки адресованих повідомлень до індивідуальних споживачів, були визивні системи. Наступним кроком було впровадження диспозиторських систем, яке полягало в тому, що фірми викупляли виключне право на користування з певної частоти, на якій зв'язок забезпечувався за допомогою радіотелефонів. Однак це не була телефонія, тому що кожний споживач чув всі розмови, які відбувалися в даному діапазоні частот.

Про системи коміркового зв'язку тоді ще ніхто не знав, хоча принципи їх роботи були опубліковані вже в 40-х роках. Варто згадати, що ще в 1976 році в Нью-Йорку працювала система коміркового зв'язку, яка забезпечувала можливість одночасної розмови тільки 12-ти абонентам, зареєстрованими були в ній всього близько 500-т абонентів, а в черзі очікувало наступних 3700 осіб. Переломними були 80-ті роки, коли введено було в дію аналогові системи коміркового зв'язку. З того часу по сьогоднішній день в світі конкурують кілька несумісних між собою аналогових систем, серед яких лідерами є: скандинавська система NMT і американська система AMPS, що відома в Європі під назвою TACS. Аналогові системи зробили можливим доступ до коміркового зв'язку в Європі сотням тисяч абонентів. Країни, що найдалше

просунулися у впровадженні безпроводного зв'язку, такі як Фінляндія чи Швеція, досягли на початку 90-х років густоти абонентів коміркового зв'язку понад 5%. В інших найбільш розвинутих країнах світу ця густина не перевищує 1-2%.

В вісімдесятих роках ємність аналогових систем коміркового зв'язку, що були проєктовані на цілі десятиліття, почала вичерпуватись. Поступово зростала популярність аналогової телефонії в великих та відносно заможних районах таких, як Сполучені Штати, Австралія чи Скандинавія. Це були ознаки перелому, що наближався. Деякі спеціалісти почали усвідомлювати, що в галузі безпроводного зв'язку існує набагато більший ринок, ніж намічалось раніше. Кожний з двох найбільших конкурентів: Європа та США застосував інший підхід. В Північній Америці, традиційно, зроблено ставку на вільний ринок, віддаючи ініціативу окремим фірмам. В Європі на протязі вісімдесятих років тривала праця над створенням спільного, як тоді думали, загальноєвропейського, стандарту системи коміркового зв'язку. З другої половини вісімдесятих років було вже відомо, що це буде цифровий стандарт.

Успіх стандарту GSM став очевидним вже в кінці вісімдесятих років, багато місяців перед тим, як був зареєстрований перший абонент. Введення в найближчому часі стандарту, здатного забезпечити потреби десятків і навіть сотень мільйонів абонентів, викликало лавинний ефект. На протязі всього лиш кількох місяців, на зломі 80-х і 90-х років, система GSM була прийнята в декількох десятках країн на чотирьох континентах і стала найбільш популярною системою коміркового зв'язку. На протязі трьох років кількість абонентів системи коміркового зв'язку в Європі потроїлась. Завдяки успіхові системи GSM набрало популярності поняття особистого зв'язку і проєктуються системи наступної генерації. Серед фахівців щораз частіше звучить: *the world goes mobile*.

Процес створення системи GSM розпочався на початку 80-х років. В 1982 році в рамках європейського союзу CEPT (фр. Conference Europeene des Postes et Telecommunications) був створений робочий колектив, що отримав назву

“Groupe Special Mobile” - скорочено GSM. Завданням цього колективу мало бути створення стандарту коміркової системи, який був би спільним для всієї Західної Європи. Організатори порозуміння СЕРТ вирішили також завчасно зарезервувати для майбутньої системи дві ділянки частоти в діапазоні 900 МГц. На цьому етапі досліджень ще не було відомо, що проектувана система буде цифровою. Перша зустріч групи GSM відбулася в грудні 1982 року в Стокгольмі. Учасниками цієї зустрічі були представники 11 країн.

Дослідження колективу GSM набрали розмаху в другій половині вісімдесятих років, коли виявилось, що частина аналогових систем коміркового зв'язку, які працюють в Європі через кілька років наблизяться до межі своєї ємності. З'явилися спроби тимчасових розв'язків цієї проблеми, серед яких пропоновано прийняття аналоговими системами частини ділянок частот, що були зарезервовані для майбутнього загальноєвропейського стандарту. Справа набрала такого розголосу, що її було внесено як один з пунктів, обговорюваних на зустрічі керівників країн членів Європейської Спільноти в грудні 1986 року. Результатом зустрічі було резервування двох ділянок частоти навколо 900 МГц, дещо менших, ніж пропонувалося раніше СЕРТ для виключного використання майбутньою загальноєвропейською системою рухомої радіокомунікації, відкриття якої передбачалося на 1991 рік.

До 1986 року в рамках колективу GSM відбувся значний поступ в створенні основ специфікації нової системи. Колектив відважився на реалізацію повністю цифрової системи, що було продиктовано можливістю досягнення кращої ефективності використання радіодіапазону та вищої якості трансмісії. Цифрова система давала також можливість реалізації нових послуг, а також значної розбудови деяких інших параметрів порівняно з аналоговим розв'язком. Було передбачено використання рівневої структури високого рівня інтеграції VLSI, що дало б можливість конструювати менші і дешевші термінали, навіть кишенькові термінали. Вирішено було також, що майбутня система стикуватиметься з цифровою мережею з інтеграцією послуг ISDN. В результаті досліджень, які проводились в кількох країнах одночасно, вирішено

було питання про вибір методів багатодоступності: поєднання частотного FDMA та часового розділення каналів TDMA. Опрацьовано також ключові інтерфейси системи.

У вересні 1987 року скликано форум для порозуміння майбутніх операторів систем GSM під назвою “GSM Memorandum of Understanding” (MoU). До порозуміння приступили оператори з 13 європейських країн. Метою порозуміння стала координація питань стандартизації, планування впровадження послуг, а також опрацювання умов ратифікації і взаєморозрахунків між операторами. Місцем знаходження офісу порозуміння MoU є Дублін в Ірландії.

В 1988 році розпочато інтенсивне тестування, що стосувалося зокрема радіоінтерфейсу. Тестування виявило, що система GSM працює задовільно. З 1988 по 1992 рік, після створення інституту ETSI, питання стандартизації GSM продовжувалося в рамках ETSI. Група GSM стала одним з робочих колективів ETSI і була поділена на чотири підрозділи, так звані SMG 1-4. Скорочення GSM отримало також нове значення: **Global System for Mobile communications**, яке мало віддзеркалювати загальносвітові, або принаймні, понадєвропейські межі охоплення системою територій.

В 1990 році, перед завершенням роботи над початковою версією стандарту GSM, який, як передбачалося мав працювати в діапазоні 900 мГц, на вимогу Великобританії було опрацьовано пропозиції щодо версії системи GSM, яка працювала б в діапазоні частот 1800 мГц і використовувалася б в густонаселених міських районах. Цей варіант було названо DCS1800.

Узгоджена раніше дата комерційного запуску системи, 1 липня 1991 року, не була дотримана. Основною причиною були нерозроблені гомологаційні тести, які дозволяли б тестувати пристрої майбутньої системи. Більше часу, ніж початково було намічено, зайняло також конструювання кишенькових терміналів GSM, які з`явилися тільки в другій половині 1992 року. Перша система GSM, була показана в жовтні 1991 року на виставці TELECOM`91 в Женеві.

В квітні 1992 року відважились на розробку обмеженої кількості гомологаційних тестів ІТА, для використання в перехідному періоді, на час до стандартизації повних вимог. Це дозволило відкрити перші комерційні мережі GSM, які відповідали вимогам першої фази стандарту. На початковій стадії роботи системи не були ще доступними навіть всі послуги першої фази. В червні 1992 року було підписано першу угоду про співпрацю і взаємодоступ послуг між оператором британським (Vodafone) та фінським (Telecom Finland).

Рік 1993 - це бурхливий розвиток системи GSM. До кінця 1993 року кількість країн, чиї оператори підписали МоU збільшилась з початкових 13 до 45 країн з кількох континентів. Запущено 30 систем GSM, загальна кількість абонентів перевищила мільйон, видано 50 наступних ліцензій, а в Великобританії запущено першу систему DCS 1800 (Mercury One-2-One). До кінця 1993 року оператори понад 20 систем були вже зв'язані угодами про взаємодоступ послуг. Рік 1994 - це дальший інтенсивний розвиток системи. В кінці 1994 року, лише після 30 місяців від початку роботи комерційної системи GSM, у світі вже працювало понад 60 систем GSM з понад 4-ма мільйонами споживачів, а порозуміння МоU підписали вже понад 100 керівників з понад 60 країн.

Система GSM належить до так званої другої генерації систем коміркового зв'язку. Передбачається, що в 2000-х роках буде впроваджена наступна генерація безпроводних систем, так званих систем особистого зв'язку.

6.1. Архітектура системи GSM

6.1.1. Функціональний поділ системи GSM

На рис. 6.1 показано функціональну схему типової системи GSM та описано, як з точки зору функцій, що їх виконують окремі фрагменти системи, можна поділити її на такі частини:

- комплект базових станцій (англ. Base Station Subsystem - BSS);
- комутаційно-мережна частина (англ. Network and Switching Subsystem - NSS);

- рухомі станції (англ. Mobile Station - MS);
- комплект експлуатації та обслуговування (англ. Operation and Maintenance Subsystem - OMS);

6.1.1.1. Ансамбль базових станцій

З принципів побудови системи рухомого радіозв'язку випливає, що основним способом створення такої системи є коміркова структура. В кожній комірці є одна базова станція. Комплект базових станцій відкриває доступ рухомим станціям до стаціонарної частини системи GSM і далі, по потребі, до інших телекомунікаційних систем.

Ансамбль базових станцій в системі GSM має двоохривневу структуру. На рівні, ближчому до комутаційно-мережної частини, знаходяться блоки управління базовими станціями (контролери базових станцій). На нижчому рівні в кожній комірці знаходиться базова станція.

- **БАЗОВА СТАНЦІЯ** (англ. Base Transceiver Station - BTS) має зв'язок з рухомими станціями через радіоінтерфейс. Кожна з комірок має одну базову станцію, на яку надходять всі розмови (з'єднання) з даної комірки. Базова станція складається з передавача і приймача радіосигналів, антени та пристроїв перетворення сигналів, що характерні для радіоінтерфейсу. Базова станція є інтерфейсом між стаціонарними лініями (кабельні, оптичні, або стаціонарні радіолінії) до контролера базових станцій та радіолінії до рухомих станцій.
- **КОНТРОЛЕР БАЗОВИХ СТАНЦІЙ** (англ. Base Station Controller - BSC) з'єднаний з одного боку з кількома або кількома десятками базових станцій, виконують відносно них функції управління. Контролер базових станцій керує такими функціями як перемикання каналів (англ. handover) та управління потужністю рухомої станції (англ. power control). З іншого боку контролер базових станцій під'єднаний до територіальної комутаційної системи MSC (англ. Mobile Switching Centre).

Описана вище структура ансамблю базових станцій відповідає поділу на обладнання, яке виконує трансмісійні функції (базові станції) та обладнання, яке виконує функції управління (контролери базових станцій). Всі вище згадані інтерфейси стандартизовані. Інтерфейс між рухомими станціями і базовими носить назву радіоінтерфейсу, стик між базовими станціями та контролерами базових станцій названо інтерфейсом A-bis, а стик контролерів базових станцій з MSC названо інтерфейсом A. Стандартизація стиків дає можливість взаємодіяти в рамках однієї системи різними модулями, що виготовлені різними виробниками.

6.1.1.2. Комутаційно-мережна частина

В комутаційно-мережній частині реалізуються основні комутаційні функції системи GSM. Разом з MSC в ній є база даних, в якій знаходиться інформація про зареєстрованих користувачів системи, і вся інформація, яка необхідна для управління “рухливістю” абонентів (англ. mobility management) та реєстр даних, які перевіряються в момент ідентифікації і контролю прав користувача. Комутаційно-мережній частині надані функції, що необхідні для взаємодії з іншими телекомунікаційними мережами

Центральним модулем комутаційно-мережевої частини є автоматична комутаційна станція (АКС) коміркової системи (рис. 6.1).

- АВТОМАТИЧНА КОМУТАЦІЙНА СТАНЦІЯ РУХОМОЇ СИСТЕМИ - MSC (англ. Mobile Switching Centre) виконує комутаційні функції між двома абонентами системи GSM, або між абонентом системи GSM та абонентами інших телекомунікаційних систем. Це може бути, наприклад, стаціонарна телефонна мережа, така як ISDN, мережа передачі даних, інша коміркова система і т. п. З одного боку MSC має зв'язок через інтерфейс A з контролерами базових станцій, а через них з рухомими станціями.

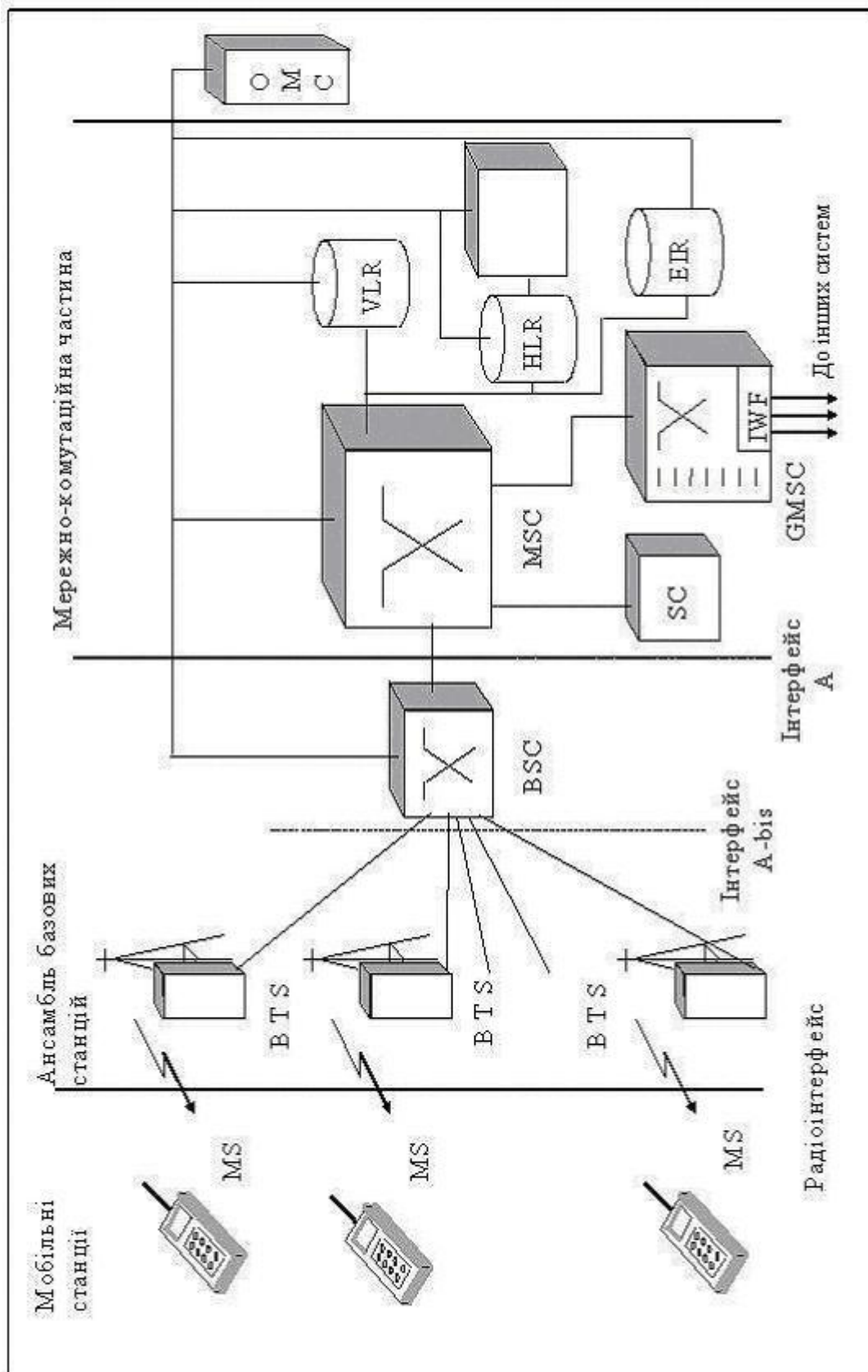


Рис. 6.1. Функціональна схема типової системи GSM

З іншого боку, MSC з'єднана з іншими MSC даної системи GSM, втому числі транзитною автоматичною комутаційною станцією GMSC, яка дозволяє встановити зв'язок з іншими системами. При цьому використовують модуль узгодження IWF (англ. InterWorking Functions). Цей модуль може бути непотрібним у випадку, коли послуги, що надаються системою GSM, узгоджуються з послугами, які надають стаціонарні системи. На відміну від АТС, які працюють в стаціонарній телефонній мережі, комутаційна станція MSC виконує додаткові функції, що впливають з "рухомого" характеру абонентів, такі як: *реєстрація місця знаходження абонента, посилка виклику абонентам, передача криптографічних параметрів з метою шифрування трансмісії і т.п.* Комутаційно-мережна частина системи GSM реалізує деякі функції, що пов'язані з рухливістю абонента. Проблема є відносно простою, якщо рухомий абонент дзвонить до абонента зі стаціонарної мережі, місце знаходження якого відоме. Якщо ж абонент, якого викликають є рухомих, то система GSM повинна спочатку визначити актуальне місце перебування рухомої станції, яку викликають. Викликаючий абонент часто не має інформації про місце знаходження абонента, якого він викликає. Отже необхідною є система, яка б слідкувала за рухом абонента на території, яку охоплює мережа GSM. З цією метою створені дві бази даних, які називаються реєстрами HLR та VLR.

- РЕЄСТР ВЛАСНИХ СТАНЦІЙ - HLR (англ. Home Location Register). В кожному районі, що обслуговується даним оператором системи GSM є один або кілька реєстрів HLR. В момент реєстрації абонента в оператора системи (викупу абонементу), до реєстру власних станцій HLR вносяться дані нового абонента. Вони стосуються прав абонента, в них знаходиться інформація, що дозволяє ідентифікувати користувача та інформація про актуальне місце перебування даної рухомої станції. В останньому випадку це є адреса MSC, на території якої зараз знаходиться рухома станція. Ця інформація змінюється зі зміною місця перебування рухомої станції.

- РЕЄСТР ГОСТЬОВИХ СТАНЦІЙ - VLR (англ. Visitors Location Register) - це другий реєстр, який бере участь в процесі слідкування за зміною положення рухомої станції. Реєстр VLR містить інформацію про абонентів, які зараз знаходяться на території, що обслуговується спорідненою MSC. Як тільки рухома станція перетинає межі нової території реєстр VLR, який має зв'язок з обслуговуючою цей район MSC, вимагає від реєстру HLR, в якому чужа станція зареєстрована постійно, даних про нового для себе користувача. Одночасно реєстр HLR отримує від реєстру VLR і запам'ятовує інформацію про нове місце перебування рухомої станції. В реєстрі VLR знаходяться набагато конкретніші дані про локалізацію рухомої станції ніж дані з реєстру HLR. У випадку коли описана нами рухома станція вимагатиме з'єднати її з ким-небудь, реєстр VLR буде вже мати всю інформацію, потрібну для порівняння, без необхідності звертатися в кожному випадку до реєстру HLR.

В системі GSM функціонують два типи комутаційних станцій - звичайні MSC, описані раніше, та транзитні GMSC.

- ТРАНЗИТНА КОМУТАЦІЙНА СТАНЦІЯ - GMSC (англ. Gateway Mobile Switching Centre) є перехідною між системою GSM та іншими телекомунікаційними системами. У випадку, коли абонент стаціонарної мережі викликає рухомого абонента, АТС стаціонарної мережі спочатку встановлює з'єднання з найближчою транзитною станцією GMSC. Часто нею є одна зі звичайних станцій, але обладнана в додатковими модулями спряження - IWF. Транзитна станція GMSC відіграє важливу роль в правильному ході виконання з'єднань до абонентів системи GSM. Спочатку вона від материнського реєстру HLR комутаційної станції MSC одержує дані про актуальне місце знаходження абонента, якого викликають. Далі транзитна станція GMSC керує з'єднанням безпосередньо від абонента, якого викликають до саме його комутаційної станції MSC. Коли сигнали з'єднання надійдуть до потрібної

комутаційної станції MSC, взаємодіючий з нею реєстр VLR видасть точну інформацію про знаходження рухомої станції, яку викликають і з'єднання відбудеться.

- **ЦЕНТР ІДЕНТИФІКАЦІЇ - AuC** (англ. Authentication Centre)-це модуль, що взаємодіє з реєстром власних станцій HLR і реалізує функції, що пов'язані з захистом системи від несанкціонованого доступу. Тут іде мова як про протидію спробам виконання з'єднань за рахунок інших абонентів, так і про неможливість підслуховування розмов в радіоканалі. В модулі AuC є параметри, які необхідні для ідентифікації абонентів, так звані шифрувальні ключі, а також самі алгоритми шифрування і генератор випадкових чисел.
- **РЕЄСТР ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ - EIR** (англ. Equipment Identity Register) - це база даних, яка використовується для ідентифікації рухомих станцій. На відміну від аналогових коміркових систем, в системі GSM права абонента не зв'язані з терміналом, що ним використовується, а лише із спеціальним модулем, який є його власністю. Ідентифікація абонента проводиться окремо від ідентифікації терміналу. Реєстр EIR з'єднаний з комутаційною станцією MSC за допомогою сигналізаційного каналу. Рухома станція, яка не отримала дозволу від MSC (напр., повідомлено в систему, що вона вкрадена) може бути заблокована.

6.1.1.3. Рухомі станції

Рухомі станції MS (англ. Mobile Station) виконують роль інтерфейсу абонента з системою GSM. Існують різні типи рухомих станцій, які відрізняються одна від одної потужністю передавача, а це впливає на розміри і ємність акумуляторів. Розрізняють найменші кишенькові рухомі станції (англ. handheld), більші, носимі станції (англ. portable), возимі та безпроводні виносні і безпроводні абонентські станції.

6.1.1.4. Комплект експлуатації та обслуговування

Комплект експлуатації і обслуговування в системі GSM (англ. Operation and Maintenance Subsystem OMS) дає можливість оператору бачити роботу системи та управляти нею: видача абонементів, введення і актуальність даних про абонентів, локалізація і усунення пошкоджень, вимірювання телекомунікаційного руху і ведення статистики, нарахування оплат і т. п. З одного боку комплект експлуатації і обслуговування зв'язаний за допомогою протоколу X.25 з комутаційно-мережною частиною системи, а за її посередництвом з базовими станціями і рухомими. З іншого боку, комплект OMS, через інтерфейс типу людина-машина взаємодіє з особами, які беруть участь в обслуговуванні системи. Комплект експлуатації і обслуговування складається найчастіше з певної кількості з'єднаних між собою, так званих, центрів експлуатації і обслуговування OMC (англ. Operation and Maintenance Centre), які спільно, в розпорошеній структурі, реалізують його функції.

6.1.1.5. Стикування системи GSM із зовнішнім світом

Система GSM не функціонує відірвано від зовнішнього світу. Її можна вважати частиною широкомасштабної телекомунікаційної системи: однієї країни, континентальної чи взагалі загальносвітової телекомунікаційної мережі. Контакт системи GSM з зовнішнім світом реалізується за допомогою трьох наступних інтерфейсів (рис. 6.2).

- **ІНТЕРФЕЙС МІЖ СИСТЕМОЮ GSM І КОРИСТУВАЧЕМ.** Користувачі, ними можуть бути і люди і пристрої, які бажають скористатися послугами системи, зв'язуються з нею за допомогою рухомих станцій. Рухома станція, обладнана інтерфейсом типу “людина-машина”, є часто тільки одним елементом системи, який бачить звичайний користувач.
- **ІНТЕРФЕЙС МІЖ СИСТЕМОЮ GSM І ІНШИМИ ТЕЛЕКОМУКАЦІЙНИМИ МЕРЕЖАМИ.** Це може бути традиційна стаціонарна телефонна мережа, мережа з інтеграцією послуг ISDN або інша коміркова система, аналогова чи цифрова. З цієї точки зору система

GSM являє собою мережу доступу, яка робить можливим виконання з'єднань між абонентами GSM і абонентами інших телекомунікаційних систем.

- ІНТЕРФЕЙС МІЖ СИСТЕМОЮ GSM І ОПЕРАТОРОМ. Цей інтерфейс злокалізований в описаному вище комплекті експлуатації і обслуговування ОМС.

6.1.2. Просторова структура мережі GSM

Кожна телекомунікаційна мережа повинна мати відповідну структуру, яка дасть можливість скерування з'єднань, що надходять, до відповідної комутаційної станції того абонента, якого викликають. В системах рухомої радіокомунікації, рухливість користувачів, яка впливає на принципи побудови системи приводить до того, що порівняно з телекомунікаційними системами загального користування їхня просторова структура має набагато важливіше значення. Ієрархічна структура мережі дає можливість швидко і якісно локалізувати рухомих абонентів. Далі будуть описані окремі рівні телекомунікаційної системи GSM, починаючи від мережі GSM як найвищого рівня аж до рівня окремої комірки (рис. 6.3).

- МЕРЕЖА GSM (англ. GSM Network Area або Service Area) - це ціла територія, яка охоплена дією послуг GSM. Географічно вона відноситься до всіх країн (операторів), в яких функціонує система GSM. Зв'язок між мережею GSM і телефонною мережею загального користування відбувається через одну з транзитних станцій GMSC (рис. 6.4). Можливою є також ситуація, в якій мережа ISDN або інші коміркові системи встановлюють зв'язок з мережею GSM за допомогою стаціонарної телефонної мережі загального користування.
- СИСТЕМА GSM (англ. PLMN service area) - це радіус дії мережі GSM, керований одним оператором (рис. 6.5). В країні, де працюють кілька операторів, існують одночасно кілька систем GSM, які взаємодіють між собою за посередництвом телефонної мережі загального користування.

- РАДІУС ДІЇ КОМУТАЦІЙНОЇ СТАНЦІЇ (англ. MSC service area)-це частина системи GSM, яка обслуговується однією комутаційною станцією MSC. Сигнали виклику, що надходять до рухомої станції направляються до центральної станції MSC, яка працює в тій комірці, де зараз знаходиться дана рухома станція. Реєстр власних станцій HLR зберігає інформацію відносно місця знаходження рухомої станції з точністю до радіусу дії комутаційної станції.
- ЗОНА ВИКЛИКІВ (англ. Location Area LA)-це частина радіусу дії комутаційної станції, в рамках якої мобільна станція не повинна передавати в систему даних про своє місце знаходження (рис. 6.6). В випадку надходження сигналу виклику до рухомої станції це буде та зона системи, всередині якої передається інформація про виклик (англ. paging message), метою якого є виклик абонента, що розшукується. Розмір цієї зони є компромісом між частотою змін місця знаходження рухомої станції (тим більша, чим менша зона викликів) та радіусом дії сигналів виклику, що викликають тільки одну рухома станцію і зв'язану з ними ефективність використання радіоканалів. Зона викликів часто охоплює своїм радіусом дії невелику кількість комірок, що обслуговуються одним або кількома контролерами базових станцій. Всі комірки даної зони викликів повинні знаходитись в тому самому радіусі дії комутаційної станції. Перехід рухомої станції з однієї зони викликів в іншу, в рамках однієї комутаційної станції MSC, приводить до зміни запису в реєстрі VLR даної центральної станції. Зміна зони викликів на іншу, що належить до іншої центральної станції MSC, приводить до потреби зміни запису в реєстрі HLR.
- КОМІРКА (англ. cell) - це найменший фрагмент системи GSM. Група комірок створює зону викликів. Кожній комірці відповідає одна базова станція.

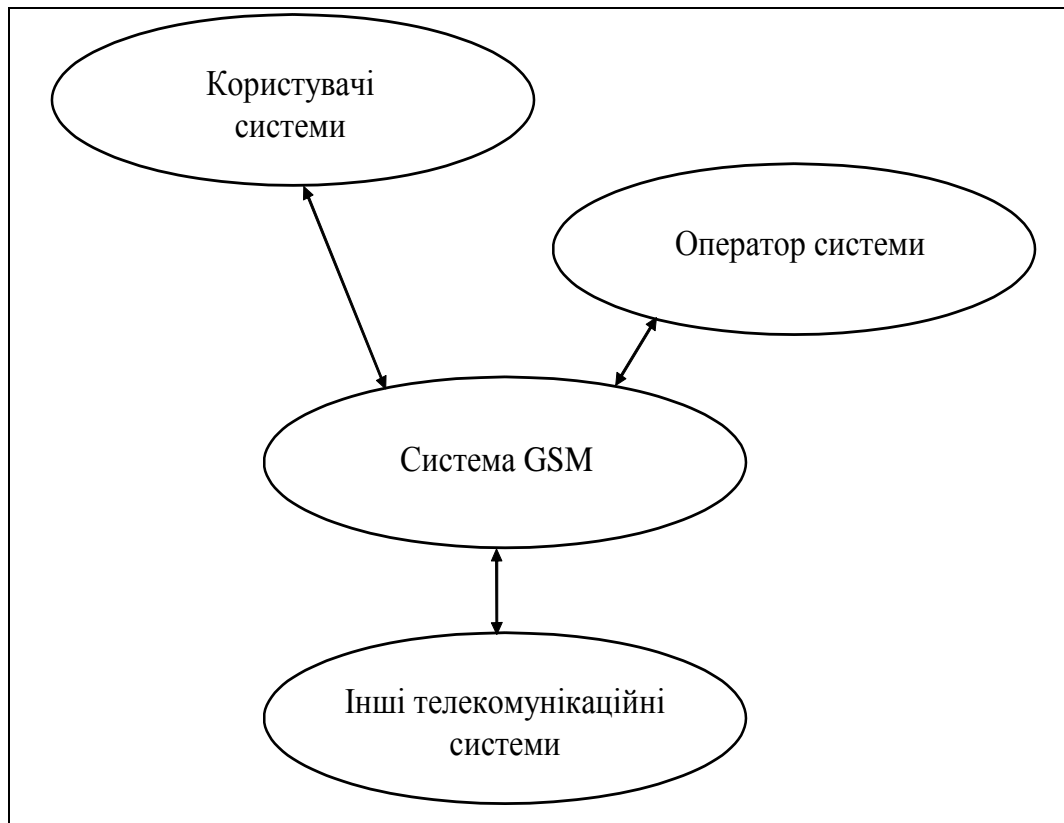


Рис.6.2 Інтерфейси системи GSM із зовнішнім світом

6.1.3. Нумерація

В попередніх пунктах було описано багаторівневу структуру системи GSM та охарактеризовано основні залежності і процедури обміну інформацією між окремими елементами. Цій розбудованій структурі, а детальніше, процедурам обміну інформацією відповідає система нумерації мережі GSM, яка набагато складніша ніж нумерація в стаціонарній мережі. Додатково на ступінь її складності впливають високі вимоги щодо безпеки інформації.

В стаціонарній телекомунікаційній мережі маємо справу з двома номерами: каталоговим номером та номером обладнання.

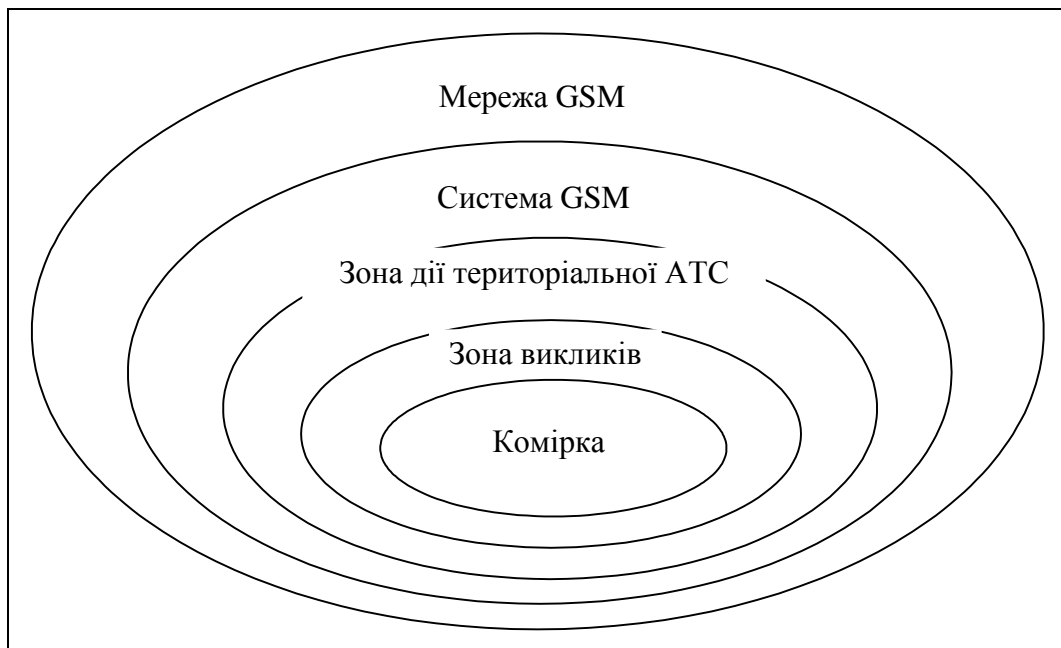


Рис.6.3 Просторова структура мережі GSM

Каталоговий номер - це номер присвоєний оператором абонентові і поданий до загальних відомостей, тобто це номер, який вибирають з метою виконання з'єднання з даним абонентом. Каталогний номер в стаціонарній мережі є спільним для абонента, його терміналу і послуг. А номер обладнання ідентифікує даного абонента в засобах стаціонарної мережі. Він є для внутрішнього вжитку оператора і не повідомляється абоненту. Зміна засобів даного абонента на АТС, напр. виділення йому іншого абонентського обладнання в рамках того самого концентратора, змінює його номер обладнання не впливаючи на каталоговий номер.

Основною рисою системи нумерації, що застосовується в стандарті GSM, є окрема нумерація абонента, послуг та обладнання, що приводить до використання набагато більшої кількості номерів, ніж в стаціонарних телекомунікаційних мережах. Набагато більше спеціалізованими є також функції окремих номерів. Перш за все встановлюють різницю між номером, присвоєним абоненту системи, та ідентифікаційним номером терміналу, що належить цьому абоненту.

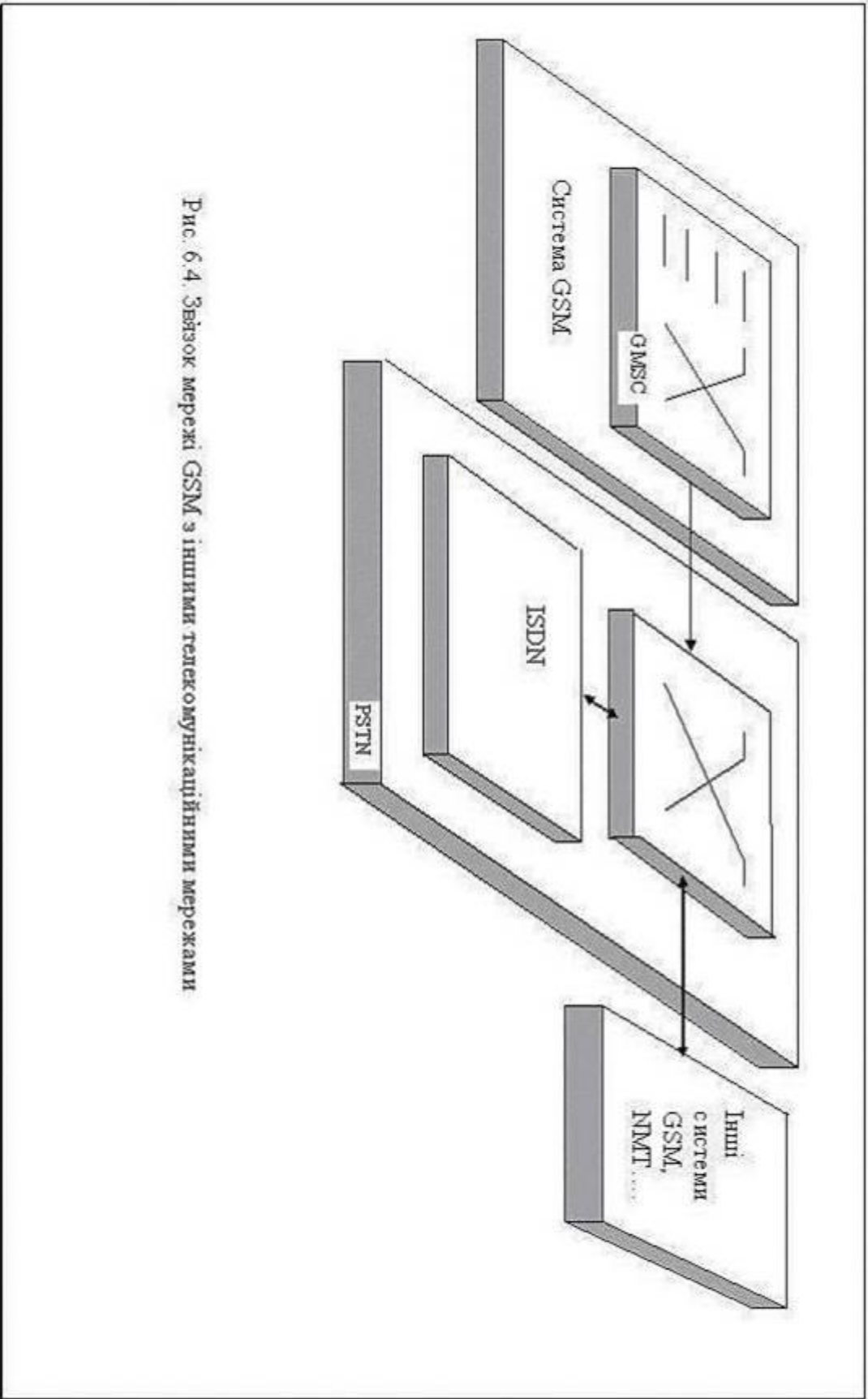


Рис. 6.4. Зв'язок мережі GSM з іншими телекомунікаційними мережами

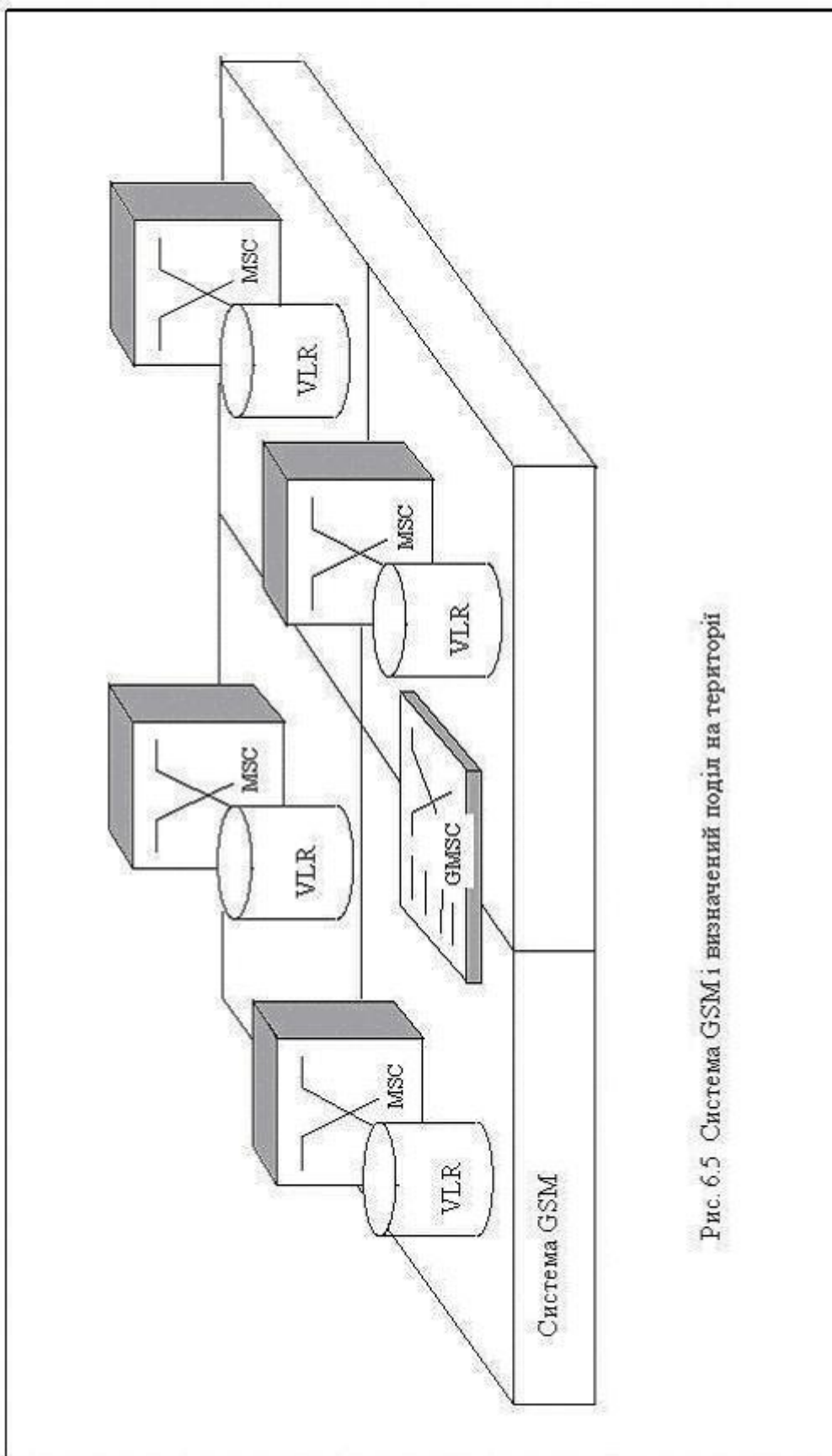


Рис. 6.5 Система GSM і визначений поділ на території

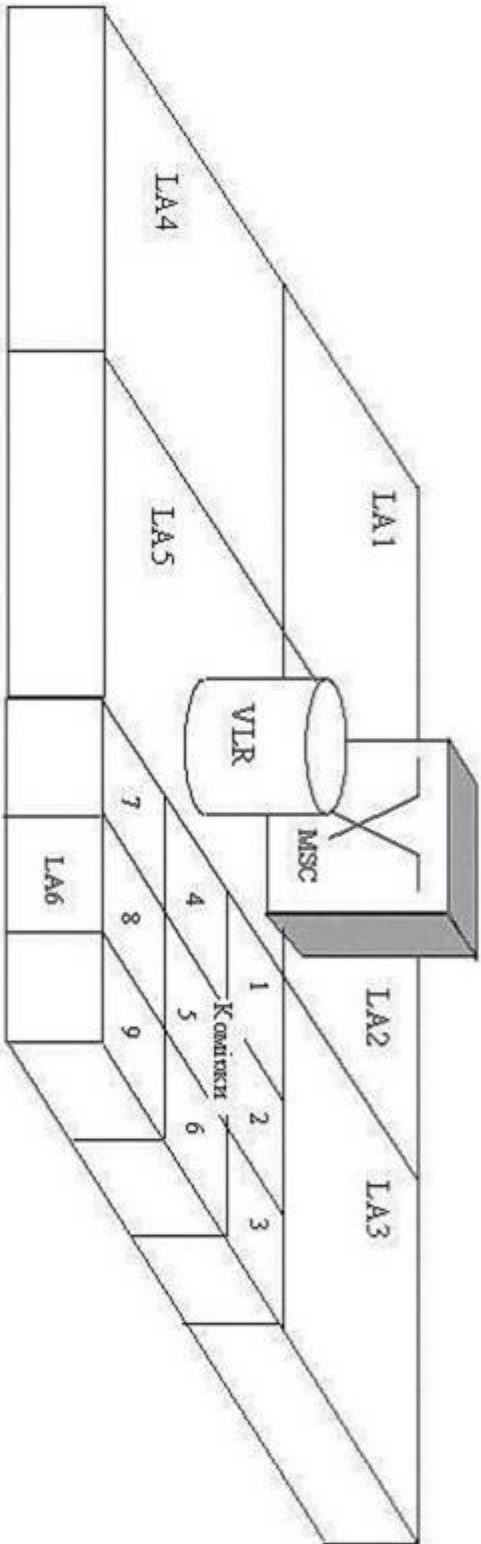


Рис. 6.6 Локальна територія із розділом на територію викликів і
одиночні комірки

Наступною рисою нумерації в системі GSM є те, що номер, вибраний з метою встановлення з'єднання, не відображає шляху, по якому це з'єднання реально буде встановлено. Інформація про шлях з'єднання записується в тимчасовій адресі (оперативній пам'яті) рухомої станції. Якщо користувач має право скористатися кількома видами послуг системи GSM (напр. передача даних, передача телефаксів), то для кожної з цих послуг він отримує окремий номер. Система дає можливість створити ситуацію, в якій для різних груп користувачів (напр. всі користувачі, користувачі з фірми, дирекція фірми і т. д.) один абонент може мати різні номери. Це дає можливість абоненту блокувати з'єднання від окремої групи користувачів, блокуючи з'єднання які надходять на вибраний номер.

Нижче представлено структуру нумерації, що застосовується в системі GSM, та коротко описано її функції. Структура окремих номерів спрощено показана на рис. 6.7. Потрібно звернути увагу на те, що на рис. 6.7 для одного абонента те саме поле (напр. поле "країна") може мати різні коди. Приклад такої ситуації описано в кінці розділу.

- МІЖНАРОДНИЙ НОМЕР АБОНЕНТА В МЕРЕЖІ ISDN MSISDN (англ. Mobile Station International ISDN number).

$$\text{MSISDN}=\text{CC}+\text{NDC}+\text{SN}$$

CC - код країни (англ. Country Code);

NDC - код оператора (англ. National Destination Code);

SN - номер абонента (англ. Subscriber Number).

Номер MSISDN є каталоговим номером користувача рухомої мережі. Це єдиний номер системи GSM, який сприймає (розуміє) стаціонарна телекомунікаційна мережа: він дозволяє знайти найближчу транзитну станцію GMSC до потрібної системи GSM. Номер MSISDN визначає тип послуг, доступних для абонента, а не його терміналу. Для кожної з послуг абонент

може бути відомий під окремим номером. В реєстрі HLR номер MSISDN перетворюється у внутрішній номер системи IMSI.

Номер MSISDN повинен узгоджуватися з номерацією, яка використовується в цифровій мережі з інтеграцією послуг ISDN в даній країні. Величина номеру MSISDN залежить від плану номерації в даній країні згідно з протоколом E.164CCITT. В таблиці 6.1 показано, для прикладу, вміст полів CC і ND для Великобританії та Фінляндії. Як видно, код країни CC ідентичний з кодом країни, який використовується для номерації абонентів в стаціонарній мережі. Кожний з операторів, також в рамках даної країни, використовує для різних систем різні коди MNC.

- МІЖНАРОДНИЙ НОМЕР РУХОМОГО АБОНЕНТА IMSI (англ. International Mobile Subscriber Identity)

$$\text{IMSI}=\text{MCC}+\text{MNC}+\text{MSIN}$$

MCC - код країни (англ. Mobile Country Code);

MNC - код оператора (англ. Mobile Network Code);

MSIN - код абонента (англ. Mobile Station Identification Number).

Номер IMSI є внутрішнім номером кожного абонента, присвоєним йому оператором і використовується виключно всередині мережі GSM. Цей номер присвоюється абоненту з моменту його реєстрації в системі (з моменту викупу абонементу) і записується в реєстри HLR, AuC та на карті SIM абонента. Цей номер також знаходиться в реєстрі VLR стільки, скільки комутаційна станція, що взаємодіє з цим реєстром, обслуговує дану рухому станцію.

Номер IMSI однозначно характеризує користувача системи, а не його термінал чи послугу. В таблиці 6.2 представлено різні значення поля, що визначають код країни в номерах MSISDN та IMSI для кількох європейських країн.

- ОПЕРАТИВНА АДРЕСА РУХОМОЇ СТАНЦІЇ (англ. Mobile Station Roaming Number).

$$\text{MSRN}=\text{CC}+\text{NDC}+\text{SN}$$

CC - код країни (англ. Country Code);

NDC - код оператора (англ. National Destination Code);

SN - номер абонента (англ. Subscriber Number).

Детальна (відносно зони викликів) інформація про місце знаходження рухомої станції зберігається в реєстрі VLR, що спряжений з тією комутаційною станцією, в якій дана мобільна станція тепер знаходиться. Адреса тієї комутаційної станції записана в реєстрі HLR. В початковій фазі реалізації з'єднання, в напрямку до абонента системи GSM, реєстр HLR вимагає від реєстру VLR інформацію про актуальне місце знаходження абонента, тобто тимчасовий номер, що присвоєний абоненту, якого викликають. Номер дозволив би здійснити з'єднання. З цією метою до реєстру VLR пересилається його номер IMSI. У відповідь реєстр VLR генерує оперативну адресу рухомої станції MSRN. Вміщена в ньому інформація дозволяє здійснити безпосереднє з'єднання з відповідною комутаційною станцією MSC.

Всередині системи GSM номери MSISDN, IMSI та MSRN змінюються між окремими елементами комутаційно-мережної частини, використовуючи сигналізацію SS7. Ця зміна має місце в момент підготовчої фази, яка випереджає здійснення з'єднання.

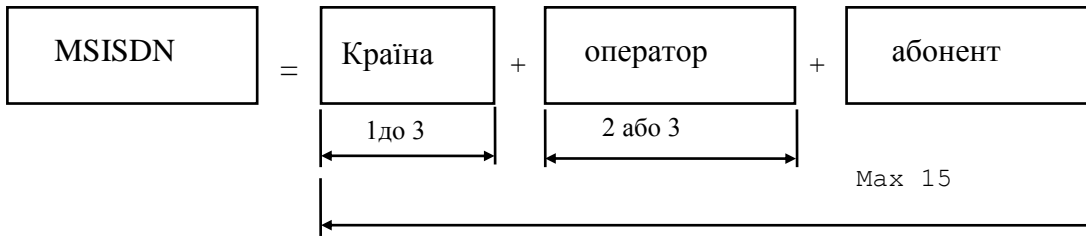
- ТИМЧАСОВИЙ НОМЕР РУХОМОГО АБОНЕНТА - TMSI (англ. Temporary Mobile Subscriber Identity).

Введення номеру TMSI є одним з елементів процедури забезпечення системи GSM перед доступом неуповноважених осіб, а конкретно перед підслуховуванням в радіоканалі. Номер TMSI - це закодована версія номеру IMSI, який передається в радіоканалі від базової станції до рухомої там, де інформація передається без шифрування, напр. під час виклику або ідентифікації абонента.

НУМЕРАЦІЯ В GSM

а) Міжнародний номер абонента в мережі ISDN-MSISDN

$$\text{MSISDN} = \text{CC} + \text{NDC} + \text{SN}$$



Таблиця 6.1 Приклад значення полів CC і NDC номера MSISDN

Код країни (CC)	Код оператор (NDC)	Країна	Система	Оператор
+44	802	Великобританія	GSM 900	Cellnet
+44	385	Великобританія	GSM 900	Vodafone
+44	956	Великобританія	DCS 1800	Mercury
+44	973	Великобританія	DCS 1800	Hutchinson Microtel
+358	40	Франція	GSM 900	Telecom Finland
+358	50	Франція	GSM 900	Radiolinja

б) Міжнародний номер рухомого абонента IMSI

$$\text{IMSI} = \text{MCC} + \text{MNC} + \text{MSIN}$$

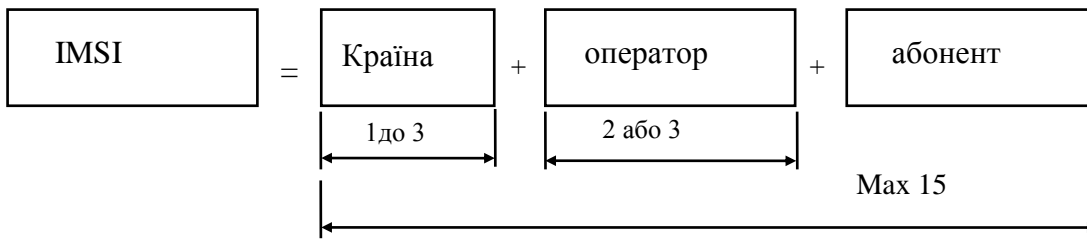


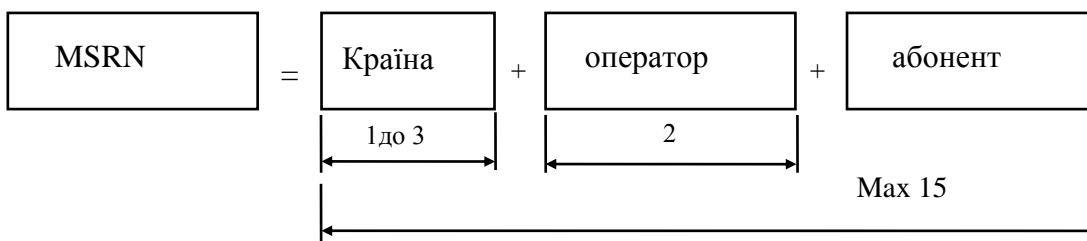
Рис.6.7а,б

Таблиця 6.2 Кодові позначення країни абонента CC і MCC для кількох європейських країн.

КРАЇНА	КОД КРАЇНИ	
	CC(MSISDN)	MCC(IMSI)
Данія	45	238
Фінляндія	358	244
Франція	33	208
Іспанія	34	214
Голандія	31	204
Німеччина	49	262
Норвегія	47	242
Швеція	46	240
Великобританія	44	234
Італія	39	222

с) Тимчасовий номер мобільної станції MSRN

$$MSRN = CC + NDC + SN$$



***) Тимчасовий номер рухомого абонента TMSI**

не більший ніж 4 байти

Рис.6.7с

Цей номер має локальне значення і його структуру визначає адміністратор мережі (номер не повинен бути довшим ніж 4 байти). Номер TMSI присвоюється тільки на час першого зголошення рухомої станції в зоні викликів.

- **МІЖНАРОДНИЙ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ НОМЕР ТЕРМІНАЛУ IMEI** (англ. International Mobile Equipment Identity).

$$\text{IMEI}=\text{TAC}+\text{FAC}+\text{SNR}+\text{SP}$$

TAC - код гомологації даної моделі обладнання (англ. Type Approval Code);

FAC - код виробника (англ. Final Assembly Code);

SNR - серійний номер обладнання (англ. Serial Number);

SP - для використання в майбутньому (англ. SPare).

Це ідентифікаційний номер терміналу абонента. Номер IMEI дозволяє оператору слідкувати, які термінали в даний момент користуються засобами мережі, і відразу ж блокувати вкрадені термінали або негомологовані. Номери IMEI зберігаються постійно в терміналах та реєстрі ідентифікації пристроїв EIR. Код FAC дає також можливість оператору заблокувати всі термінали, що виготовлені певним виробником.

- **НОМЕР ЗОНИ ВИКЛИКІВ - LAI** (англ. Location Area Identity).

$$\text{LAI}=\text{MCC}+\text{MNC}+\text{LAC}$$

MCC - код країни (англ. Mobile Country Code);

MNC - код оператора (англ. Mobile Network Code);

LAC - код зони викликів (англ. Location Area Code).

Номер зони викликів використовується для ідентифікації зони, в якій абонент зараз знаходиться. В межах цієї зони абонент може рухатися без необхідності уточнення даних про своє місце знаходження в реєстрі VLR. В випадку, коли надходить з'єднання, система буде викликати абонента посилаючи сигнали виклику тільки в одній зоні викликів, тобто в тій зоні, де зараз знаходиться цей абонент.

- ГЛОБАЛЬНИЙ НОМЕР КОМІРКИ - CGI (англ. Cell Global Identity).

$$CGI=MCC+MNC+LAC+CI$$

MCC - код країни (англ. Mobile Country Code);

MNC - код оператора (англ. Mobile Network Code);

LAC - код зони викликів (англ. Location Area Code);

CI - ідентифікатор комірки (англ. Cell Identity).

Глобальний номер комірки використовується мережею для розпізнавання комірок в межах зони викликів. На підставі номеру CGI комутаційна станція MSC розпізнає комірку, в якій відповів абонент, якого викликали. Цей номер використовується також з тарифікаційною метою.

- ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ НОМЕР БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ - BSIC (англ. Base Station Identity Code).

$$BSIC=NCC+BCC$$

NCC - національний кольоровий код (англ. National Colour Code);

BCC - кольоровий код базової станції (англ. Base Station Colour Code);

Номер BSIC використовується рухомою станцією для ідентифікації комірок, які оточують її і для того, щоб впевнитися, що сигнал, який приймається нею на даній частоті, походить від власної базової станції. Комірки, базові станції яких передають свій ідентифікаційний сигнал на тій самій частоті мають різні “кольорові” коди BCC. Навіть, у випадку, коли рухома станція отримала сильніший сигнал від іншої комірки, яка використовує ту саму частоту, цей сигнал рухома станція не прийме тому, що номер BSIC цієї

базової станції буде неправильним. За подібним принципом номер NCC дає можливість розрізнити операторів, які діють по обидві сторони кордону і використовують ті самі частоти.

Функції описаних вище номерів під час встановлення з'єднання, що приходить від абонента стаціонарної телекомунікаційної мережі до рухомого абонента представлено на рис. 6.8. Нижче описано наступні кроки цієї процедури.

1. Абонент телефонної мережі загального користування (абонент А) вибирає каталоговий номер абонента GSM (абонент В). На підставі вміщеної в номері MSISDN інформації про країну і материнського оператора системи GSM абонента В з'єднання спрямовується до відповідної комутаційної транзитної станції GMSC.

2. Транзитна станція GMSC відшукує в материнському реєстрі HLR абонента В і інформацію про теперішнє місце перебування абонента В. В реєстрі HLR записана адреса зони дії комутаційної станції (реєстру VLR), в якій перебуває абонент В та його номер IMSI.

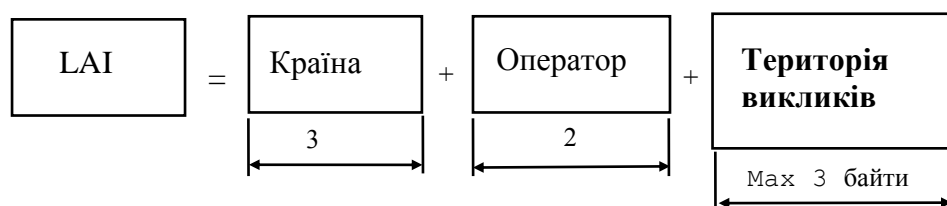
d) Міжнародний ідентифікаційний номер терміналу IMEI

$$\text{IMEI} = \text{TAC} + \text{FAC} + \text{SNR} + \text{SP}$$



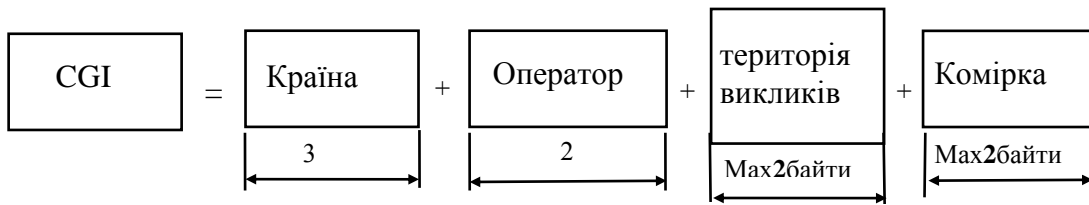
e) Номер локальної території (території викликів) LAI

$$\text{LAI} = \text{MCC} + \text{MNC} + \text{LAC}$$



f) Глобальний номер комірки CGI

$$\text{CGI} = \text{MCC} + \text{MNC} + \text{LAC} + \text{CI}$$



g) Ідентифікаційний номер базової станції BSIC

$$\text{BSIC} = \text{NCC} + \text{BCC}$$



Рис.6.7d,e,f,g.

3. На адресу, зчитану з реєстру HLR, посилається міжнародний номер рухомого абонента IMSI.

4. Комутаційна станція MSC, в зоні якої перебуває зараз абонент В, посилає до материнського реєстру HLR абонента В номер MSRN, що містить інформацію, яка дозволяє встановити до неї з'єднання від транзитної станції GMSC.

5. Реєстр HLR передає номер MSRN до транзитної станції GMSC.

6. На підставі інформації, записаної в номері MSRN транзитна станція GMSC встановлює з'єднання до відповідної комутаційної станції MSC.

7. З реєстру VLR, що відповідає актуальному місцю перебування абонента В, зчитується ідентифікатор зони викликів LAI та тимчасовий номер абонента TMSI.

8. Використовуючи номер TMSI, базові станції викликають рухому станцію абонента В усіх комітках, що належать до зони викликів, в якій останнім часом він перебував.

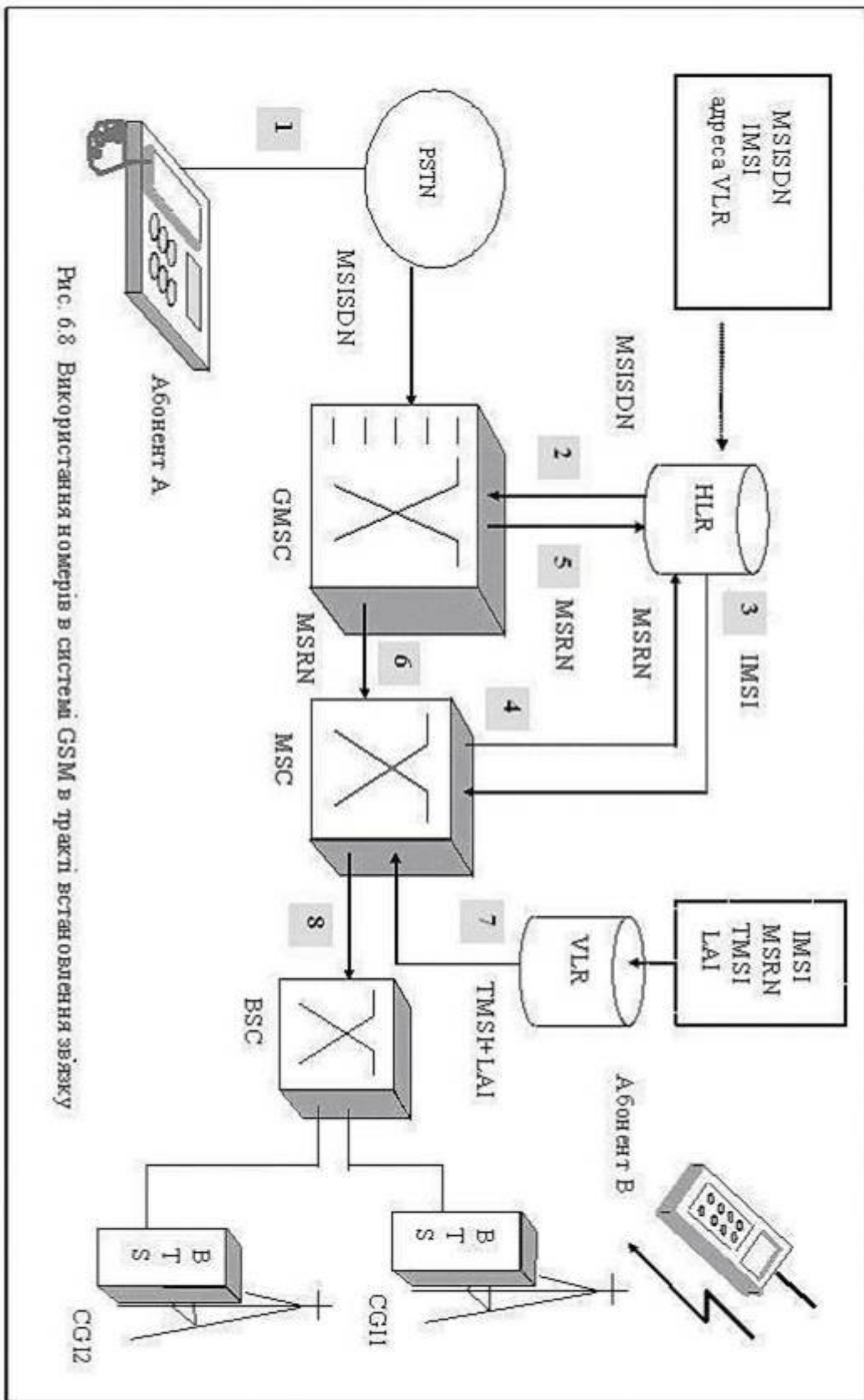


Рис. 6.8 Використання номерів в системі GSM в тракті встановлення зв'язку

6.2. Комутаційно-мережна частина системи GSM

Спрощена схема комутаційно-мережної частини системи GSM представлена на рис. 6.9. Прийнято, що реєстри чужих станцій VLR фізично розташовані в складі окремих комутаційних станцій MSC, а реєстр власних станцій HLR спільний для всієї системи.

6.2.1 Комутаційна станція MSC і реєстр чужих станцій VLR

Комутаційна станція коміркової системи MSC реалізує основні комутаційні функції системи. Вона відповідає за встановлення з'єднань в межах даної системи GSM, а також з'єднань між абонентами системи GSM і абонентами зовнішніх телекомунікаційних мереж, контролює встановлення з'єднань та нараховує оплати. Комутаційна станція MSC з одного боку взаємодіє з ансамблем базових станцій, а з іншого боку з іншими комутаційними станціями MSC системи GSM та через комутаційну транзитну станцію GMSC з зовнішніми мережами (рис. 6.9). Комутаційну станцію MSC можна трактувати як розширення стандартної станції ISDN. Додані функції є наслідком “рухливості” абонентів системи GSM. Вони дають можливість комутаційній станції MSC взаємодіяти з базами даних, які зберігають інформацію про рухомі станції. Дозволяють також встановити зв'язок з рухомими станціями незалежно від їх актуальної локалізації. На рис. 6.10 представлено спрощену функціональну схему комутаційної станції MSC. В загальному випадку функції комутаційної станції можна поділити на комутаційні і керуючі функції, які реалізуються також і в АТС стаціонарної телекомунікаційної мережі, та функції, що характерні для комутаційної станції рухомої мережі. Вони реалізуються підсистемою рухомої телефонії MTS (англ. Mobile Telephony Subsystem). Комутаційно-керуюча частина комутаційної станції, та підсистема MTS будуть описані нижче.

6.2.1.1. Комутаційно-керуюча частина комутаційної станції MSC

Якщо під комутаційно-керуючою частиною комутаційної станції MSC

будемо розуміти ту її частину, яка виконує функції, що реалізуються також телефонними станціями стаціонарної мережі, то до складу тієї частини комутаційної станції MSC входять наступні модулі (рис. 6.10).

- **модуль керування рухом** - ці функції реалізуються програмним забезпеченням комутаційної станції; модуль охоплює основні функції встановлення, слідкування і ліквідації з'єднань, аналізує цифровий вхідний потік, керує вихідними з'єднаннями та наглядає за ними;
- **модуль з'єднань і сигналізації** - реалізується як програмно так і апаратно, наглядає за з'єднаннями з іншими станціями та сигналізацією в системі SS7;
- **комутаційне поле** - відповідає за вибір, встановлення і ліквідацію з'єднувальних шляхів для сигналів мови або даних;
- **модуль тарифікації** - реалізований програмно і використовується для нарахування оплат абонентів рухомої мережі; інформація про кожну розмову (номер абонента А, номер абонента В, тривалість розмови і т.д.) записана і зберігається на дискеті або магнітній стрічці;
- **модуль експлуатації і обслуговування** - включає в себе функції керування, експлуатації і обслуговування різних підсистем комутаційної частини станції MSC, відповідає за біжучий контроль зайнятості і вірного перебігу з'єднань, проведення тестуючих з'єднань, вимірювання навантажень телекомунікаційного руху, займається також збором, зберіганням, перетворенням і видачею різного роду статистичних даних, що характеризують роботу системи.

6.2.1.2. Підсистема рухомої телефонії MTS

Як згадувалося раніше, комутаційні станції коміркових систем будуються, звичайно, методом додавання певних функцій до типових АТС стаціонарної мережі. Підсистема рухомої телефонії MTS - це частина комутаційної станції, яка взаємодіє з ансамблем базових станцій і реалізує функції, що виникають з рухомості абонентів.

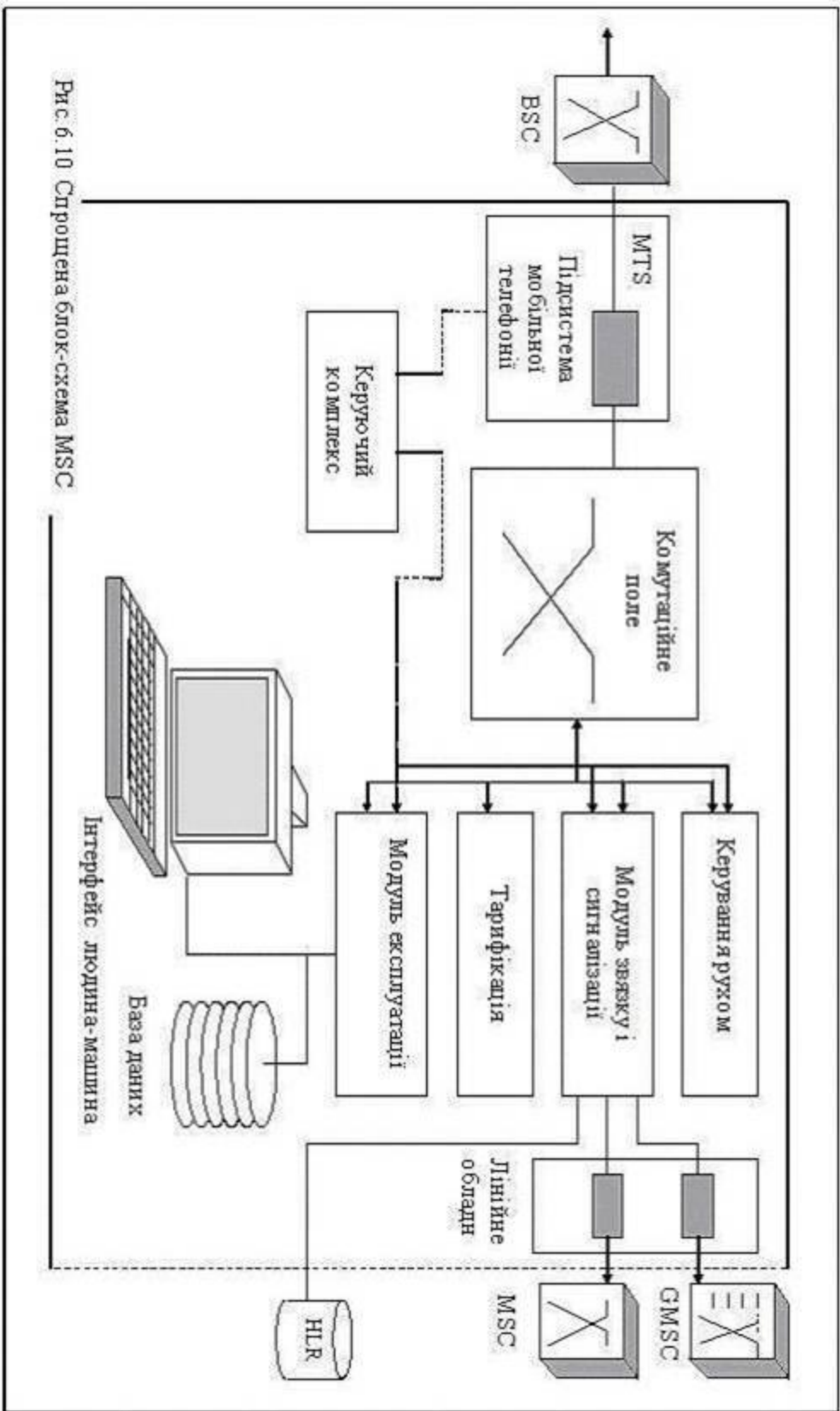


Рис. 6.10 Спрощена блок-схема MSC

Підсистема рухомої телефонії є програмним фрагментом комутаційної станції і складається з п'яти частин: реєстру чужих станцій, сигналізаційного модуля MAP (англ. Mobile Application Part), модуля доступу, адміністративного модуля та модуля аналізу номерів. Функціональний поділ підсистеми рухомої телефонії представлено на рис. 6.11.

Нижче описано окремі функціональні елементи підсистеми MTS.

РЕЄСТР ЧУЖИХ СТАНЦІЙ (англ. Visitors Location Register - VLR) містить оперативні дані про рухомі станції, які опинились в зоні дії комутаційної станції, спряженої з даним реєстром. Ці дані реєстр отримує з материнських реєстрів HLR окремих абонентів. Картотека кожного абонента в реєстрі VLR містить наступну інформацію:

- стан терміналу (вимкнений, в стані очікування, активний);
- ідентифікатор зони викликів, в якій зараз знаходиться рухома станція;
- каталоговий номер MSISDN;
- адреса материнського реєстру HLR абонента;
- категорія абонента;
- параметри процедур ідентифікації абонента і шифрування радіопередачі (англ. authentication triplet).

В картотеці показником кожного абонента є його номер IMSI.

- **МОДУЛЬ СИГНАЛІЗАЦІЇ MAP** (англ. Mobile Application Part) відповідальний за реалізацію сигналізаційних процедур на стику з реєстром HLR. Найважливіші з них такі:
- вимога інформації про рухома станцію і посилка її до реєстру HLR;
- наказ уточнення запису про місце знаходження рухомої станції, що висилається до реєстру HLR;
- пересилка до реєстру HLR наказу доставки нових криптографічних параметрів;

- пересилка оперативного номера рухомої станції MSRN до реєстру HLR і далі до транзитної станції GMSC.
- **МОДУЛЬ ДОСТУПУ** реалізує два види функцій: функції керування і спряження. Функції керування пов'язані з реалізацією сигналізаційних протоколів мережевого рівня. Це такі протоколи:
 - Керування процесом з'єднань CM (англ. Connection Management). Він координує процес з'єднання, спостереження і роз'єднання.
 - Керування “рухливістю” абонентів MM (англ. Modality Management). Процес полягає у процедурі введення оперативної інформації про місце розташування рухомої станції та процедури ідентифікації користувача.
 - Керування радіозасобами RR (англ. Radio Resource Management). Його мета полягає у встановленні стабільних з'єднань між окремими рухомими станціями і стаціонарною частиною системи GSM і утриманні цих з'єднань, незважаючи на рух абонентів; координації процедури виклику абонентів; перемикачів каналів та ініціюванні процедури шифрування радіопередачі. Він містить таблицю, що показує зв'язки між блоками керування рухомими станціями і зонами викликів.

Функції спряження реалізуються двома типами інтерфейсів: інтерфейс з'єднань до контролерів базових станцій та сигналізаційний інтерфейс.

- **АДМІНІСТРАТИВНА ЧАСТИНА** взаємодіє з оператором системи. Містить процедуру створення і друкування специфікації (показників) номерів IMSI, контролерів базових станцій, тимчасових номерів абонентів, дозволяє також друкувати інформацію про окремих абонентів.
- **МОДУЛЬ АНАЛІЗУ НОМЕРІВ** відповідальний за аналіз міжнародного номеру рухомого абонента IMSI. Дозволяє також замінити номер IMSI на адресу, що містить інформацію про даного користувача в реєстрі VLR.

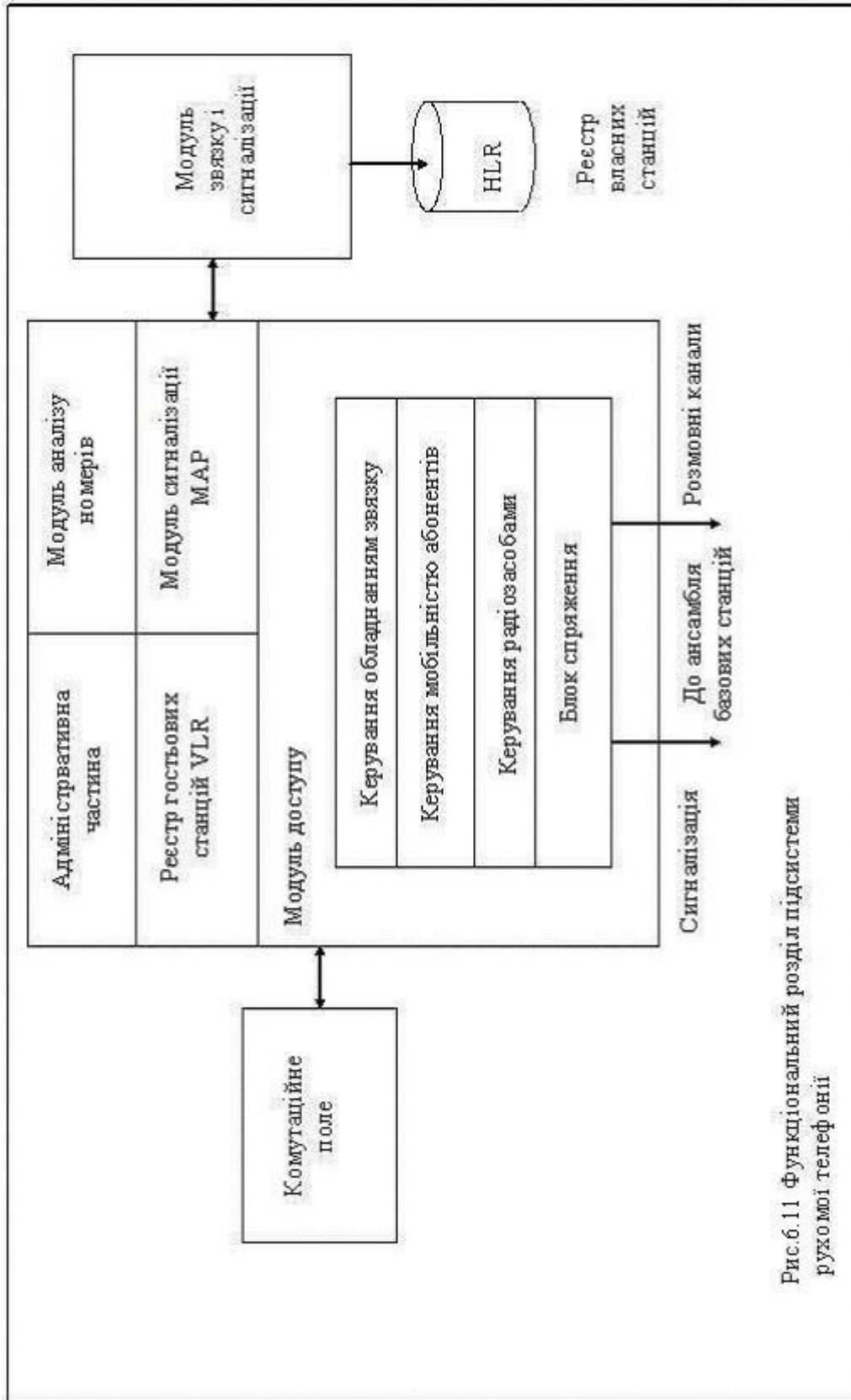


Рис. 6.11 Функціональний розділ підсистеми рухомої телефонії

6.2.1.3. Комутаційна транзитна станція GMSC

Станція GMSC дає можливість реалізувати з'єднання між абонентами системи GSM і абонентами інших телекомунікаційних систем, а також інших коміркових систем. Від сторони системи GSM вона містить інтерфейси, що з'єднують її із системою сигналізації SS7, за допомогою яких вона взаємодіє з елементами комутаційно-мережної частини NSS системи GSM. Інтерфейс, що з'єднує центральну станцію GMSC з зовнішніми мережами має назву модуля функцій спряження IWF (англ. Inter Working Functions). Модуль IWF містить передавальну апаратуру та пристрій адаптації протоколів. Він дає можливість системі GSM взаємодіяти із телефонною мережею загального користування, мережею ISDN, з мережею передачі пакетів, даних або з іншою рухомою системою. Функції спряження можуть бути або інтегровані з функціями центральної станції, або реалізуватися як окреме обладнання. В другому випадку специфікація не відповідає інтерфейсу між комутаційною станцією і модулем IWF.

Комутаційна транзитна станція GMSC може бути побудована двома способами: або як окремо запроектована комутаційна станція, або як комплект транзитних функцій (англ. gate way functions), що інтегровані з типовою комутаційною станцією MSC (вид накладки). На практиці другий підхід, з економічної точки зору, застосовується найчастіше.

6.2.2 реєстр власних станцій HLR

Кожний оператор системи GSM має центральну базу даних, яка зберігає інформацію про абонентів, зареєстрованих в даній системі незалежно від їх місця розташування. Така база даних називається реєстром власних станцій HLR. Крім назви “реєстр” це ще і дуже потужний комп'ютер, що має відповідне програмне забезпечення і пам'ять, яка здатна зберігати велику кількість інформації. Існує кілька варіантів ввімкнення реєстру HLR відносно інших елементів системи. В типових системах середньої величини, існує один реєстр HLR, який обслуговує всі комутаційні станції MSC системи. Великі системи,

ємністю в мільйони абонентів, можуть мати кілька, або навіть більше десятка реєстрів HLR.

З моменту реєстрації абонента в системі, оператор вводить в реєстр HLR ряд інформацій (Таблиця 6.3). Хоча кількість інформації в картотеці абонента реєстру HLR ніколи не змінюється, та однак її частина, що стосується актуального місця знаходження абонента, змінюється постійно. Реєстр HLR знає місце знаходження абонента в мережі GSM з точністю до зони дії комутаційної станції. Кожного разу, коли абонент змінює зону дії комутаційної станції реєстр HLR повинен отримати ідентифікатор реєстру VLR, спряженого з новою зоною дії комутаційної станції.

На рис. 6.12 представлено функціональний поділ реєстру власних станцій HLR. Інформація про абонентів знаходиться в частині, що описана на малюнку як база даних. Адміністративна частина - це інтерфейс з оператором системи. Вона дозволяє реєструвати нових абонентів, проводити зміни, виконувати роздруки і т.д. Модуль аналізу номерів реєстру HLR проводить заміну номеру IMSI на номер MSISDN і навпаки. Блок позначений на малюнку, як MAP (англ. Mobile Application Part)-це відповідник блоку MAP в комутаційній станції MSC. Він відповідає за приймання і посилку повідомлень в системі сигналізації SS7 та за прийняття рішень і за їх виконання (напр. актуальність запису про місце знаходження даної рухомої станції або видача наказу про знищення інформації про рухому станцію в реєстрі VLR).

6.2.3. Центр ідентифікації AuC

Питання захисту в системі GSM та криптографічні процедури будуть детально описані в далі. В загальному захист в системі GSM реалізований на трьох рівнях:

- рівень доступу користувача до послуг, які реалізує система; на цьому рівні реалізується процедура ідентифікації абонентів, яка не допускає використовувати послуги системи неуповноваженим користувачам;

- рівень захисту сигналів, які передаються в радіоканалі, де шифрування захищає абонентів від підслуховування;
- рівень ідентифікації обладнання, на якому система перевіряє чи пристрій, який використовується абонентом, є гомологований та, наприклад, чи не знаходиться він в списку вкрадених.

Таблиця 6.3 Інформація, що зберігається в картотеці абонента в реєстрі HLR.

Інформація	Частота зміни інформації
Міжнародний номер абонента в мережі ISDN MSISDN	Записаний постійно
Міжнародний номер рухомого абонента IMSI	Записаний постійно
Категорія абонента (звичайний користувач, користувач з розширеними правами, телефонний автомат, тестуючий апарат і т. п.)	Записана постійно
Ідентифікаційний ключ Ki	Записаний постійно
Статус абонента (напр. заблокований оператором)	Рідко змінюється
Список послуг переносу (англ. <i>bearer services</i>)	Рідко змінюється
Список телепослуг (англ. <i>teleservices</i>)	Рідко змінюється
Актуальне місце знаходження абонента (ідентифікатор реєстру VLR, в зоні дії центральної станції, якого зараз знаходиться даний абонент)	Часто (біжучий стан)

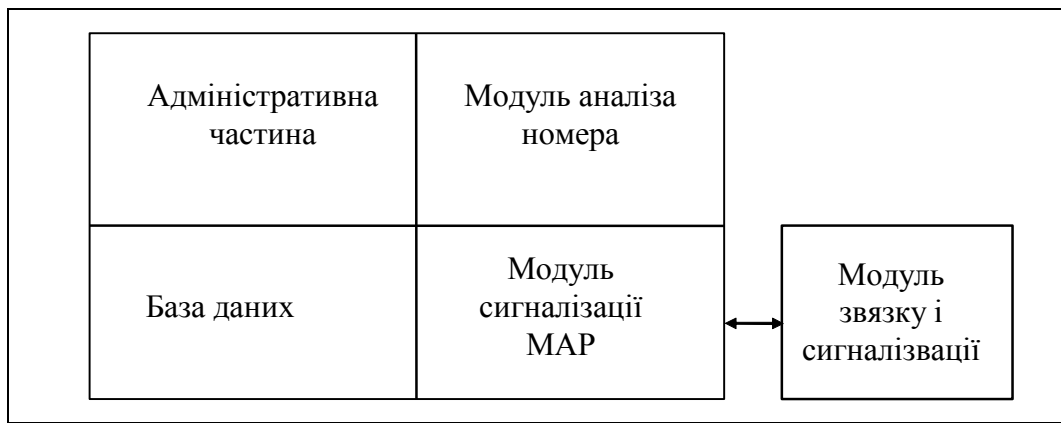


Рис.6.12 Функціональний поділ реєстру HLR

Центр ідентифікації AuC бере участь в процедурах захисту на двох перших рівнях: при ідентифікації користувачів та шифруванні передачі в радіоканалі. AuC можна трактувати як виділені функції реєстру HLR, що зв'язані з захистом системи.

З моменту реєстрації нового абонента в системі, разом з номером IMSI, оператор призначає йому ідентифікаційний ключ K_j . Ключ переховується разом з номером IMSI в базі даних AuC, а також в модулі SIM абонента.

Завданням центру ідентифікації AuC є генерація за допомогою ключа K_j трьох параметрів, які використовуються криптографічною процедурою. Це відбувається таким чином:

1. Комутаційна станція MSC посилає до центру AuC наказ генерації криптографічних параметрів;
2. Реєстр AuC відшукує ідентифікаційний ключ K_j даного абонента, а генератор псевдовипадкових чисел AuC генерує псевдовипадкове число RAND (англ. RANDom number);
3. На основі числа RAND та ідентифікаційного ключа K_j обчислюють два наступні параметри: число SRES (англ. Signed RESponse) та шифрувальний ключ з'єднання K_c ;
4. Параметри RAND, SRES та K_c посилаються в реєстр HLR (англ. ciphering triplet).

Для даного абонента параметри RAND, SRES та K_c автоматично

запам'ятовуються в реєстрі HLR і звіди передаються на вимогу до реєстру VLR. Реєстр VLR завжди володіє принаймі одним невикористаним комплектом параметрів для всіх станцій з даної зони дії комутаційної станції. Ключ Kc посилається далі з реєстру VLR до базової станції де використовується для шифрування трансмісії в радіоканалі. Параметри RAND і SRES передаються до рухомої станції і там використовуються в процедурі ідентифікації користувача. Рис. 6.13 представляє процес створення параметрів RAND, SRES і Kc в реєстрі AuC. Конкретне значення криптографічних параметрів та перебіг ідентифікаційних процедур буде описано далі.

6.2.4. Зміна положень рухомими станціями

В розділі описана взаємодія елементів комутаційно-мережної частини системи GSM при реалізації процедур, що зв'язані із зміною інформації про положення рухомого абонента і встановленням з'єднань.

В системі GSM термінал в даний момент часу може знаходитись в одному з трьох станів:

- **ТЕРМІНАЛ ВИМКНЕНИЙ** - в цьому стані рухома станція не бере участі в жодній з процедур системи; не розпізнає сигналів, що приходять і не висилає власних сигналів; цей стан відповідає вимкненому живленні;
- **СТАН ОЧІКУВАННЯ** - термінал ввімкнений, але рухома станція не бере участі, на даний момент, в з'єднанні; рухома станція очікує на сигнали виклику та інформує систему про своє місце перебування;
- **АКТИВНИЙ СТАН** - термінал ввімкнений і рухома станція бере участь в з'єднанні.

6.2.4.1. Процедура уточнення інформації про місце перебування рухомої станції

Розглянемо спочатку ситуацію, в якій рухома станція MS ввімкнена і знаходиться в стані очікування на території однієї з комірок системи GSM, якій відповідає базова станція BTS1.

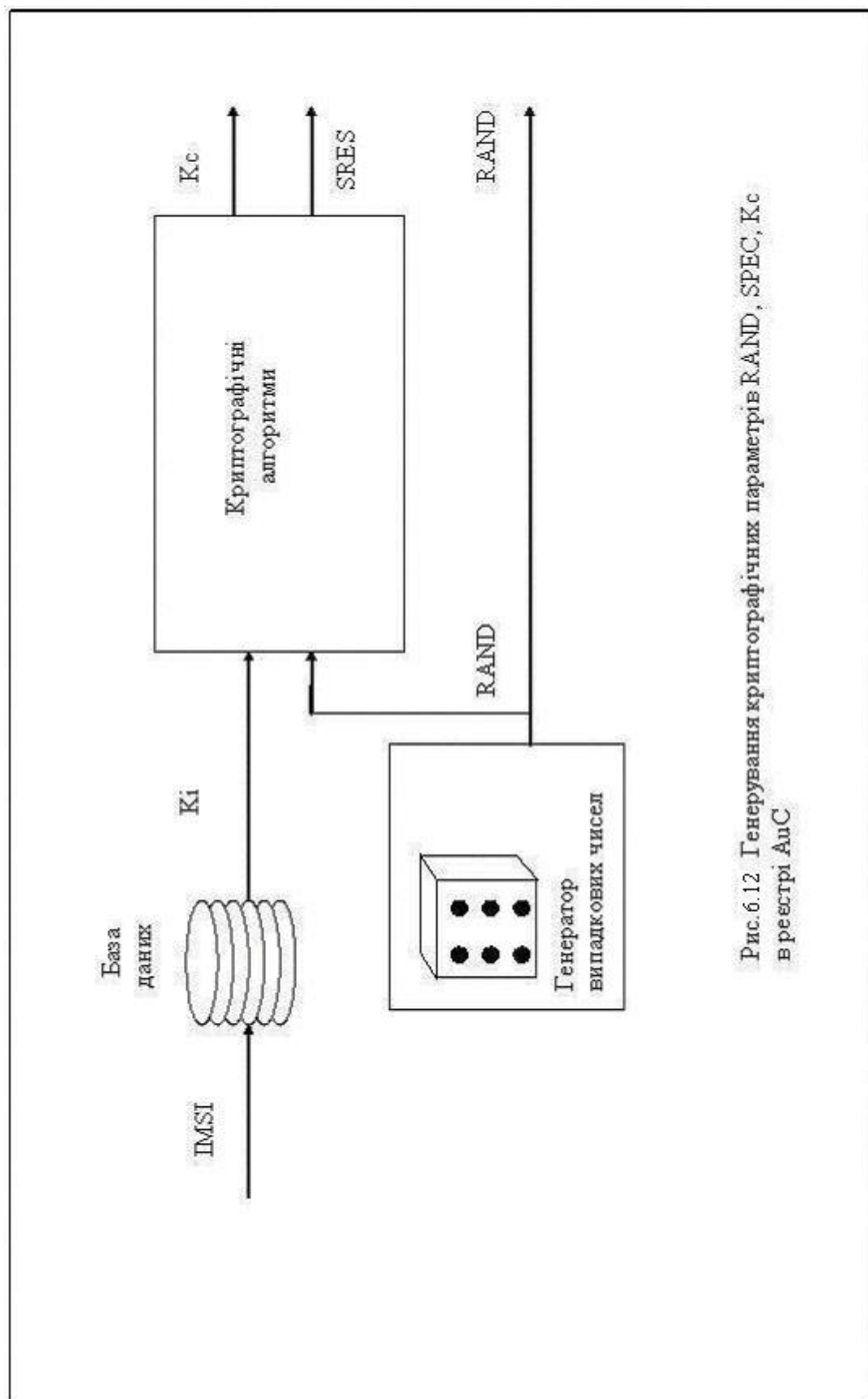


Рис. 6.12 Генерування криптографічних параметрів RAND, SRES, Kc в реєстрі AuC

Це означає, що рухома станція MS, крім того, що зараз не бере участі в жодному з'єднанні, постійно приймає сигнали з сигналізаційного каналу на спеціальній частоті, що виділена для сигналізацій, від станції BTS1.

Одночасно, в типовій ситуації, станція MS приймає також сигнали в сигналізаційних каналах від інших базових станцій, більш віддалених від неї, ніж станція BTS1. Рухома станція, що знаходиться в стані очікування, оперативно виконує вимірювання потужності сигналів базових станцій, як станції BTS1, тимчасово найпотужнішої, так і сусідніх станцій.

Якщо в такій ситуації станція MS почне рухатись в сторону однієї з сусідніх комірок, наприклад, комірки, якій відповідає станція BTS2 (рис. 6.14), то в міру наближення до межі комірки буде знижуватися рівень сигналу приймання від BTS1, а рівень сигналу від BTS2 буде збільшуватись. Поблизу теоретичної границі між двома сусідніми комірками, коли прийнятий сигнал від BTS1 стане слабшим від сигналу із BTS2, станція MS приймає рішення про перестроювання на частоту сигналізаційного каналу BTS2. Але це ніяк не пов'язано із виділенням радіозасобів, а тільки означає, що приймання сигналів відбувається від іншої базової станції в стані очікування. Ця процедура відбувається без інформування інших елементів системи так довго, як довго рухома станція не змінює зони викликів.

В момент, коли станція MS розпізнає в сигналізаційному каналі на спеціальній частоті станції BTS2 ідентифікатор нової зони викликів (LAI), MS повідомляє систему про зміну свого положення. Запускається процедура уточнення інформації про положення станції MS, яка знаходиться в стані очікування. Рисунок 6.14 і 6.15 представляють два можливі варіанти виконання такої процедури.

Рисунок 6.14 представляє ситуацію, в якій рухома станція змінює зону викликів, залишаючись в тій самій зоні дії комутаційної станції. В такій ситуації, після розпізнання ідентифікатора нової зони викликів LAI, рухома станція посилає в реєстр VLR наказ зміни запису про своє положення. Після уточнення даних реєстр VLR посилає до станції MS підтвердження виконання

зміни.

Процедура буде дещо складнішою у випадку, коли рухома станція зі зміною зони викликів змінює також зону дії комутаційної станції і спряжений з нею реєстр VLR (рис. 6.15). Зміна однієї зони центральної станції на іншу означає, що тепер з'єднання, яке надійде до рухомої станції буде встановлюватися по іншому з'єднувальному шляху. Адреса зони дії комутаційної станції, в якій знаходиться дана рухома станція, зберігається в її материнському реєстрі HLR. Ця інформація повинна бути уточнена. З цією метою реєстр VLR2 посилає до материнського реєстру HLR абонента наказ уточнення запису про її положення. Реєстр HLR підтверджує наказ, записує адресу реєстру VLR2 та посилає до реєстру VLR1 доручення знищення інформації про рухома станцію.

6.2.4.2. Перехід рухомої станції з вимкненого стану до ввімкненого

Як було показано вище, станція, що знаходиться у вимкненому стані має вимкнене живлення або знаходиться поза радіусом дії мережі GSM. З точки зору системи GSM ці дві ситуації рівнозначні. Після ввімкнення живлення або в момент повернення станції в зону дії мережі GSM станція MS повідомляє систему про свою присутність. З цією метою спочатку розпізнає сигнали із сигналізаційних каналів на спеціальних частотах (англ. beacon frequency) від навколишніх базових станцій. Необхідним є виконання синхронізації несучої частоти і синхронізації циклу. З цією метою використовуються спеціальні сигнали, що коректують частоту, і синхронізаційні сигнали. Далі вибирається сигнал найбільш потужної базової станції BTS і розпізнається ідентифікатор зони викликів LAI. Якщо ідентифікатор зони викликів співпадає з останнім ідентифікатором, який станція запам'ятала перед вимкненням від системи, то це означає, що вимкнення, як і поновне ввімкнення відбулися в тій самій зоні викликів. Отже буде достатньо тільки в реєстрі VLR, для відповідного номера IMSI, змінити позначник стану абонента: зі стану “вимкнений” на “ввімкнений”.

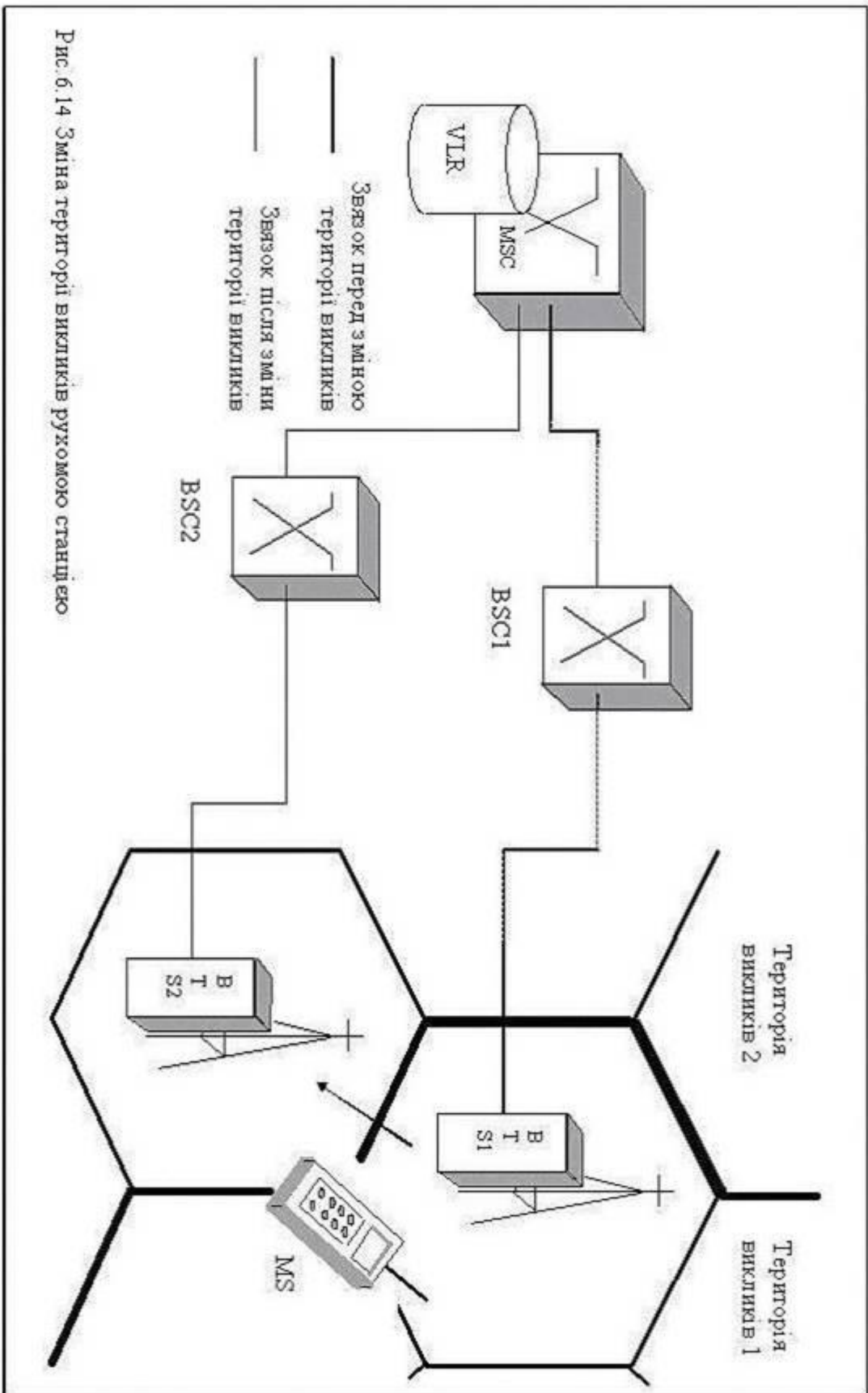


Рис. 6.14 Зміна території викликів рухомою станцією

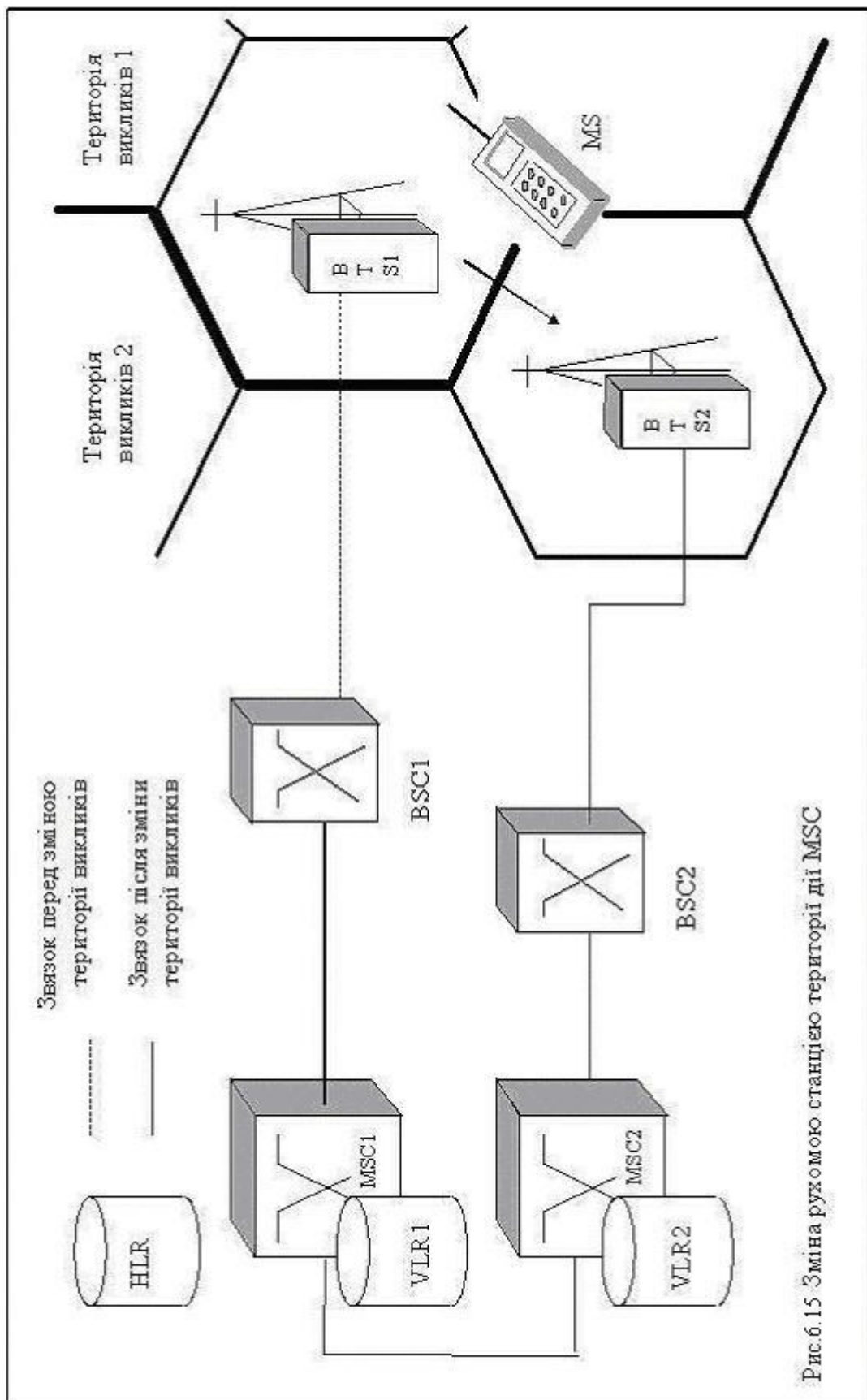


Рис. 6.15 Зміна рухомою станцією територію дії MSC

Якщо рухома станція повідомить про свою присутність в іншій, ніж в тій, в якій настало вимкнення, зоні викликів необхідним буде додаткове проведення процедури уточнення інформації про її актуальне положення, так як це описано в пункті 2.4.1.

Процедура переходу станції MS з ввімкненого стану у вимкнений виконується автоматично станцією MS в момент вимкнення живлення. Останнім повідомленням, яке автоматично посилається в систему від MS перед її вимкненням, є наказ “від’єднання” її від системи. Після прийому цього наказу в реєстрі VLR, для прийнятого номеру IMSI, позначник стану абонента переходить в стан "вимкнений". До станції, яка знаходиться в цьому стані, не посилаються сигнали виклику. Реєстр HLR не інформується про зміну положення станції.

6.2.4.3. Почасове підтвердження стану очікування

В результаті важких умов поширення сигналу в радіоканалі може статися так, що система вірно не розпізнає інформації про “від’єднання” рухомої станції і буде далі вважати її ввімкненою. Щоб уникнути такої ситуації впроваджено процедуру почасової реєстрації рухомої станції. Кожна рухома станція, яка знаходиться в стані очікування, має обов'язок через певний час висилати повідомлення в систему, що підтверджує її готовність для прийняття вхідних розмов. Якщо система не отримає на певному проміжку часу від станції MS її нового повідомлення про присутність, тоді автоматично в реєстрі VLR записується інформація, що вона вимкнена.

6.2.4.4. Встановлення з'єднання, що надходить до рухомої станції

Розглянемо зараз процедуру встановлення з'єднання від абонента А, що знаходиться в стаціонарній мережі, до абоненти В, який знаходиться в своїй материнській системі GSM (рис. 6.16).

З метою реалізації з'єднання абонент А вибирає спочатку каталоговий номер MSISDN абонента В. Перші цифри номеру MSISDN, вибраного

абонентом А, інформують систему про те, що абонент В зареєстрований в мережі GSM та називають оператора мережі. Аналіз наступних цифр видає адресу відповідного реєстру HLR. В HLR знаходиться адреса реєстру VLR, спряженого з комутаційною станцією MSC, в зоні якої зараз знаходиться абонент В. Після знаходження картотеки абонента В у реєстрі власних станцій HLR, реєстр HLR відповідає тимчасовим номером абонента В, що визначає шлях з'єднання до відповідної комутаційної станції MSC. Це все відбувається на сигналізаційному рівні (система сигналізації SS7). Після цього система готова до встановлення з'єднання з абонентом В.

Враховуючи те, що абонент А – це абонент стаціонарної телефонної мережі, з'єднання від абонента А скеровується спочатку до транзитної комутаційної станції GMSC в системі GSM абонента В. Центральна станція GMSC посилає номер MSISDN абонента А в реєстр HLR. В реєстрі HLR номер MSISDN замінюється на міжнародний номер рухомого абонента IMSI. Номер IMSI - це ключ до інформації про абонента В у базі даних системи.

Реєстр HLR посилає номер IMSI абонента В до відповідного реєстру VLR, вимагаючи виділення для встановленого з'єднання номера MSRN. Оперативна адреса рухомої станції (MSRN) вказує шлях, по якому буде встановлене з'єднання до комутаційної станції MSC, в зоні дії якої зараз знаходиться абонент В. Якщо абонент В був дотепер в стані очікування, то комутаційна станція MSC виділяє йому на час встановлення з'єднання один з вільних номерів MSRN.

Після встановлення з'єднання цей номер буде можна використати для іншого абонента. Отриманий з реєстру VLR номер MSRN посилається через реєстр HLR до транзитної станції GMSC. Маючи номер MSRN, транзитна станція GMSC може встановити з'єднання з тою комутаційною станцією MSC, яка обслуговує даного абонента В.

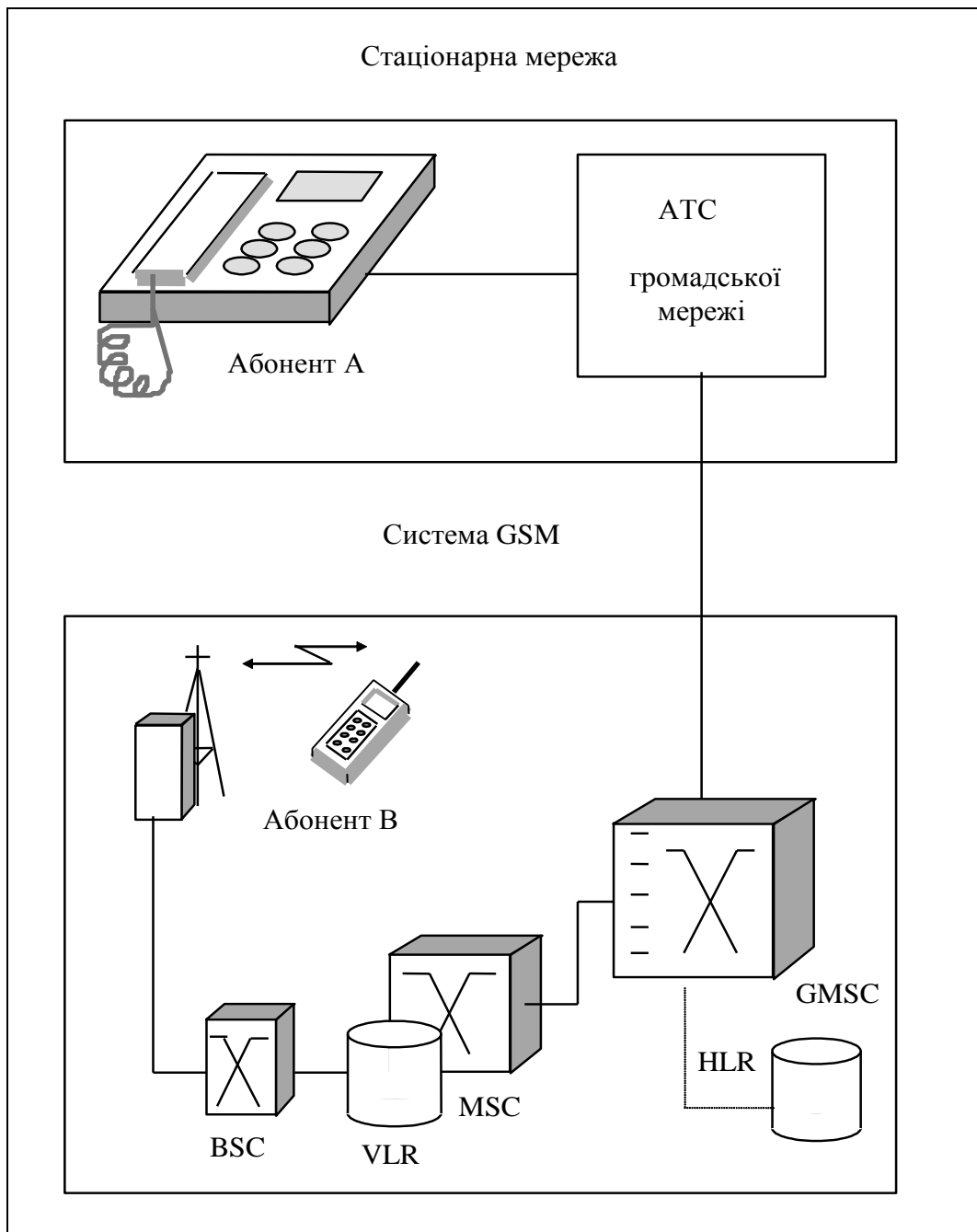


Рис.6.16 Схеми зв'язку від абонента стаціонарної мережі до абонента системи GSM

В реєстрі VLR номер IMSI абонента В визначає ідентифікатор потрібної зони викликів. Комутаційна станція MSC розсилає сигнали виклику до всіх базових станцій, які діють в її зоні викликів. Базові станції посилають сигнали виклику у викличному каналі PCH (англ. Paging Control Chanel). З метою уникнення посилки радіошляхом номера IMSI абонента В, комутаційна станція MSC виділяє йому тимчасовий номер рухомого абонента TMSI. Рухома станція,

що є в стані очікування і знаходиться в одній з комірок тієї зони викликів, розпізнає виділений їй номер TMSI і відповідає на сигнал виклику. Тоді базова станція виділяє їй розмовний канал і встановлюється з'єднання між абонентом А і абонентом В.

Попередній опис стосувався ситуації, в якій абонент В знаходився в своїй материнській системі GSM. Однією з важливих рис мережі GSM є те, що вона дає можливість рухомих станціям користуватися послугами систем GSM, якими керують різні оператори. В англійській літературі ця можливість називається "roaming". Рухома станція, яка знаходиться в зоні "чужої" системи GSM може генерувати і приймати сигнали з'єднання.

На рис. 6.17 показано ситуацію, в якій до рухомого абонента В, що знаходиться в зоні чужої системи GSM, адресується сигнал з'єднання від абонента стаціонарної мережі А. З'єднання від абонента А направляється спочатку до транзитної станції GMSC материнської системи GSM абонента В. Транзитна станція GMSC перевіряє в реєстрі HLR інформацію про теперішнє положення абонента В(1). У відповідь отримує від реєстру HLR адресу зони дії комутаційної станції (реєстру VLR) в системі GSM2, в якій тимчасово знаходиться абонент В(2). Транзитна станція GMSC посилає цю адресу далі до АТС стаціонарної мережі абонента А. На цій основі може бути встановлене з'єднання від стаціонарної мережі абонента А, через ряд посередницьких мереж, до транзитної станції GMSC системи IGSM2 і далі до відповідної комутаційної станції MSC/VLR.

6.2.4.5. Встановлення з'єднання від рухомої станції

Розглянемо тепер випадок, в якому викликаючим (абонентом А) є користувач мережі GSM. Після вибору ним номеру абонента В починається процедура встановлення з'єднання. В каналі вільного доступу RACH, що належить даній базовій станції, рухома станція посилає до MSC вимогу доступу. Комутаційна станція MSC виділяє абоненту А сигналізаційний канал, перевіряє його повноваження та змінює визначник стану в реєстрі VLR на

активний. Якщо користувач має право користування мережею, то отримує від MSC підтвердження доступу. Після отримання підтвердження базова станція абонента А посилає до центральної станції номер абонента В, вимагаючи встановлення з'єднання. В залежності від того, чи В є абонентом тієї самої системи GSM, що і абонент А, чи абонентом іншої телекомунікаційної мережі, його номер аналізується вже в комутаційній станції MSC або передається через транзитну станцію GMSC в зовнішню мережу. Далі встановлюється з'єднання, тобто виділяються розмовний і сигналізаційний канали і розпочинається передача розмовних сигналів.

6.2.4.6. Перемикання каналів

Описані раніше процедури зміни комірки стосувалися випадків, в яких рухома станція знаходилась в стані очікування. Розглянемо тепер ситуацію, в якій рухома станція знаходиться в активному стані, тобто з'єднана розмовним радіоканалом через базову станцію, позначимо її BTS1, з рештою системи GSM. Якщо рухома станція рухається, то в міру віддалення станції MS від базової станції BTS1 потужність сигналу, що приходить до рухомої станції, стає слабшою. В певний момент система повинна прийняти рішення про перемикання розмови на інший радіоканал в межах іншої комірки. Ця операція називається перемиканням каналів (англ. handover).

Рішення про перемикання каналів приймається в контролері базових станцій BSC на підставі інформації про потужність прийнятих сигналів рухомою станцією в розмовному каналі. Потужність прийнятого сигналу та його якість постійно вимірюється рухомою станцією, а результати вимірювань пересилаються в базову станцію. Для прийняття рішення про перемикання каналів потрібна інформація про потужність сигналів, що приходять з сусідніх комірок. З цією метою базова станція інформує рухому станцію про спеціальні частоти, на яких діють сигналізаційні канали сусідніх базових станцій. Рухома станція вимірює потужність сигналу на вказаних частотах, а результати вимірювань висилає до базової станції BTS1.

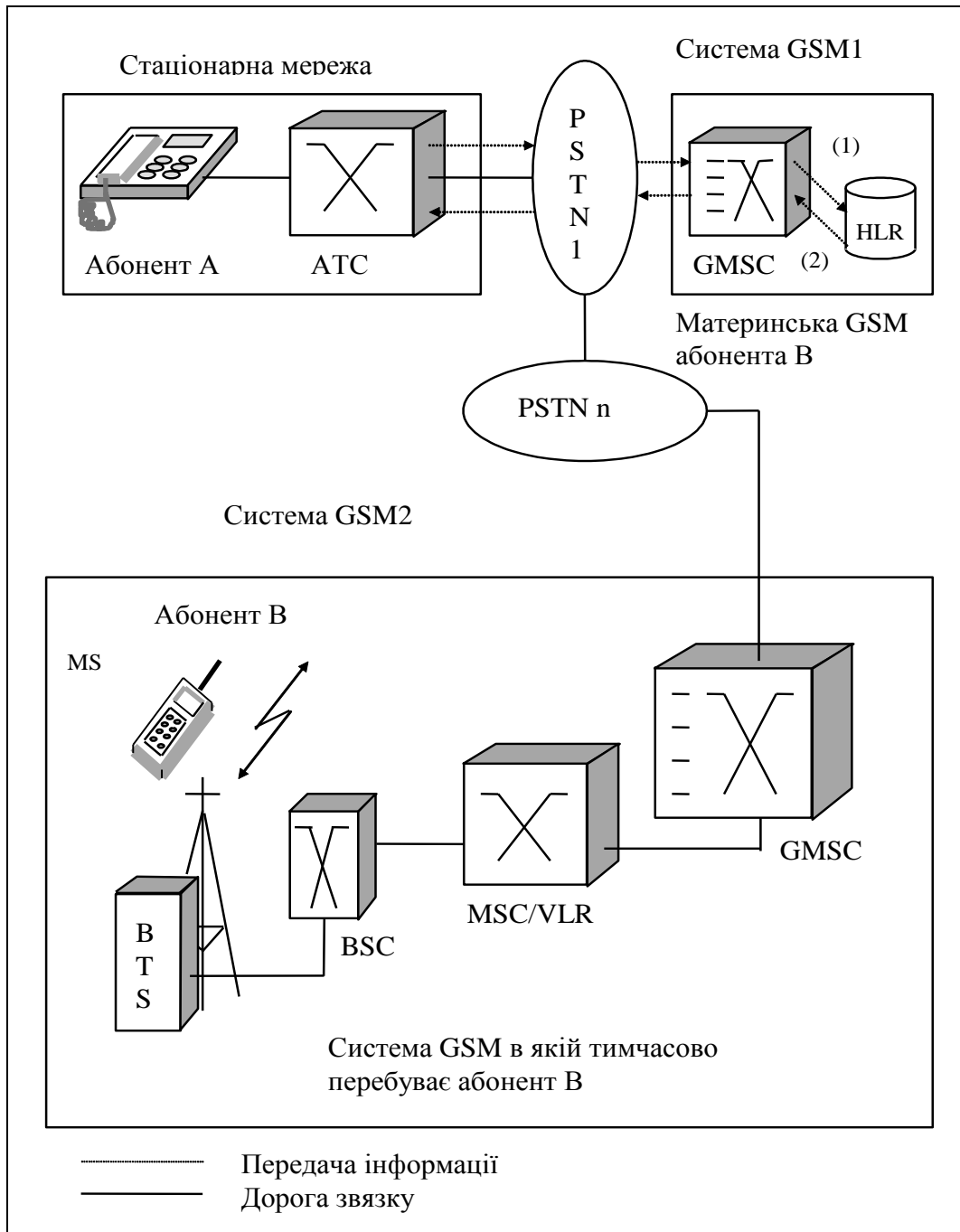


Рис.6.17 Передача інформації під час встановлення зв'язку від стаціонарної мережі до рухомого абонента, який знаходиться в “чужій” системі GSM

Контролер BSC порівнює отримані результати вимірювань і вирішує, коли і до якої базової станції повинно бути проведене перемикання, він також відповідальний за встановлення з'єднання по стаціонарних лініях до нової базової станції.

Вище описано ситуацію, в якій рухома станція повинна бути перемкнена до іншої базової станції в результаті погіршення умов поширення (англ. rescue handover), зв'язаних часто із збільшенням відстані від рухомої станції до базової BTS1. Погіршення умов поширення радіосигналу може бути зв'язане також з несприятливою конфігурацією поверхні, багатошляховістю і виникаючим у неї селективними затуханнями. Це часто трапляється в міських умовах. В такій ситуації можливе виділення станції MS розмовного каналу на іншій частоті в межах тієї самої комірки (англ. intracell handover). Якщо обидві частоти дуже відрізняються одна від одної, то досить правдоподібно те, що умови поширення на іншій частоті сприятливіші. Може статися також, що перемикання проводиться тоді, коли якість передачі є достатньо добра. Метою такого перемикання може бути оптимізація рівня інтерференції (англ. confinement handover) в сусідніх каналах. В деяких системах застосовують перемикання каналів у випадку, коли навантаження руху в даній комірці є набагато більше від навантаження в сусідніх комірках (англ. traffic handover).

В загальному, в ході прийняття рішення про перемикання, беруться до уваги наступні параметри:

- максимальні потужності передачі рухомої станції, актуальної базової станції та базових станцій в сусідніх комірках;
- біжучі результати вимірювань, які проводяться постійно рухомою станцією:
 - якість передачі в напрямку від BTS, до MS (оцінка на основі ймовірності помилок в каналі);
 - рівень прийнятого сигналу від “власної” базової станції в розмовному каналі;
 - рівень прийнятого сигналу від сусідніх базових станцій в їхніх сигналізаційних каналах на спеціальних частотах;
- біжучі результати вимірювань, що проводяться базовою станцією:
 - якість передачі в напрямку від MS до BTS (ймовірність помилок);
 - рівень прийнятого сигналу від даної рухомої станції в розмовному

каналі;

- відстань до рухомої станції від базової, що оцінюється на основні запізнення прийнятих сигналів;
- вимірювання навантаження руху, ємність комірки.

На рис. 6.18 показано чотири випадки перемикання каналів, які відрізняються один від одного засобами, які виконують дану процедуру. Опишемо її послідовність.

1. ПЕРЕМИКАННЯ КАНАЛІВ В РАМКАХ ТОГО САМОГО КОНТРОЛЕРА БАЗОВИХ СТАНЦІЙ BSC1. Це найпростіша з операцій перемикання. Контролер BSC1 встановлює з'єднання по кабельній лінії до нової базової станції BTS2, резервує один з розмовних каналів станції BTS2 і далі висилає до рухомої станції MS наказ перемикання на новий канал. Решта системи не бере участі в тій процедурі. Після перемикання контролер BSC1 передає рухомій станції нову інформацію про сусідні комірки. Якщо станція BTS2 належить також новій зоні викликів, то після закінчення перемикання рухома станція вимагає уточнення інформації про своє положення у реєстрі VLR.

2. ПЕРЕМИКАННЯ КАНАЛІВ МІЖ ДВОМА РІЗНИМИ КОНТРОЛЕРАМИ BSC В РАМКАХ ОДНІЄЇ ЗОНИ ДІЇ КОМУТАЦІЙНОЇ СТАНЦІЇ. В цьому випадку контролер BSC1 вимагає виділення каналів від комутаційної станції MSC1/VLR1. Встановлюється нове з'єднання кабельними лініями від комутаційної станції MSC1/VLR1 до контролера BSC2 і базової станції BTS3. В міру доступності каналів, йому виділяється новий розмовний канал. Рухома станція MS отримує накази зміни частоти і перемикання на новий канал. Подібно, як в попередньому випадку, якщо базова станція BTS3 належить до іншої зони викликів, то після закінчення з'єднання MS зажадає уточнення інформації про своє положення в реєстрі VLR1.

3. ПЕРЕМИКАННЯ МІЖ ДВОМА РІЗНИМИ ЗОНАМИ ДІЇ КОМУТАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ. В цьому випадку в операції перемикання бере

участь, відносно, найбільше засобів даної системи GSM. Комутаційна станція MSC1, до якої зараз під'єднаний даний абонент, вимагає перемикання від комутаційної станції MSC2, тої, яка обслуговує нову зону дії комутаційної станції. Комутаційна станція MSC2 тепер відповідає за встановлення з'єднання до базової станції BTS4. Після встановлення з'єднання між комутаційними станціями MSC1 і MSC2 комутаційна станція MSC1 висилає до рухомої станції наказ про перемикання.

4. ПЕРЕМИКАННЯ МІЖ ДВОМА СИСТЕМАМИ GSM. Цей варіант перемикання каналів вимагає взаємодії комутаційних станцій MSC1 і MSC3, які знаходяться в різних системах GSM. Це відбувається за посередництвом транзитних станцій GMSC1 і GMSC2 та стаціонарної мережі.

6.3. Рухома станція

Єдиною частиною системи GSM, яку бачить звичайний користувач є його рухома станція-MS (англ. Mobile Station). Вона називається просто комірковим телефоном. Існує кілька класів рухомих станцій, які відрізняються одна від одної потужністю передавача, розмірами та можливостями взаємодії з пристроями передачі даних.

6.3.1. Класи рухомих станцій

Рухомі станції відрізняються одна від одної як функціями, основними і додатковими, так і електричними параметрами, тобто, перш за все, максимальною потужністю рівня передачі, що впливає на розміри станції, та час роботи акумуляторів.

В таблиці 6.4 показано класи рухомих станцій, які об'єднані в стандарті GSM, як в діапазоні 900 мГц (GSM-900), так і діапазоні 1800мГц (система DCS-1800). Класи рухомих станцій визначено в залежності від максимальної потужності передавача. Історично найстарішими і найважчими були возимі станції, призначені для монтування в автомобілях з антеною, яка монтується ззовні автомобіля. Наступним етапом в еволюції рухомих станцій були переносні

моделі. Відносно висока потужність возимих і носимих станцій привела до того, що вони використовуються і зараз, а саме там, де місцевість покрита великими комірками (напр. сільська місцевість). Носимі станції можуть бути також пристосовані до монтажу в автомобілях. Останньою, найбільш популярною зараз генерацією рухомих станцій є кишенькові станції. Малі, вигідні і легкі термінали із зінтегрованою антеною, досить зручні для малокоміркових міських територій. Кінцевим обладнанням системи GSM може бути також безпроводний телефонний автомат та безпроводна комутаційна станція (використовується, напр., на кораблях, в поїздах і т.п.). Рухомі станції можуть також використовуватися для нерозмовних цілей, наприклад для передачі результатів вимірювань.

Більшість рухомих станцій, які зараз продаються - це кишенькові термінали, що призначені для передачі сигналів мови.

Важливим застосуванням терміналів системи GSM є передача даних, тобто сигналів з комп'ютерних модемів і телефаксу. З точки зору пристосування до передачі даних, термінали системи GSM поділяються на три типи, в залежності від місця встановлення модуля, що реалізує адаптивні функції TAF (англ. Terminal Adaptation Functions), які необхідні для передачі даних (рис. 6.19):

- MT0 (англ. Mobile Terminal type 0) - це найпростіший випадок, в якому як функції зовнішнього пристрою, так і адаптивні функції зінтегровані в одному пристрої. Термінали MT0 існують тільки для передачі мови;
- MT1 (англ. Mobile Terminal type 1) - це варіант, в якому термінал, який має ISDN-івський інтерфейс "S". До нього можуть бути підєднані будь-які зовнішні пристрої ISDN. Зовнішні пристрої, що мають модемний інтерфейс, можуть взаємодіяти з терміналом MT1 через ISDN-івський адаптер терміналу TA (англ. Terminal Adapter) - в цьому випадку адаптивні функції розподіляються між MT1 і TA;
- MT2 (англ. Mobile Terminal type 2) - це варіант, в якому адаптивні функції TAF повністю зінтегровані з терміналом і взаємодіють із зовнішнім пристроєм через класичний модемний інтерфейс.

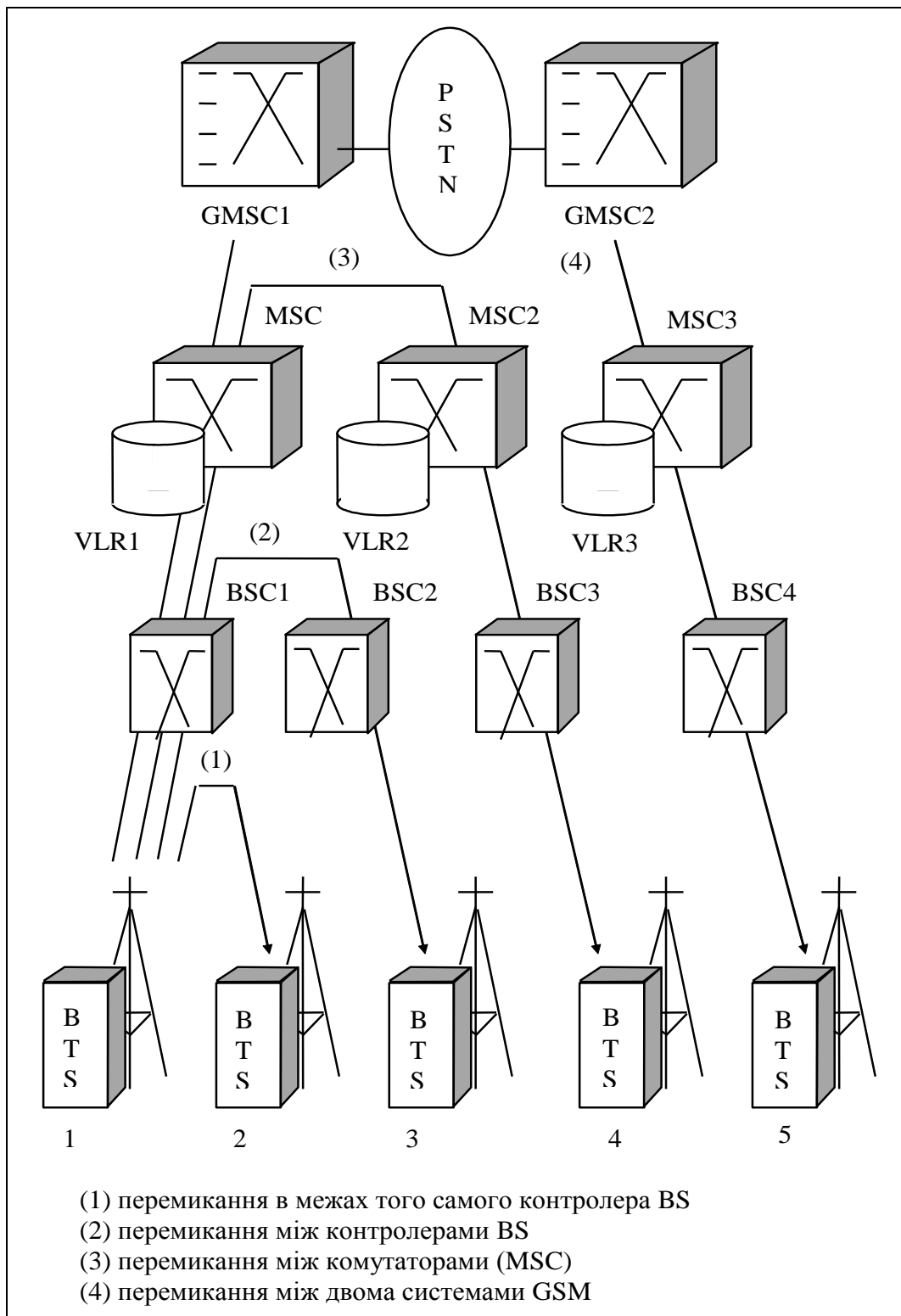


Рис.6.18 Варіанти перемикання радіоканалів

6.3.2. Архітектура і функції рухомої станції

6.3.2.1. Архітектура рухомої станції

На рис. 6.20 представлено функціональну схему рухомої станції GSM. Вона відповідає окремим етапам перетворення сигналу, що передається від мікрофону аж до моменту генерації сигналу на радіочастоті. З іншого боку показано на ній окремі етапи обробки прийнятого сигналу.

На рис. 6.21 показано, для прикладу, спрощену електричну схему носимої рухомої станції типу MT2. В цьому прикладі цифрова частина основної трансмісійної ланки станції складається з трьох цифрових мікросхем, які реалізують відповідно: кодування і декодування в каналі та корекцію радіоканалу.

Таблиця 6.4 Класи мобільних станцій в системах GSM 900 і DCS 1800

N	GSM 900		DCS 1800	
	Потужність передавача	Типи станцій	Потужність передавача	Типи станцій
1	20 Вт (43 дБм)	возимі і носимі	1 Вт (30 дБм)	кишенькові
2	8 Вт (39 дБм)	возимі і носимі	0,25 Вт (24 дБм)	кишенькові
3	5 Вт (37 дБм)	кишенькові	---	---
4	2 Вт (33 дБм)	кишенькові	---	---
5	0,8 Вт (29 дБм)	кишенькові	---	---

В аналоговій частині основної ланки обробки сигналів знаходиться аналогова мікросхема інтерфейсу між аналоговою частиною і цифровою, а далі підсилувачі, фільтри і конвертори частоти, аналого-цифрові перетворювачі, мікросхеми спряження і приймально-передавальна антена.

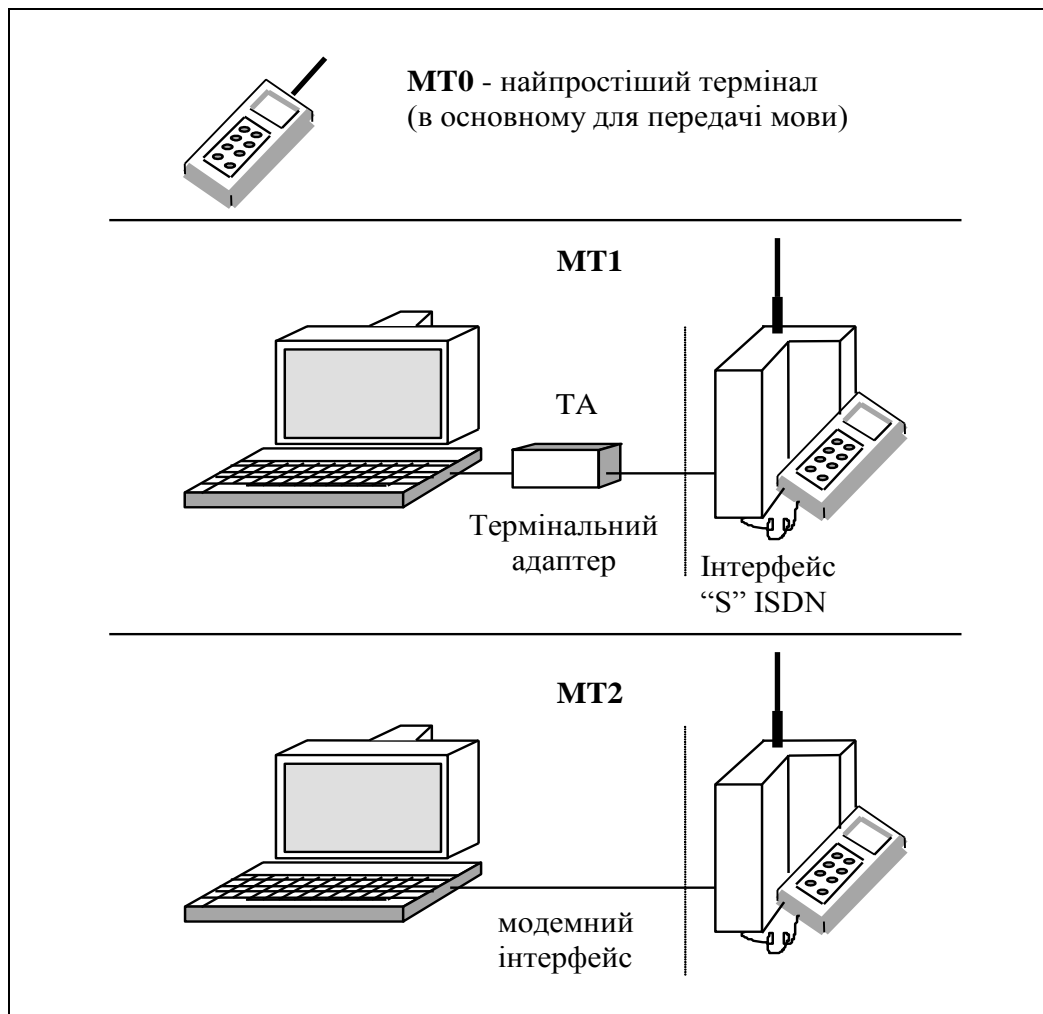


Рис.6.19 Типи мобільних терміналів з точки зору можливості передачі даних

Допоміжні функції виконуються в аналоговій частині модулем синхронізації, побудованим на основі фазової петлі та кварцевим генератором. Подібно в цифровій частині знаходиться ще дві цифрові мікросхеми, що виконують, відповідно, функції управління та адаптивні (стикові) TAF функції для передачі даних, а також зчитувач з модулю ідентифікації абонента SIM. Інтерфейс з користувачем складається з клавіатури, мікрофону і навушника та дисплея, необхідного, між іншим, для передачі коротких текстових повідомлень.

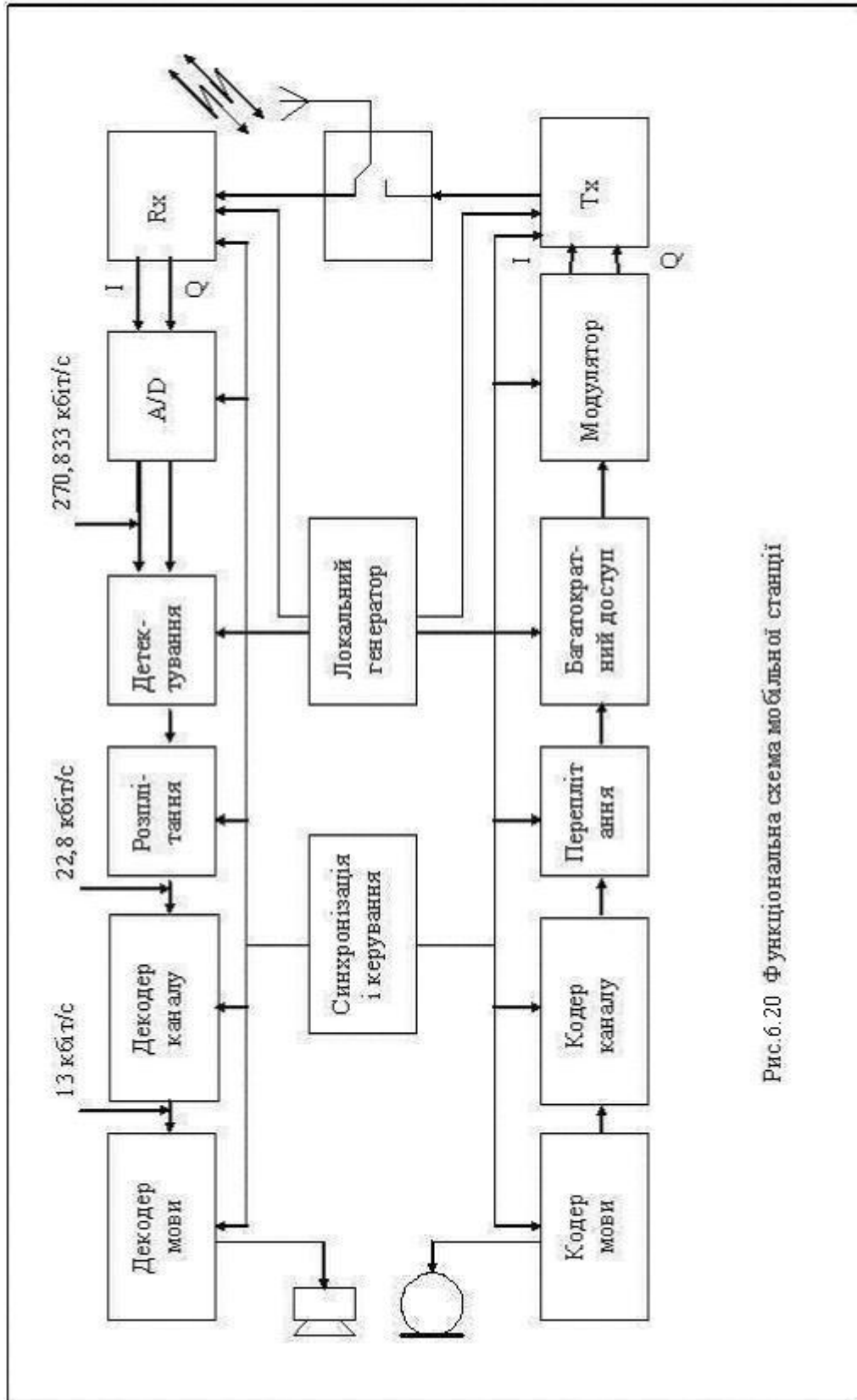


Рис. 6.20 Функціональна схема мобільної станції

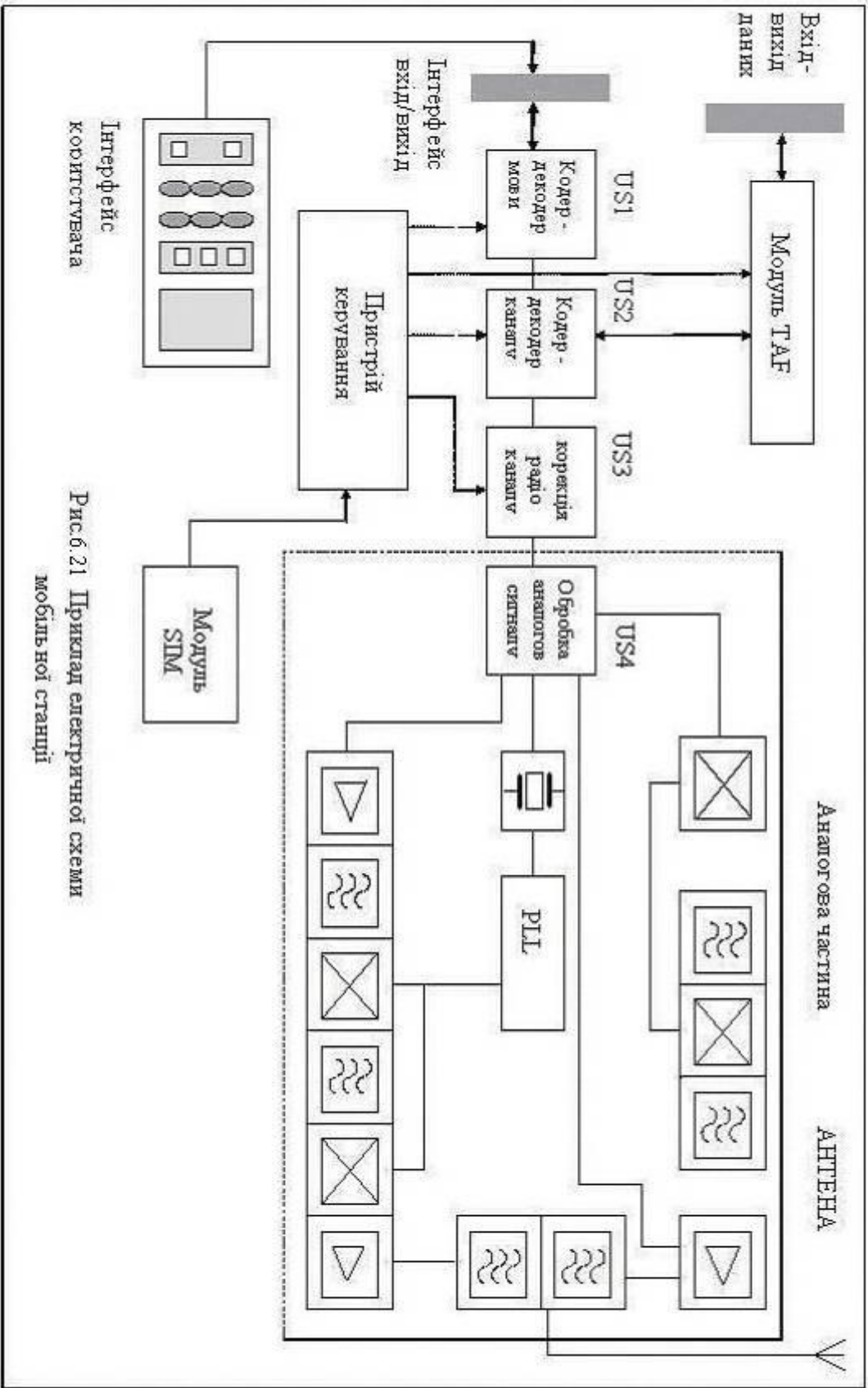


Рис. 6.21 Приклад електричної схеми мобільної станції

6.3.2.2. Функції рухомої станції

При описі в попередньому пункті архітектури рухомої станції названо вже деякі функції, що виконуються рухомою станцією, в основному пов'язані з обробкою переданих і прийнятих: сигналів. Нижче описано функції, що виконуються рухомою станцією:

- ОБРОБКА ПРИЙНЯТИХ І ПЕРЕДАНИХ СИГНАЛІВ - описана в п.3.2.1 і представлена на рис. 6.20;
- ДОПОМІЖНІ ФУНКЦІЇ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ З ТРАНСМІСІЄЮ - скакання по частотах, регулювання потужності, вимірювання якості прийнятого сигналу (вимірювання ймовірності помилок) від власної “базової” станції, вимірювання потужності прийнятих сигналів від “власної” і сусідніх базових станцій;
- ФУНКЦІЇ ІНТЕРФЕЙСУ З КОРИСТУВАЧЕМ – дозволяють користувачу зв'язатися з системою, використовуючи рухому станцію;
- ФУНКЦІЇ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ З ПЕРЕДАЧЕЮ ДАНИХ, ТОБТО АДАПТИВНІ ФУНКЦІЇ, ТА ФУНКЦІЇ, ПОВ'ЯЗАНІ ІЗ СПОСОБОМ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З АВТОМАТИЧНОЮ РЕТРАНСЛЯЦІЄЮ ПОМИЛКОВИХ ПАКЕТІВ ARQ (англ. Automatic Repeat reQuest).

В системі GSM рухома станція була стандартизована тільки частково. Не стандартизований, наприклад, інтерфейс людина-машина. Отже стандарт закінчується “всередині” рухомої станції, між радіоінтерфейсом і користувачем. Виробникам залишено певну свободу в проектуванні рухомих станцій, але діюча рухома станція не може вносити завад в роботу інших систем та повинна виконувати вимоги щодо зовнішніх параметрів.

Рухому станцію проєктовано, як інтелектуальний термінал. Вона виконує, звичайно, ряд локальних функцій (англ. local features), виконання яких не вимагає співпраці мережі. Тільки частина з них належить до мінімальної групи основних функцій, які повинен виконувати кожний термінал. Крім того, виробники можуть надати їй функції, які не вимагаються в стандарті GSM.

Група основних функцій робить одноманітними і спрощує користування терміналами незалежно від його типу і виробника. Важливою причиною, що виправдовує необхідність об'єднання групи основних функцій, є присутність стандартного-модуля SIM. Функції, які необхідні для правильної роботи модуля SIM, повинні знаходитись в кожній рухомій станції.

До групи основних локальних функцій належать такі функції: висвітлення набраного номеру, висвітлення інформації про перебіг виконуваного з'єднання, висвітлення інформації про систему GSM (країна+оператор), можливість вибору оператора в даній країні, можливість запису в терміналі міжнародного ідентифікаційного номеру IMEI. Важливими функціями, які не є основними, є функції, що пов'язані з обслуговуванням, коротких текстових повідомлень, тобто сигналізування отримання повідомлень та сигналізування переповнення пам'яті короткими повідомленнями. Інші функції, необов'язкові, це, наприклад, виконання рухомою станцією функції ISDN-івського інтерфейсу "S", скорочений вибір, можливість встановлення з'єднань тільки до деяких номерів, повтор останнього номеру, блокування вихідних з'єднань чи висвітлення нарахування оплати і т. п.

6.3.2.3. Електричні параметри рухомої станції

Основною функцією, яка виконується в трансмісійному аспекті рухомою станцією, є генерація правильного сигналу на радіочастоті та посилка його в канал. В зв'язку з тим, що кількість рухомих станцій та інших електронних пристроїв, які мають доступ до радіоканалу, може бути дуже великою, необхідним є дуже старанний нагляд за електричними параметрами випромінюваного сигналу. Нижче описано кілька найважливіших вимог, об'єднаних в стандарті GSM, які стосуються параметрів випромінюваного сигналу в радіоканал.

- **ПОТУЖНІСТЬ ПЕРЕДАВАЧА.** В таблиці 6.4 представлено класи рухомих станцій систем GSM-900 та DCS-1800 з точки зору максимальної потужності передавача рухомої станції. З іншого боку дуже важливо, щоб

не передавати потужності більшої, ніж необхідно для якісної передачі. Дуже високий рівень сигналу передачі рухомої станції збільшує рівень інтерференції в сусідніх каналах і скорочує термін дії батарей. В системі GSM застосовано механізм управління потужністю (англ. power control). З наказу базової станції рухома станція повинна мати можливість регулювання рівня сигналу передачі від максимального рівня для свого класу, через 2 dB, до мінімального рівня +13 dBm. Це дозволяє динамічно регулювати потужність сигналу передачі в залежності від відстані між рухомою та базовою станціями. Побічним ефектом регулювання потужності рухомої станції є небажане випромінювання в сусідніх радіоканалах на частоті, вищій від несучої на 400 кГц. З метою максимального обмеження інтерференції між рухомими станціями, які працюють в тій самій комірці, специфікація GSM окреслює максимальну величину небажаного випромінювання в діапазоні приймання рухомої станції GSM (канал “вниз” - 935-960 МГц): для рухомих станцій першого класу -76 dBm і -84 dBm для інших класів. Крім того, стандарт GSM об'єднує також зразки, що характеризують часові параметри процедур ввімкнення і вимкнення рухомої станції (рівень потужності передавача від функції часу).

- **НЕБАЖАНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПОЗА ДІАПАЗОНОМ.** Крім описаних вище обмежень, що стосуються максимальних рівнів небажаних сигналів, генерованих в діапазоні GSM, стандарт GSM об'єднує також обмеження на потужність небажаних сигналів на частотах, що лежать поза діапазоном GSM. Метою обмежень є уникнення інтерференції з електронним обладнанням, діючим в інших діапазонах частот. Обмеження стосуються максимальної величини потужності небажаного сигналу в діапазоні частот від 9 кГц до 12,75 ГГц. Ці величини становлять: -36 dBm для діапазону від 9 кГц до 1 ГГц (за винятком діапазону GSM) і -30 dBm для діапазону від 1 ГГц до 12,75 ГГц.

- **СТАБІЛЬНІСТЬ ЧАСТОТИ.** Базова станція підстроює частоту рухомої станції на основі свого дуже точного еталону. Висока стабільність частоти в передавачах базових станцій (не менше $5 \cdot 10^{-8}$) дозволяє застосувати відносно дешеві кварцеві генератори в рухомих станціях (їх стабільність приблизно рівна $3 \cdot 10^{-6}$). Для порівняння, рухомі станції в аналогових коміркових системах повинні мати стабільність частоти приблизно $1 \cdot 10^{-6}$.
- **ТОЧНІСТЬ МОДУЛЯЦІЇ.** В системі GSM застосовано модуляцію GMSK з параметром $BT=0.3$. Постійна огинаючої сигналу GMSK дозволяє застосувати в рухомих станціях високопродуктивні нелінійні підсилювачі класу C. З метою забезпечення ефективного використання діапазону частот в стандарті GSM введено досить жорсткі вимоги щодо точності модуляції. Максимальне відхилення несучої частоти становить 90 Гц, а середньоквадратична величина шуму фази не може перевищувати 5%.
- **ДИНАМІЧНИЙ ДІАПАЗОН.** Мінімальні межі регулювання приймача рухомої станції становлять 94 dB (92 dB для кишенькових терміналів), що дозволяє рухомій станції приймати сигнали на відрізку від -10 до -104 dBm (до -102 dBm для кишенькових терміналів).
- **ЖИВЛЕННЯ.** Живлення рухомих станцій є важливим параметром саме тоді, коли беремо до уваги прагнення створити щораз менші і легші термінали, в яких часто містяться акумулятори все меншої ємності. З іншого боку конструктори рухомих станцій прагнуть забезпечити своїм виробам хоча б 8-годинний “робочий день”. В цій ситуації широко використовуються елементи CMOS, бо мають малу споживану потужність. Шансом створення економічніших терміналів є розвиток напівпровідникових технологій, тобто створення елементів, що потребуватимуть щораз менших напруг живлення. Основним обмеженням в цьому випадку є, однак, аналогова радіочастина, яка потребує певної потужності для передачі сигналу в радіоканалі.

6.3.3. Модуль SIM

В системі GSM впроваджено розподіл між характеристиками абонента і його обладнанням. Рухома станція була поділена на дві частини (рис. 6.22). В першій частині містяться всі функції запрограмованого обладнання, що пов'язані з обслуговуванням радіоінтерфейсу, а також стику із зовнішніми пристроями. В другій містяться ідентифікаційні дані користувача. Перша частина - це, практично, термінал системи GSM, який однак для своєї роботи потребує “ключа”, зв'язаного з абонентом, який його використовує. Цим ключем є так званий ідентифікаційний модуль абонента SIM (англ. Subscriber Identity Module). В стандарті GSM рухому станцію, позбавлену модуля SIM, називають рухомих обладнанням (англ. Mobile Equipment-ME). Стик між модулем SIM і рухомих обладнанням стандартизований (так званий Інтерфейс SIM-ME).

Переваги відокремлення модуля SIM від решти функцій рухомої станції системи GSM такі. В типових аналогових коміркових системах залишення терміналу без нагляду давало неуповноваженим особам можливість доступу до засобів абонента, включно з веденням розмов за його рахунок, читанням повідомлень, що надходять до цього абонента, і т. д. Позичити термінал іншій особі було нелегко, а купівля терміналу відбувалась тільки в спеціалізованих пунктах і була рівнозначною з реєстрацією абонента в системі. Обмін терміналу на інший, більш сучасний, зв'язаний був з необхідністю візиту до представника оператора системи.

Всі ці проблеми були розв'язані з впровадженням в системі GSM ідентифікаційного модуля абонента SIM. В цьому випадку рухоме обладнання ME без модуля SIM стало майже “обладнанням домашнього господарства”, яке можна придбати без обмежень в магазинах, тому що його купівля відокремлена від реєстрації абонента в системі GSM. Єдиним елементом, який потрібно старанно зберігати є модуль SIM, але цей модуль захищений від несанкціонованого доступу системою символів. Володіння кількома терміналами не викликає проблем для абонента, їх монтують фірми, здають на

прокат в автомобілі або в таксі. Наприклад, власники кишенькових терміналів, придатних для міських теренів, переїзжаючи в сільську місцевість можуть брати на прокат термінали більшої потужності. Абонент, який має тільки карту SIM, може телефонувати з різних терміналів на власний рахунок, причому термінал, позбавлений модуля SIM, дозволяє вести нетарифіковані розмови (телефонувати в поліцію, пожежну, швидку допомогу і т. д.). Будь-які зміни інформації, записаної на карті SIM (напр. зміна повноважень абонента), вже не потребують посередництва продавців обладнання і навіть втручання в сам пристрій - оператор обмежується контактом з користувачем і його модулем SIM.

Модуль SIM може бути виконаний, як інтелектуальна карта (англ. smart card), розмірами стандартної кредитної картки, що вкладається до зчитувача терміналу перед встановленням зв'язку і виймається після його закінчення. Незалежно від способу виконання, модуль SIM містить в собі мінікомп'ютер з пам'яттю ROM, EEPROM, RAM і процесор з пристроями вводу/виводу. Модулі такого типу, виконані в формі карт, використовуються все частіше в різних застосуваннях, від інтелектуальних телефонних карт до банківських карт, системи нагляду за доступом до закритих об'єктів і т. д.

Найважливіші функції модулю SIM такі:

- зберігання інформації, записаної оператором, і використання її в процедурах, що пов'язані із захистом системи та генеруванням ключа Kc, який шифрує передачу в радіоканалі;
- зберігання оперативної інформації, згрупованої користувачем коротких повідомлень, що надходять до нього;
- захист доступу до даних за допомогою кодів доступу.

Модуль SIM охороняється від доступу неуповноважених осіб за допомогою коду доступу PIN (англ. Personal Identity Number). Код PIN записується в модулі SIM в момент реєстрації користувача в системі. Він становить від 4 до 8 цифр. Користувач має можливість зміни як самого коду,

так і його довжини, може також виключити його з дії, використовуючи спеціальну функцію (англ. PINdisabling function). Триразове вписування помилкового коду PIN приводить до заблокування карти. В такій ситуації карта SIM може бути розблокована тільки після введення довшого розблоковуючого коду PUK (англ. Personal Unblocking Key).

Підсумовуючи, в модулі SIM зберігається така інформація:

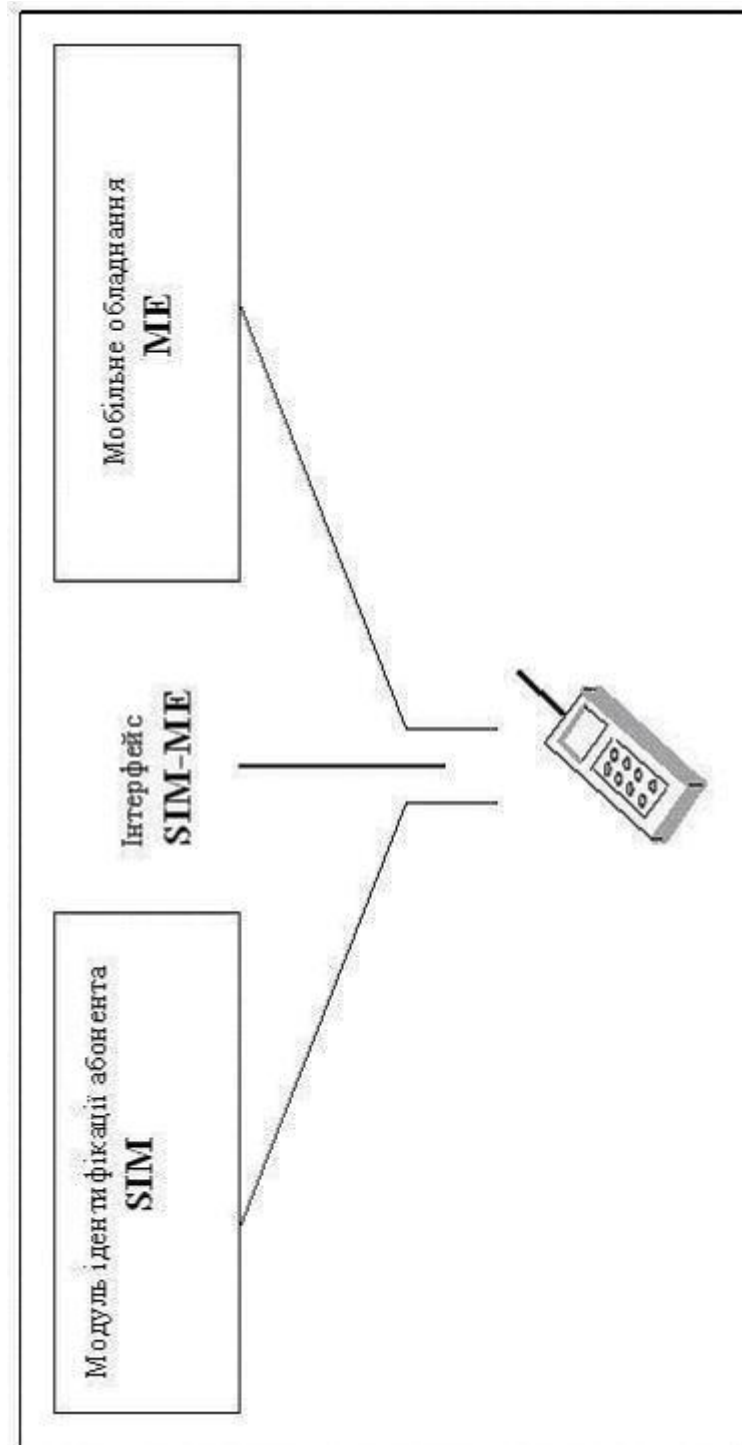


Рис.6.22 Мобільна станція системи GSM

- ідентифікаційний ключ та алгоритми шифрування для криптографічних процедур (K_i, A₃, A₈);
- міжнародний номер рухомого абонента (IMSI);
- номер “обладнання” абонента в мережі GSM (IMEI);
- тимчасовий номер рухомого абонента (TMSI);
- інформація про актуальне положення рухомої станції, тобто номер зони викликів (LAI);
- повноваження абонента;
- список скорочених номерів з індексом;
- короткі текстові повідомлення, прийняті під час відсутності абонента;
- права абонента відносно вибору системи GSM;
- код доступу (PIN) та розблоковуючий код (PUK).

Впровадження модуля SIM - це крок в напрямку систем особистого зв'язку PCN (англ. Personal Communication Network), в яких в майбутньому користувач, маючи тільки свій ідентифікатор, буде в стані використовувати послуги будь-якої телекомунікаційної системи в будь-який момент часу і в будь-якому місці на землі, оплачуючи тільки за фактичне використання засобів системи.

6.4. Ансамбль базових станцій

Спрощена структурна схема ансамблю базових станцій показана на рис. 6.23. Архітектура ансамблю базових станцій двохрівнева. З боку комутаційної станції MSC знаходяться блоки управління базовими станціями BSC, а після них базові станції BTS. Базові станції під'єднані через радіоканали до рухомих станцій MS. Додатковим модулем, який входить в склад ансамблю базових станцій є модуль транскодера TRAU (англ. Terminal/Rate Adaptation Unit).

6.4.1. Архітектура ансамблю базових станцій

Представлена на рис. 6.23 двохрівнева організація комплексу базових

станцій - це новинка порівняно з аналоговими комірковими системами. Завданням проєктантів було спрощення конструкції і зниження коштів діючих пристроїв на периферіях системи, на великій відстані від комутаційної станції MSC. Ансамбль базових станцій поділено на частини - керуючу (блоки керування BSC) і передавальну (базові станції BTS). З комутаційної станції MSC до "інтелігентної" керуючої частини перенесено ряд комутаційних функцій і функцій керування, пов'язаних з обслуговуванням радіоінтерфейсу. Один блок управління BSC керує, типово, роботою кількох або кількох десятків базових станцій. В необслуговуваних базових станціях залишено тільки приймально-передавальне обладнання, що відповідає аналогічним модулям в рухомих станціях.

Стик ансамблю базових станцій з комутаційною станцією MSC нормалізовано. Він носить назву інтерфейсу А. В зв'язку з тим, що комутаційні станції системи GSM, як передбачалося, будуть наступним кроком після ISDN-івських, на трансмісійному рівні обидва типи комутаційних станцій повинні стикуватися. Отже, бінарний канал в інтерфейсі А - це стандартний канал ІКМ з швидкістю 2048 кбіт/с, згідно вимог ССІТТ G.703. Мультиплексування (організація каналу) відбувається з використанням періоду в 125 с, в групі є 32 канали, швидкість кожного 64 кбіт/с. Існування стандартного інтерфейсу А дає можливість застосувати в тій самій системі GSM комутаційні станції від різних виробників. Сигналізацію організовують порівнево, згідно з моделлю OSI, базуючись на системі сигналізації SS7. Часові інтервали в каналі 2048 кбіт з інтерфейсу А можуть використовуватися як розмовні канали, так і як сигналізаційні. Спільний сигналізаційний канал створюється на основі одного або кількох каналних інтервалів в каналі 2048 кбіт/с.

Інтерфейс А - це посередник між комутаційно-мережною частиною та ансамблем базових станцій. В системі GSM нормалізований також внутрішній стик ансамблю базових станцій. Блок керування базовими станціями BSC взаємодіє з базовими станціями BTS через інтерфейс А-bis. Подібно, як і в системі ІКМ, використано організацію бінарного каналу із швидкістю передачі

2048 кбіт/с.

6.4.2. Базова станція BTS

6.4.2.1. Функції базових станцій

Базова станція взаємодіє з одного боку через радіоінтерфейс з базовими станціями, а з другого боку, через інтерфейс A-bis - з блоком керування базовими станціями. Найважливіші функції базових станцій такі:

- реєстрація викликів (наказ виділення окремого сигналізаційного каналу) від рухомих станцій;
- функції, що пов'язані з перетворенням сигналу в передавальному та приймальному напрямках: кодування і декодування мови, кодування і декодування каналу, переплутування (змішування) і розплутування, модуляція і демодуляція; та в передаючому напрямку: перенесення сигналу до радіочастоти, підсилення і подача радіосигналів (англ. combining) на антену; а в приймальному напрямку: фільтрація сигналів, розподіл і перенесення до основного спектру;
- шифрування і дешифрування сигналів передачі в радіоканалі;
- передача результатів власних вимірювань та результатів, отриманих від рухомих станцій, до блоку керування BSC;
- виконання скакання по частотах;
- забезпечення синхронізації між рухомою станцією і базовою.

Базова станція може працювати на одній або кількох радіочастотах (максимально до 16). Для кожної частоти повинен бути власний передавач і приймач. На рис. 6.24 представлено основні функціональні блоки станції, яка працює на чотирьох частотах. Подібно як в описаній раніше функціональній схемі рухомої станції, в базовій станції можна виділити цифрову і аналогову частини.

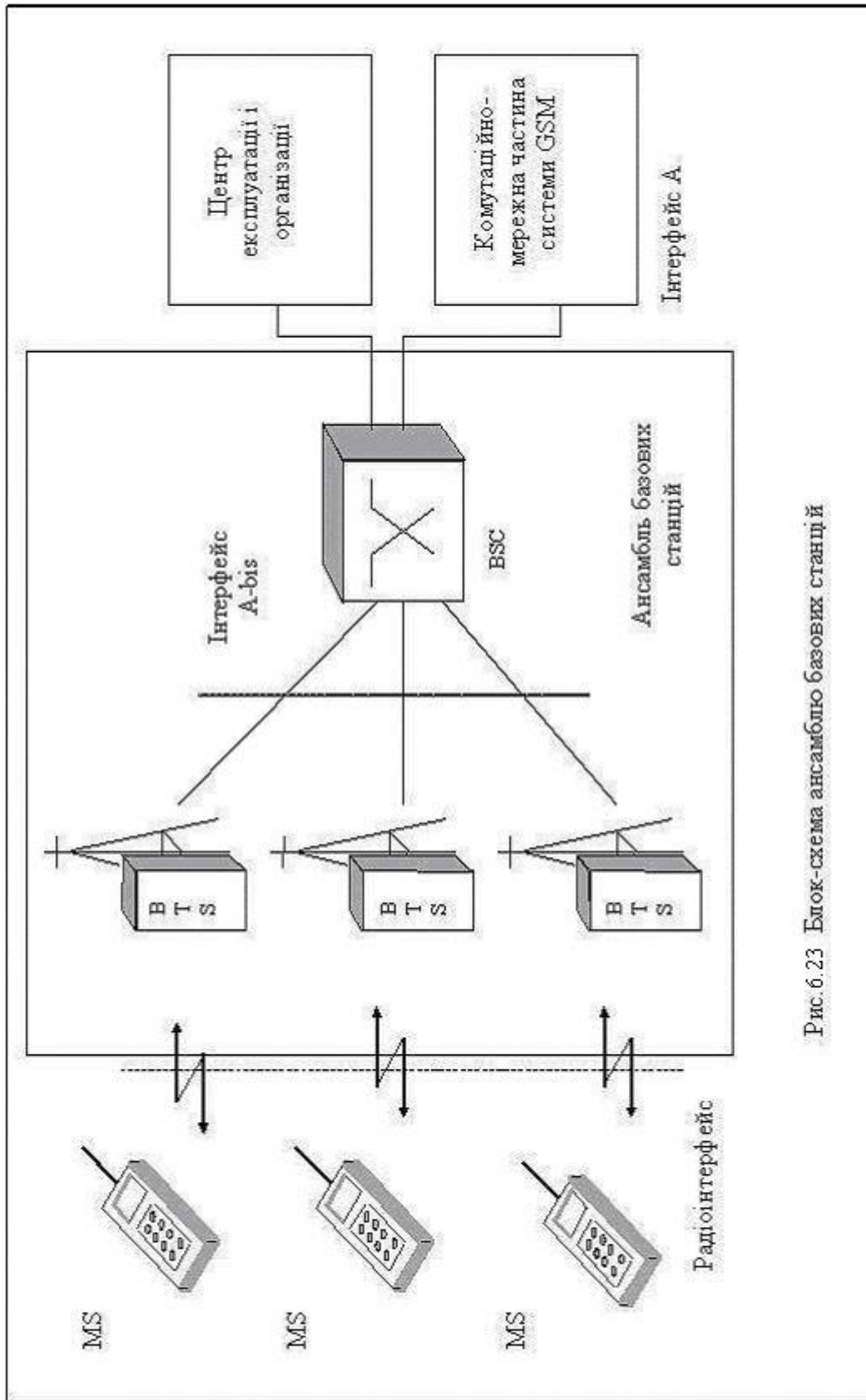


Рис. 6.23 Блок-схема ансамблю базових станцій

Завданням цифрової частини є, перш за все, перетворення інформаційних сигналів (мови або даних) в обох напрямках. В цій частині виконується також скакання по частотах. В аналоговій частині базової станції знаходяться чотири передавачі TX і чотири приймачі RX, по одному для кожної частоти, та групоутворювач і модуль RXFE. Кожний передавач TX містить цифро-аналоговий конвертор C/A, модуль GMSK, конвертор сигналу до радіочастоти та підсилювач потужності. Наступним блоком є групоутворювач, який дозволяє передавати кілька радіосигналів з допомогою однієї антени (його будова і можливості будуть описані далі). Передавальна антена часто виконується як окремий елемент відносно приймальної антени. З приймальної сторони знаходиться приймальна антена, а потім аналоговий модуль початкової обробки високочастотних сигналів RXFE (англ. Receiver Front-End). В цьому модулі міститься розгалужувач, смугові фільтри та підсилювачі з низьким рівнем шумів. В блоках приймачів RX відбувається перетворення частоти до основної смуги та аналого-цифрова конверсія сигналів прийому. Демодуляція проходить в модулі цифрового перетворення сигналів, спільно з процедурою корекції радіоканалу, але різні виробники мають свободу відносно власних розв'язків.

Якщо розглянути типове обладнання стійки базової станції, то цифрова частина займає тільки невелику частину стійки. Цифрові блоки з уваги на їх невелику вагу розміщені в верхній частині стійки. Головна частина займає чотири передавально-приймальні модулі (для чотирьохчастотної базової станції), кожний з яких має вентилятор, що покращує тепловий обмін з оточуючим середовищем. В середній частині стійки розташовані блоки початкової обробки радіосигналу та групоутворюючі блоки. Якщо стійка розташована в приміщенні АТС, то може користуватися блоками живлення, спільними для багатьох пристроїв. В іншому випадку біля стійок базової станції монтується окремий блок живлення. Блокова будова базової станції дозволяє гнучку розбудову. Збільшення кількості частот базової станції відбувається доповненням наступних стійок.

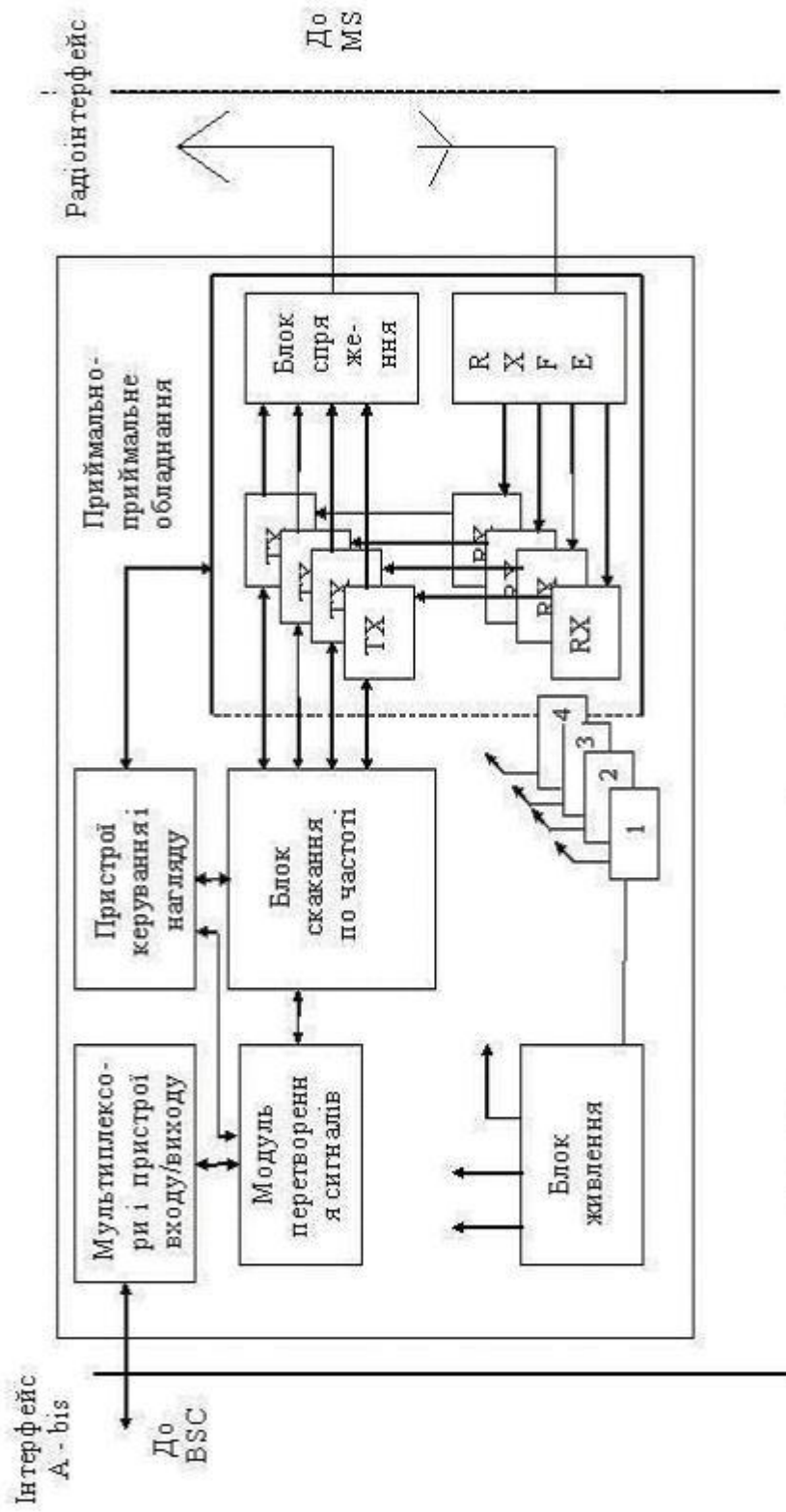


Рис. 6.24 Функціональна схема базової станції

Одним з елементів базової станції, який заслуговує на додаткову увагу, є блок групоутворювача (англ. combiner). Цей блок, який дозволяє об'єднати кілька вихідних сигналів з кількох передавачів на вході антени, будується на основі резонансних схем (англ. cavity combiner), які однак мають відносно великі зовнішні розміри. При кожній зміні групи частот, що присвоюються даній базовій станції, такі схеми потребують часто ручного підстроювання. Групоутворюючі блоки діють на резонансному принципі, що приводить до втрат потужності приблизно 5 dB для кількох передавачів.

Іншим варіантом будови групоутворювача є гібридні схеми (англ. hybrid combiners), що виконують пасивну комбінацію сигналів передавача. Їх перевага - це малі розміри і широка смуга. Вони не вимагають підстройки, можуть підлаштовуватись під зміни в конфігурації мережі і створюють сприятливі умови для процедури скакання по частотах. Недоліком гібридних схем є великі втрати по потужності і мала селективність. Гібридні групоутворювачі мають втрати для кількох передавачів приблизно 7 dB.

Максимальна вихідна потужність базової станції в системі GSM визначається відносно входу блоку групоутворення. Отже, якщо прийняти, що втрати в схемі групоутворювача рівні 6 dB, то наприклад, у випадку базової станції третього класу в системі GSM900 (максимальна потужність 80 Вт) потужність сигналу на виході антени становить тільки 20 Вт.

6.4.2.2. Електричні параметри базових станцій

Подібно, як у випадку рухомої станції, стандарт GSM приділяє багато уваги вимогам щодо параметрів сигналів, як корисних, так і некорисних, що передаються базовою станцією в радіоканал:

- **КЛАСИ ПОТУЖНОСТІ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ.** Максимальна потужність передавача базової станції є важливим параметром системи, який характеризує максимально допустиму відстань від рухомої станції до базової, тобто розміри комірки. В таблиці 6.5 показано основні класи потужності базових станцій, які об'єднані в стандарті GSM для систем

GSM-900 та DCS-1800. В наступних роках впровадження систем GSM у світі щораз більшого значення набирають малокоміркові системи, які раніше застосовувались тільки в безпроводній телефонії. В зв'язку з тим у вимогах фази 2 системи GSM подано величини максимальної потужності базових станцій також для мікрокомірок (таблиця 6.6). Класи, що відповідають найменшим величинам потужності, порядку 0,1 Вт, відповідають коміркам розмірами тільки кілька десятків метрів.

- РЕГУЛЮВАННЯ ВИПРОМІНЮВАНОЇ ПОТУЖНОСТІ. З метою обмеження рівня інтерференції в системі GSM застосовано механізм регулювання потужності. В міру наближення рухомої станції до базової, базова станція, подібно як рухома, на вимогу блока керування BSC змінює потужність свого передавача від максимальної величини для свого класу до рівня 13 dBm з кроком 2 dB. Подібно як в рухомих станціях, побічним ефектом регулювання потужності є небажане випромінювання в сусідніх радіоканалах на частотах вище 400 кГц до сигналу несучої. Максимально допустимий рівень небажаного сигналу, який є результатом регулювання потужності базової станції, становить -103 dBm в смузі прийому 890-915 МГц для всіх класів потужності базових станцій.
- НЕБАЖАНЕ ВИПРОМІНЕННЯ ПОЗА СМУГОЮ. В стандарті GSM говориться, що рівень потужності небажаного сигналу поза смугою системи GSM, який випромінює базова станція, що працює в передавальному режимі, не може бути вищим -36 dBm в діапазоні частот від 9 кГц до 1 ГГц. Це означає, що для базової станції першого класу рівень потужності небажаного сигналу повинен бути на 91 dB нижчим від максимального рівня потужності з таблиці 6.5. В діапазоні від 1 ГГц до 12,75 ГГц максимальна величина небажаного випромінення становить -30 dBm. Жорсткіші вимоги стосуються допустимих рівнів завад для базових станцій і рухомих, що працюють в режимі приймання. Рівень завад не повинен перевищувати -57 dBm в смузі від 9 кГц до 1 ГГц і -47 dBm в смузі від 1 ГГц до 12,75 ГГц.

- **СТАБІЛЬНІСТЬ ЧАСТОТИ.** Частота базових станцій служить еталоном для рухомих станцій. Тому в передавачах базових станцій використовуються дуже точні і стабільні генератори частот. Стабільність частоти базових станцій повинна становити не менше $5 \cdot 10^{-8}$.
- **ТОЧНІСТЬ МОДУЛЯЦІЇ І ДИНАМІЧНИЙ ДІАПАЗОН.** Точність модуляції і динамічний діапазон базових станцій повинні бути такі самі, як і в рухомих станціях. Величина максимального відхилення несучої частоти становить $(\pm)90$ Гц, а середньоквадратична величина шуму не повинна перевищувати 5%. Мінімальний динамічний діапазон базових станцій становить 92 dB; приймач базової станції може приймати сигнали рухомих станцій в діапазоні від -10 dBm до -104 dBm.

6.4.3. Блок керування базовими станціями

Між комутаційно-мережною частиною системи і базовими станціями знаходяться блоки керування базовими станціями BSC. Вони виконують роль, пов'язану, перш за все, з керуванням обслугою радіоканалів в окремих комірках, мають власне комутаційне поле, займаються також кабельними лініями до базових станцій.

НАЙВАЖЛИВІШІ ФУНКЦІЇ БЛОКІВ КЕРУВАННЯ БАЗОВИМИ СТАНЦІЯМИ:

- конфігурування і керування розмовами та сигналізаційними радіоканалами підлеглих йому базових станцій;
- керування скаканням по частотах;
- керування процедурою шифрування радіопередачі;
- виклик рухомих станцій;
- керування потужністю підлеглих йому базових та рухомих станцій;
- керування перемиканням каналів;
- контроль ймовірності помилок в незайнятих радіоканалах;
- контроль ймовірності помилок і рівня потужності прийнятих сигналів базових станцій та рухомих в зайнятих радіоканалах;

- комутація з'єднання з метою концентрації руху на лініях до комутаційної станції MSC;
- утримування і нагляд за з'єднаннями між блоками керування і базовими станціями.

Спрощена функціональна схема блока керування базовими станціями представлена на рис. 6.25. Частина комутаційних функцій була перенесена з комутаційної станції MSC на комутаційне поле блока керування, що привело до зменшення кількості центральних станцій в системі та зниження коштів передачі в стаціонарній частині GSM (BSC як концентратор). Плата сигналізації блока керування відповідає за виконання сигналізаційних протоколів в інтерфейсах A та A-bis. Блок керування наглядає за встановленням з'єднань та роз'єднанням на комутаційному полі та керує підлеглими блоку керування радіозасобами. Блок експлуатації та обслуговування аналізує і зберігає інформацію про помилки в роботі підлеглої їй системі та генерує сигнали тривоги. Через стик X.25 блок керування з'єднаний з центром експлуатації та обслуговування системи GSM.

Деякі виробники не виключають також в недалекому майбутньому можливості об'єднання блоків управління BSC і комутаційних станцій MSC. В разі потреби, розширення функцій блока керування до функцій повної комутаційної станції MSC (напр. в ситуації коли кількість абонентів, що обслуговуються даним блоком керування значно зростає) вимагатиме тільки зміни програмного забезпечення.

Блоки керування базовими станціями часто встановлюються в системі як самостійні пристрої, але можуть бути також інтегровані з обладнанням базових станцій або на іншому кінці трансмісійної ланки, з обладнанням станції MSC, все ж залишаючись функціонально частиною ансамблю базових станцій.

Зі сторони нижчих рівнів системи GSM (базових і рухомих станцій) - блоки керування з'єднані стаціонарними лініями з базовими станціями (рис. 6.23).

Таблиця 6.5 Основні класи потужностей базових станцій в системах GSM 900 і DCS 1800.

Клас	GSM 900	DCS 1800
1	320 Вт (55 дБм)	20 Вт (43 дБм)
2	160 Вт (52 дБм)	10 Вт (40 дБм)
3	80 Вт (49 дБм)	5 Вт (37 дБм)
4	40 Вт (46 дБм)	2,5 Вт (34 дБм)
5	20 Вт (43 дБм)	---
6	10 Вт (40 дБм)	---
7	5 Вт (37 дБм)	---
8	2,5 Вт (34 дБм)	---

Таблиця 6.6 Класи потужностей базових станцій в малокоміркових системах.

Клас	GSM 900	DCS 1800
M1	0,25 Вт (24 дБм)	1,6 Вт (32 дБм)
M2	0,08 Вт (19 дБм)	0,5 Вт (27 дБм)
M3	0,03 Вт (14 дБм)	0,16 Вт (22 дБм)

Представлена на рис. 6.23 зіркова структура з'єднань, в якій кожна базова станція BTS з'єднана індивідуальною лінією з блоком BSC не є єдиною можливою. На рис. 6.26 показано також іншу конфігурацію. З економічної сторони можна застосувати послідовне з'єднання "n" базових станцій або послідовні з'єднання з петлею. В останньому випадку правильна робота всіх базових станцій можлива навіть тоді, коли одне з'єднання буде обірване. Можливість виконання з'єднань від блока керування базових станцій до базових станцій трьома способами міститься в описі інтерфейсу A-bis стандарту GSM.

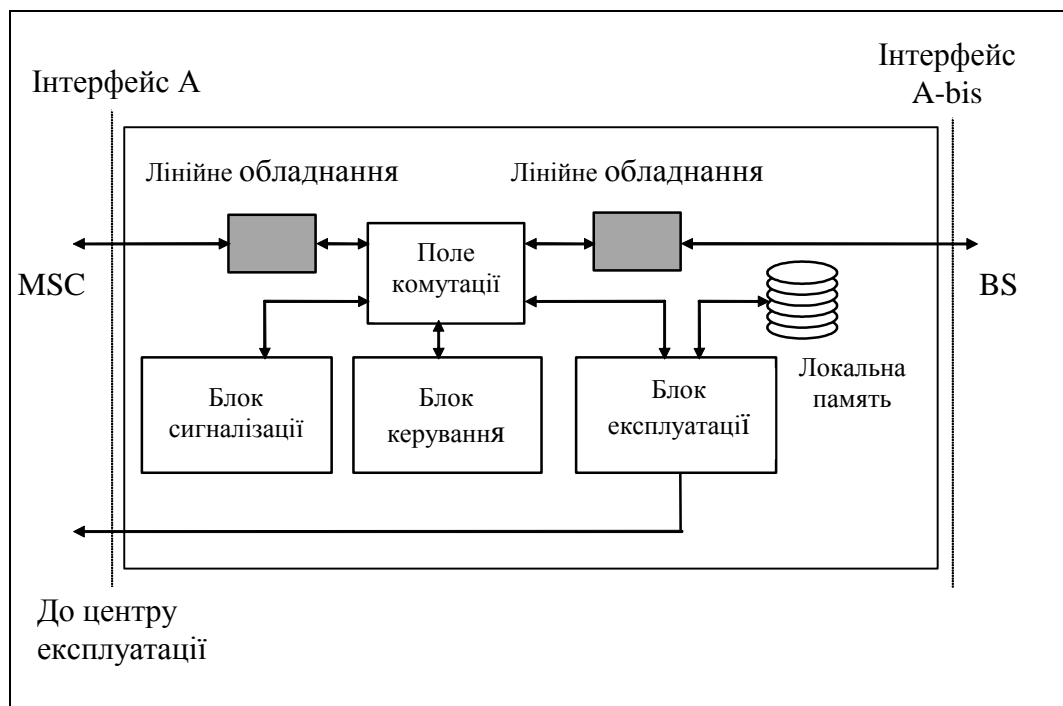


Рис.6.25 Спрощена блок-схема контролера базових станцій BSC

6.4.4. Модуль транскодера

Швидкість закодованого сигналу мови в системі GSM становить 13 кбіт/с для каналу типу full-rate та нижче 7 кбіт/с для каналу типу half-rate. В наступних пунктах розділу буде описуватися канал full-rate, який є єдиним варіантом, що використовується на першому етапі впровадження системи GSM. Якщо в системі GSM передаються дані, то їх швидкість (для каналу full-rate) не перевищує 13 кбіт/с. Отже швидкість передачі в радіоканалі системи GSM, минаючи каналне кодування, незалежно від виду переданої інформації, становить 13 кбіт/с. З іншого боку, швидкість одного каналу в стандарті ІКМ, який використовується в інтерфейсі А системи GSM, становить 64 кбіт/с. Спосіб кодування сигналу мови, застосований в радіоінтерфейсі системи GSM, дуже відрізняється від того, який є в інтерфейсі А.

Така ситуація приводить до того, що в системі GSM, з метою передачі як сигналів мови, так і даних, на шляху передачі між базовою станцією та комутаційною MSC необхідною є трансформація швидкості передачі, а для передачі сигналів мови додатково також зміна формату передачі сигналів мови з того, який застосовується в системі GSM на формат стандарту ІКМ. Ці дві

функції виконуються в блоці транскодера TRAU (англ. Transcoder Rate Adapter Unit). Транскодер TRAU діє в двох напрямках, тобто виконує відповідну конверсію стандарту кодування та швидкості передачі як в напрямку від базової станції до центральної MSC, так і навпаки.

Транскодер TRAU ділить шлях передачі між базовою станцією і комутаційною MSC на дві частини: від базової станції до транскодера і від транскодера до комутаційної станції MSC. На відрізку від базової станції до транскодера виконується передача мови з швидкістю 16 кбіт/с, що відповідає одному фізичному каналу GSM, причому кожен чотири канали GSM з швидкістю 16 кбіт/с розташовані в одному каналі ІКМ з швидкістю 64 кбіт/с.

Основною перевагою такого розв'язку є зменшення коштів передачі по внутрішніх стаціонарних лініях системи GSM, порівняно з ситуацією, в якій заміна формату сигналу на формат ІКМ була би вже виконана в базовій станції BTS. Стаціонарні лінії між базовими станціями, блоками керування BSC і комутаційними станціями MSC звичайно орендуються в стаціонарній телефонній мережі. З цієї точки зору корисним є розташування транскодерів TRAU поблизу комутаційної станції MSC (рис. 9.27а), і такий варіант найчастіше використовується на практиці. З іншого боку, такий спосіб передачі приводить до виникнення небажаних явищ, наприклад, збільшує запізнення, зв'язане з перетворенням сигналів, що може привести до погіршення якості послуг. Виходячи з цього, деякі оператори вирішують деколи розмістити транскодери TRAU при блоках керування BSC (рис. 6.27б) або при базових станціях BTS (рис. 6.27с).

З точки зору стандарту GSM інтерфейс А допускає передачу одиночного сигналу мови виключно з швидкістю 64 кбіт/с, отже транскодер TRAU належить функціонально завжди до ансамблю базових станцій, незалежно від свого фізичного положення. На практиці транскодер часто знаходиться біля комутаційної станції MSC і є відокремлений від неї функціонально інтерфейсом А (рис. 6.27а).

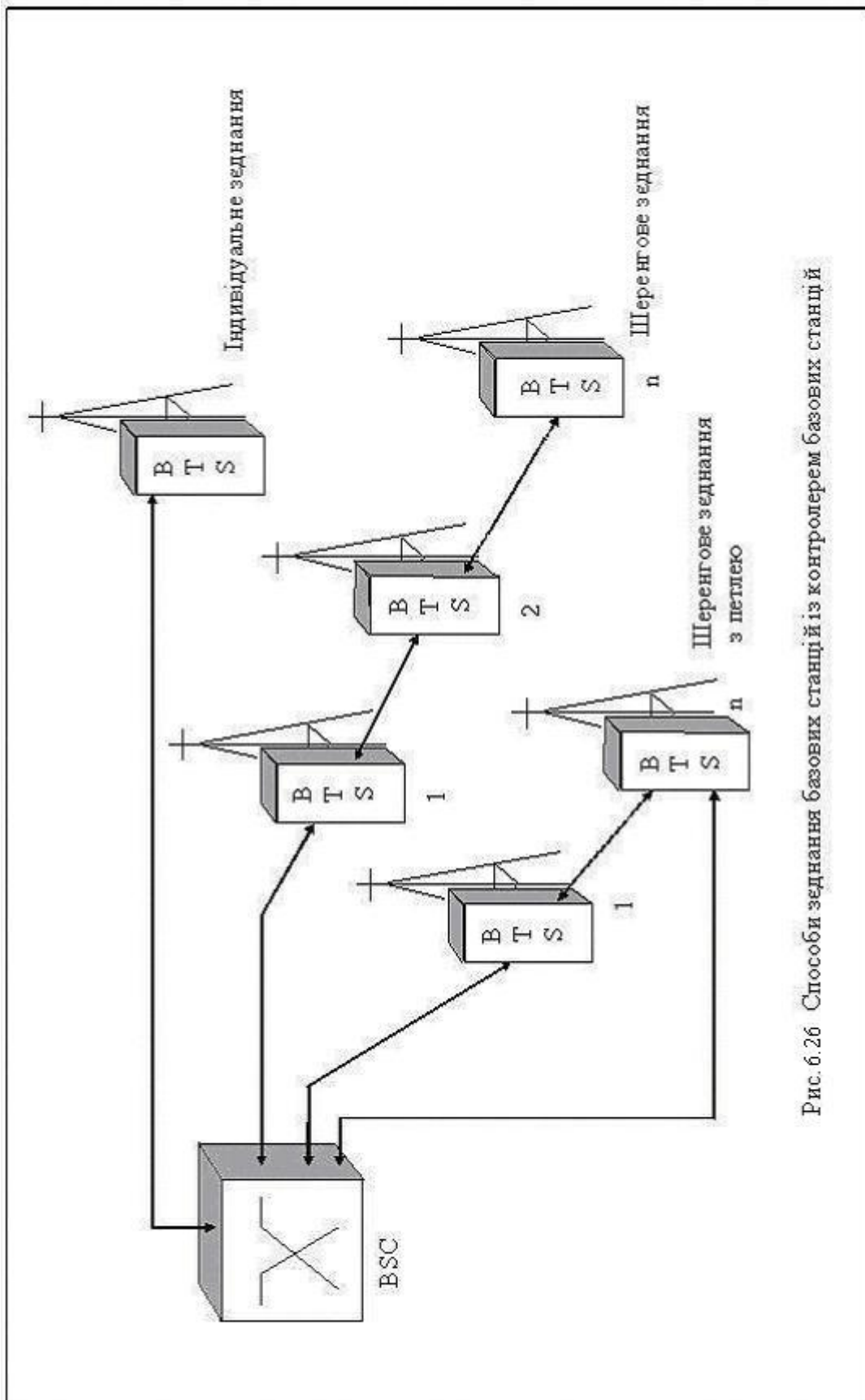


Рис. 6.26 Способи з'єднання базових станцій із контролером базових станцій

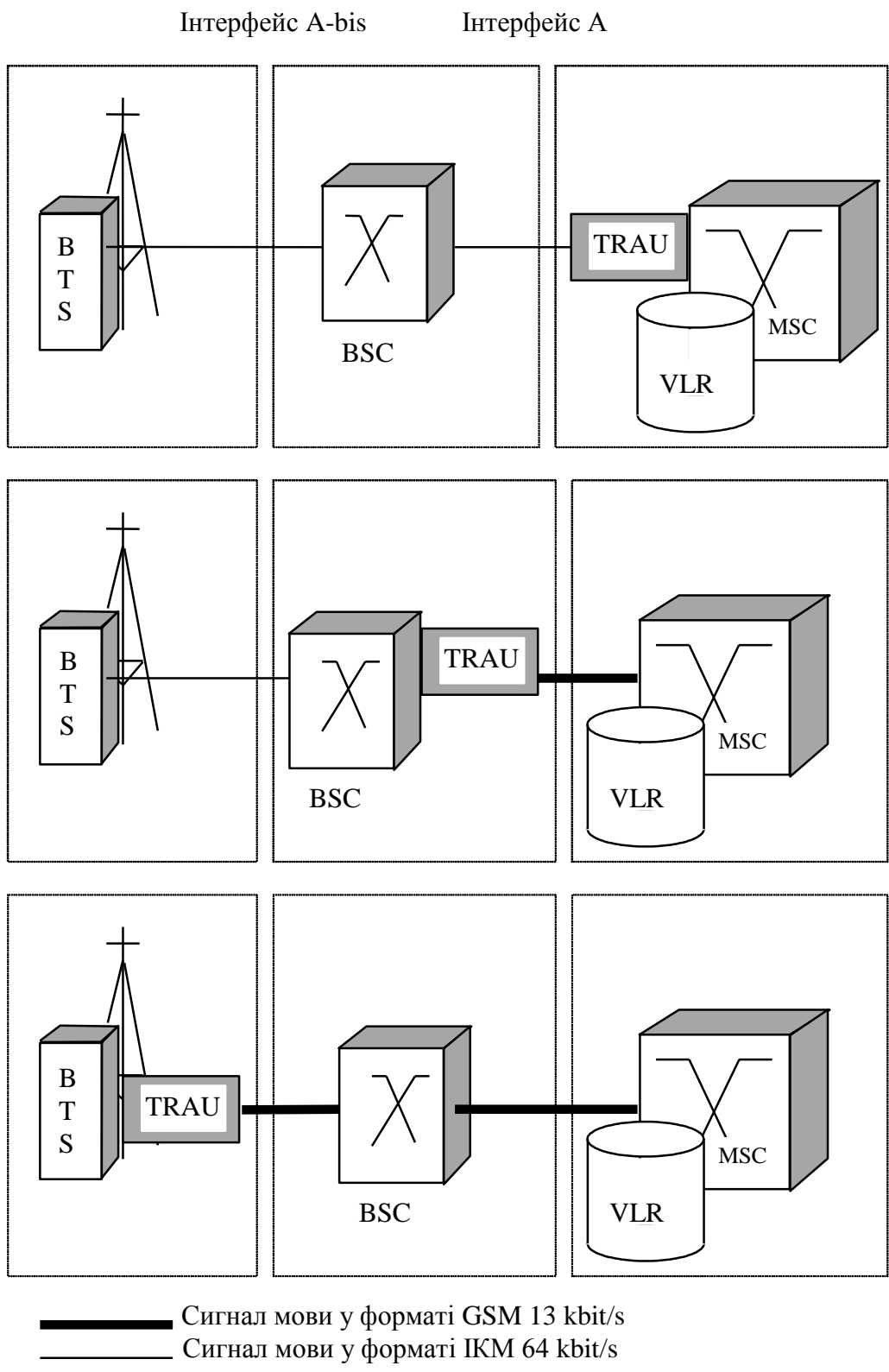


Рис.6.27 Способи розташування транскодера

У випадку телефонного з'єднання, яке встановлюється між двома абонентами тієї самої системи GSM, сигнал мови міг би весь час залишатися в форматі 13 кбіт/с, без потреби заміни на формат ІКМ. Теперішній стандарт GSM не передбачає такої можливості і сигнал мови, який передається навіть між абонентами, що знаходяться в одній комірці системи GSM повинен бути перетворений в форму ІКМ і зворотно.

6.4.5. Функції ансамблю базових станцій

В таблиці 6.7 представлено найважливіші функції, що пов'язані з керуванням трансмісійними каналами в стаціонарній частині системи або з керуванням радіозасобами і "рухливістю" абонентів. В таблиці описано поділ цих функцій між рухомими станціями MS, окремими модулями ансамблю базових станцій (BTS, TRAU, BSC) та комутаційною станцією MSC.

Таблиця 6.7 Розподіл завдань між центральною станцією MSC, ансамблем базових станцій та рухомими станціями.

Функція	Місце виконання				
	MS	BTS	TRAU	BSC	MSC
Управління трансмісійними каналами в стаціонарній частині системи GSM					
Ділянка MSC-BSC:					
• виділення каналів					X
• виявлення блокади				X	
Ділянка BSC-BTS:					
• виділення каналів				X	
• виявлення блокади		X			
Управління радіоканалами					

Конфігурування каналів				X	
Скакання по частотах:					
• управління				X	
• виконання	X	X			
Управління розмовними каналами TCH:					
• виділення (вибір) каналів				X	
• контролювання з'єднання				X	
• звільнення каналу				X	
• контролювання “мертвих” каналів		X			
• управління потужністю рухомих станцій				X	
Управління виділеними сигналізаційними каналами SDCCH:					
• виділення каналів SDCCH				X	
• контролювання з'єднання				X	
• звільнення каналу				X	
• управління потужністю				X	
Управління розсіюючими та спільними сигналізаційними каналами BCH і CCCH:					
• циклічне генерування повідомлень-управління					X
• циклічне генерування повідомлень-виконання				X	
Доступ до виділеного сигналізаційного каналу SDCCH:					
• виявлення вимоги доступу		X			
• виділення каналу				X	
Канальне кодування і декодування		X			
Зміна формату кодування мови			X		

Продовження Таблиці 6.7

Функція	Місце виконання				
	MS	BTS	TRAU	BSC	MSC
Вимірювання:					
• вимірювання сигналу в каналі “вниз”	X				
• вимірювання сигналу в каналі “вгору”		X			
• обробка результатів вимірювань отриманих з MS і BTS				X	
• вимірювання навантаження					X
Передача з випередженням:					
• обчислення величини випередження		X			
• сигналізація до MS при встановленні з’єднання				X	
• сигналізація до MS під час триванні з’єднання		X			
Шифрування:					
• управління (ключ з MSC)				X	
• виконання (ключ з BSC)		X			
Виклик рухомої станції:					
• ініціалізація					X
• виклик- управління				X	
• виклик-виконання		X			
Перемикання каналів в рамках одного блока управління BSC				X	
Перемикання каналів між різними блоками управління BSC:					

• розпізнавання причини (якість передачі)				X	
• розпізнавання причини (навантаження)					X
• рішення					X
• виконання		X			
Управління “рухливістю” абонентів					
Ідентифікація абонента					X
Уточнення інформації про місце перебування абонента					X

7. СИСТЕМИ КОМІРКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ І ПРИНЦИПИ ЇХ ФУНКЦІОНУВАННЯ

7.1. Організація радіоканалів

З'єднання на відрізку між абонентом, який має рухоми станцію, і базовою станцією системи GSM відбувається радіошляхом. Цей фрагмент трансмісійної ланки був об'єднаний в специфікації GSM і носить назву радіоінтерфейсу. В радіоканалі системи GSM об'єднано в області часу і частот відносно складну структуру фізичних каналів, в яких передбачається як інформація користувача, так і сигналізаційні повідомлення. Система GSM ґрунтується на частотному (FDMA) і часовому (TDMA) розділенні каналів. Таке рішення дозволяє для визначеної пари MS-BTS вести передачу в каналі “вверх”, що ніколи не співпадатиме в часі з передачею в каналі “вниз”. Частиною цієї структури є багаторівнева рамкова структура. Поняття логічних каналів в системі GSM відповідає, в основному, поділу пакетів, що передаються в каналі, відповідно їх значенням та способам їх розташування в фізичних каналах.

7.1.1. Смуга частот

Радіоінтерфейс системи GSM забезпечує з'єднання типу “повний дуплекс” (англ. full duplex), одночасну передачу, як в напрямку “вниз” (англ. down link), тобто від базової станції BTS до рухомої MS, так і в напрямку “вверх” (англ. uplink), тобто від MS до BTS (рис. 7.1a). Означення “канал вверх” і “канал вниз” можна пояснити тим, що в типовій системі коміркового зв'язку антени базових станцій розташовані вище рівня рухомих станцій, однак тут вирішальним було запозичення термінології з сателітарних систем, в яких такі терміни є натуральні і дуже розповсюджені.

Стандарт GSM використовується перш за все в двох основних діапазонах частот: в смузі 900 МГц і в смузі 1800 МГц. Крім того використовуються або на стадії впровадження дві подальші версії системи GSM: система E-GSM та система PCN1900. Діапазон частот для цих систем описано нижче.

7.1.1.1. СИСТЕМА GSM900

Система GSM працює в діапазоні 900 МГц в двох піддіапазонах частот. Ширина кожного становить 25 МГц (рис. 7.1b):

- канали “вверх” - смуга 890-915 МГц;
- канали “вниз” - смуги 935-960 МГц.

В усіх версіях системи GSM передача в двох напрямках проводиться із частотним розділенням (англ. Frequency Division Duplex FDD). Для системи GSM900 відстань між частотами обох напрямків становить 45 МГц.

Кожна зі смуг частот поділена на 124 канали смугою 200 кГц. Ці канали пронумеровані від 1 до 124. Цей номер носить назву номеру частоти радіоканалу ARFCN (англ. Absolute Radio Frequency Channel Number). Незважаючи на те, що смуга 25 МГц дає можливість теоретично використати 125 частотних каналів смугою 200 кГц, на практиці по краях обох смуг визначено охоронні частотні смуги шириною 100 кГц кожна. Вони служать для обмеження рівня інтерференції в сусідніх радіодіапазонах. Несучі частоти (тобто середні) 124 каналів системи GSM900 можна визначити так:

- канали “вверх”: $f_i = 890.0 \text{ МГц} + (0.2 \text{ МГц}) * i$;

- канали “вниз”: $f_i = 935.0 \text{ МГц} + (0.2 \text{ МГц}) * i$;

де i - номер каналу (ARFCN), причому $1 < i < 124$.

В кожному частотному каналі смугою 200 кГц знаходиться 8 розмовних каналів. Виділення радіоканалів окремим коміркам відбувається через виділення частотних каналів, а отже цілих 8-канальних груп розмовних каналів. Окрема комірка може використовувати від 1 до 16 частот, що відповідає від 8 до 128 радіоканалів. Кількість частот виділених даній базовій станції BTS визначається навантаженням руху, яке передбачається в зоні даної комірки. Потрібно додати, що в багатьох країнах, в яких впровадження системи GSM випередило застосування аналогових коміркових систем, що працюють в

діапазоні 900 МГц, напр. NMT900, AMPS або ETACS, оператори обох типів систем діляться між собою згаданими раніше 124 каналами представленими на рис. 7.1b.

7.1.1.2. Система DCS1800

Вже на стадії проектування стандарту системи GSM900 дехто говорив, що 124 частотні канали в цій системі не вистачить для забезпечення потреб по ємності, яка відповідала б передбачуваному зросту попиту на безпроводний зв'язок. Тоді, після опрацювання зауважень для системи, працюючої в діапазоні 900МГц (GSM900), розпочато працю над стандартом системи, що працювала б в діапазоні 1800МГц. Ця система після закінчення стандартизаційного процесу отримала назву DCS1800 (англ. Digital Cellular System).

Система DCS1800 використовує такі діапазони частот (рис. 7.1c):

- канали “вверх” - діапазон 1710-1785 МГц;
- канали “вниз” - діапазон 1805-1880 МГц.

Як видно, ширина виділених діапазонів частот становить 75МГц в кожному напрямку передачі, а несучі частоти каналів є майже в два рази вищі ніж в системі GSM900. Інше розташування частотних каналів та змінена відносно системи GSM900 величина комірки системи і зв'язане з цим зниження потужності рухомих і базових станцій системи DCS1800 - це єдине, що відрізняє систему DCS1800 від системи GSM900. Всі інші технічні аспекти, які входять до стандарту однакові для обох систем.

Смуга 75МГц могла б теоретично помістити 375 каналів шириною 200кГц. Подібно як в системі GSM900, введено два захисні інтервали шириною 100кГц по краях смуги, а ті 374 канали, які залишились мають номери ARCFN від 512 до 885. Визначення номерів ARCFN на частотах радіоканалів в системі DCS1800 відбувається таким чином:

- канали “вверх”: $f_i = 1710 \text{ МГц} + (0.2 \text{ МГц}) * (i - 511)$;
- канали “вниз”: $f_i = 1805 \text{ МГц} + (0.2 \text{ МГц}) * (i - 511)$;

де i - це номер каналу (ARCFN), причому $512 < i < 885$.

Отже, кількість каналів в системі DCS1800 в три рази більша, порівняно з системою GSM900. Дуплексний інтервал між каналами “вниз” і “вверх” становить 95 МГц, що полегшує проектування передавально-приймального обладнання.

Як говорилося вище, другою характеристикою, яка відрізняє систему DCS1800 від системи GSM900 є величина комірки і зв'язана з цим максимальна потужність рухомих і базових станцій. З точки зору величини комірки система GSM900 відноситься до класичних наземних коміркових систем (максимальна величина комірки, тобто максимально допустима відстань від рухомої станції до базової, становить 35 км), а система DCS1800 - це система безпроводної телефонії з пікокомірками, розмірами кількисот метрів або мікрокомірками розмірами до 3 км. Цьому відповідає обмежена до 1 Вт максимальна потужність рухомої станції, порівняно з потужністю рухомої станції, що наближається до 20 Вт в системі GSM900. Максимальна потужність базової станції системи DCS1800 становить 20 Вт, порівняно з максимальною потужністю 320 Вт в системі GSM900.

Ємність системи DCS не має одиниць вимірювання (тобто визначається як кількість розмовних каналів на 1 км.кв), вона на порядок вища, порівняно з системою GSM900. З одного боку є в три рази більше розмовних частотних каналів, а з іншого боку застосування невеликих комірок і передача з невисоким рівнем потужності в радіоканалі приводить до економічного використання діапазону, тому що той самий частотний канал використовується в комірках, що лежать всього лиш за декілька кілометрів, а деколи і ближче.

Серед європейських експертів на початку 90-х років була популярна думка, що наступними після GSM будуть системи третьої генерації, так звані системи особистого зв'язку (англ. Personal Communications Networks PCN) на основі малокоміркових структур, дуже легкі термінали, досить нескладні алгоритми перетворення мови і т.п.

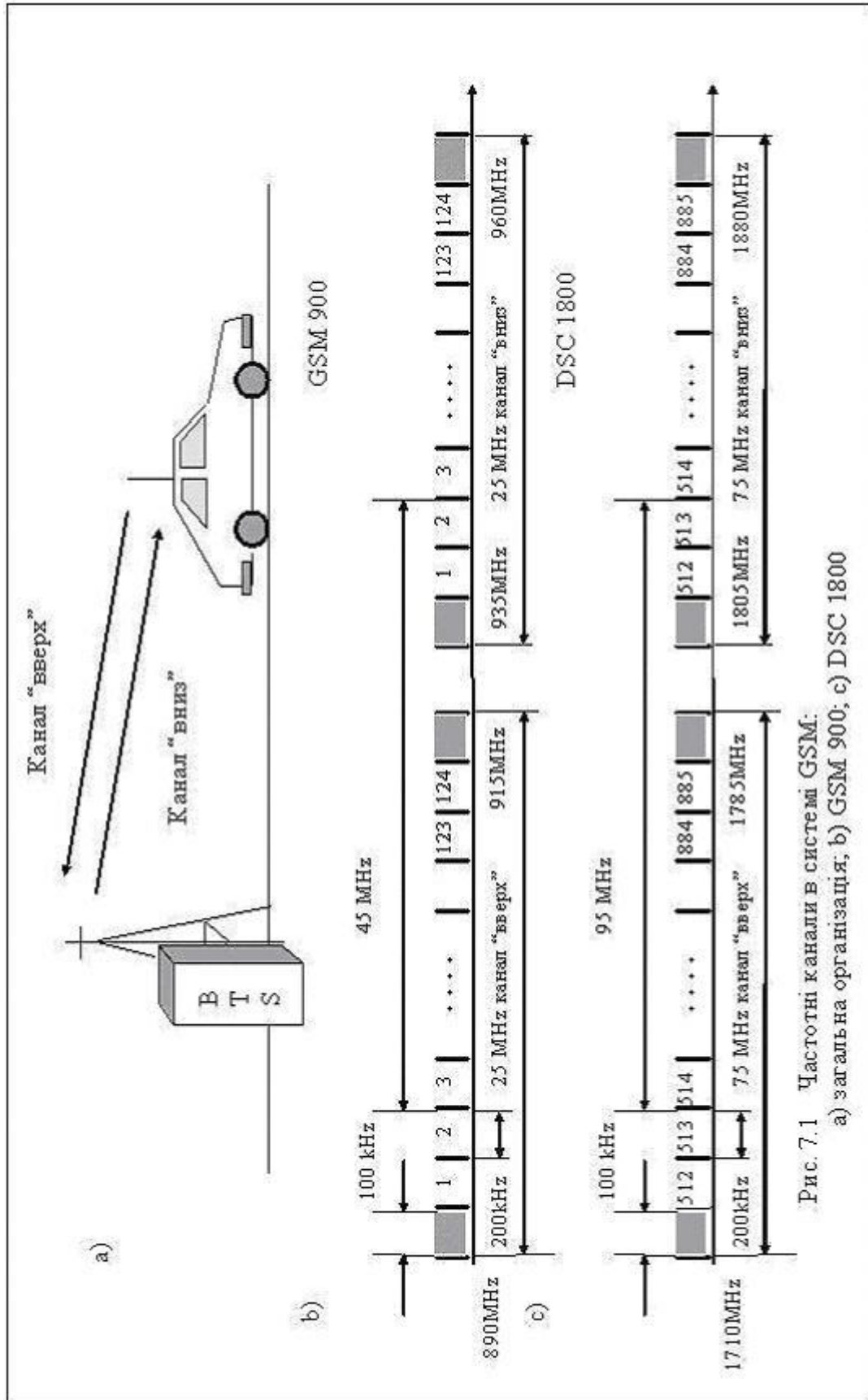


Рис. 7.1 Частотні канали в системі GSM:
 а) загальна організація; б) GSM 900; с) DSC 1800

Крім того, що система DCS1800 виконує ці вимоги тільки коли йде мова про розміри комірок, в Великобританії і деяких інших країнах говорять часто про неї як про систему на виріст, тобто як про систему PCN. В момент написання цього тексту, система GSM900 діяла практично в усіх країнах Західної Європи і в багатьох неєвропейських країнах, а система DCS1800 використовувалася в Німеччині і Великобританії, монтувалася у Франції та в Україні.

7.1.1.3. Система E-GSM

В ході розвитку системи GSM в деяких країнах розширено діапазон частот, що використовується системою. Ці системи відомі під назвою E-GSM (англ. Extended frequency GSM). Це стандартні системи GSM, в яких для кожного з напрямків передачі на краю основної смуги шириною 25 МГц додана додаткова смуга частот шириною 10 МГц. Це дозволило збільшити кількість каналів на 50. Наступні приклади дозволяють перераховувати номери додаткових каналів, ARCFN, в системі E-GSM, на відповідні величини середніх частот радіоканалу:

- канали "вверх": $f_i = 890 \text{ МГц} + (0.2 \text{ МГц}) * (i - 1024)$;

- канали "вниз": $f_i = 935 \text{ МГц} + (0.2 \text{ МГц}) * (i - 1024)$,

де i - це номер каналу (ARCFN), причому $975 < i < 1023$.

7.1.1.4. Система PCS1900

Система GSM стала дуже популярною у всьому світі за винятком Японії та США, де знаходяться два основні конкуренти системи GSM - системи IS-95 і JDC. Оскільки жодна з цих країн не думає впроваджувати в себе систему GSM900, то для них зарезервовано смугу частот в діапазоні 1900 МГц з призначенням для систем безпроводного особистого зв'язку. Отже не виключено, що серед систем, які вводяться в дію в цьому діапазоні будуть також так звані системи PCS1900 (англ. Personal Communication System - скорочення, яке означає те саме, що і застосоване в Європі скорочення PCN), які узгоджені з стандартом GSM, але використовують частоти на 100 МГц

вищі, ніж система DCS1800.

7.1.2. Фізичні канали

Основою утворення фізичних каналів є поділ радіозасобів системи GSM на частотно-часові інтервали, що циклічно повторюються, зв'язані із змішаним способом організації системи GSM, який базується на часовому (TDMA) і частотному (FDMA) розділі каналів.

7.1.2.1. Частотно-часові інтервали

В системі GSM для поділу радіозасобів на фізичні канали використано поєднання принципу часового поділу каналів TDMA (англ. Time Division Multiple Access) та частотного FDMA (англ. Frequency Division Multiple Access). Кожний з 124 частотних каналів, віддалених один від одного на 200кГц, був поділений в області часу на вісім інтервалів нумерованих від 0 до 7 (рис. 7.2). Тривалість одного інтервалу становить приблизно 577 мкс (точно $15/26$ мс). Вісім часових інтервалів утворюють, так званий, цикл TDMA тривалістю $577 \text{ мкс} * 8 = 4.615 \text{ мс}$. Ряд циклічно повторюваних часових інтервалів утворюють фізичний канал, який можна використати для передачі розмовних сигналів або сигналізаційних.

Отже, беручи до уваги, що як частотні канали так і часові інтервали, тобто всі доступні радіозасоби поділені на групи частотно-часових інтервалів (рис. 7.3). Кожний з частотно-часових інтервалів дозволяє передавати тільки один пакет (англ. burst). “Пакет” пов’язаний із способом поділу інформації на блоки, а не із способом комутації. Із точки зору комутації система GSM - це система із комутацією каналів, а не комутацією пакетів. Отже, ряд часових інтервалів, кожний тривалістю 0.577 мс, що передаються через кожні 4.038 мс і займають смугу частот шириною 200 кГц навколо середньої частоти, утворюють фізичний канал, в якому циклічно, через 4.615 мс, передається пакет в напрямку до або від рухомої станції. Метод TDMA ефективно зменшує смугу частот, виділену одному фізичному каналу GSM до $200 \text{ кГц} / 8 = 25 \text{ кГц}$. Така ширина

смуги прирівнюється до ширини смуги розмовного каналу в типових аналогових коміркових системах.

Метод TDMA дозволяє уникнути необхідності одночасної передачі і прийому. На рис. 7.3 представлено зсув в часі між k -тим ($k=0,1,\dots,7$) часовим інтервалом, який несе інформацію з базової станції до рухомої і k -тим часовим інтервалом, який містить відповідь рухомої станції. Для даного з'єднання BTS-MS, передача в обох напрямках відбувається в часових інтервалах з тим самим номером, але на частотах, зсунутих між собою на 45 МГц. Передача з рухомої станції проходить із запізненням відносно прийому, на час, що рівний тривалості трьох часових інтервалів (1.731 мс). Неодночасна передача в обох напрямках значно полегшує конструювання рухомих станцій, а саме переносних і кишенькових. Така передача не потребує застосування мікросхеми дуплексера, збільшує тривалість дії батарей та зменшує їх вагу, що в результаті дозволяє зменшити їх ціну.

7.1.2.2. Імпульсна передача

Представлена на рис. 7.4 часова схема прийому і передачі в рухомій станції означає необхідність імпульсного режиму роботи рухомої станції, і в певній мірі також базової станції. Передавач рухомої станції вмикається на час тривалості одного часового інтервалу, а через 577 мкс вимикається і залишається неактивним наступних сім часових інтервалів. Частота циклічного ввімкнення і вимкнення передавача рухомої станції становить $1/4.615 \text{ мс} = 216.6 \text{ Гц}$.

Одним з наслідків імпульсного режиму роботи радіопередавача і його циклів (регулярне повторювання ввімкнення і вимкнення) є загроза появи радіозавад, які переходять в сусідні частотні канали, сусідні часові інтервали або до інших користувачів радіоефіру. Це додаткова технічна проблема, яка повинна бути розв'язана проектантами радіообладнання.

Стандарт GSM чітко окреслює інтервал часу, в якому передавач рухомої станції повинен виконати циклічну процедуру ввімкнення і вимкнення

потужності від нуля до номінального рівня і навпаки. Під час тривалості цієї процедури в каналі не передаються корисні біти. На рисунку 7.5 представлено зріз ввімкнення і вимкнення передавача рухомої станції (для основного пакету) від функції часу (англ. power-versus-time template). Рухома станція повинна вмикатися або вимикатися на протязі 28 мкс, величина зміни рівня потужності в такому короткому часі становить 70 dB. Після ввімкнення рухома станція має 542.8 мкс на передачу пакету інформації.

7.1.2.3. Типи пакетів

Фізичний радіоканал, що з'єднує рухома станцію з базовою, створений на основі циклічної передачі на тій самій частоті в тому самому часовому інтервалі (тобто через кожні 4.615 мс) блоку бітів, який називається пакетом (англ. burst) - рис. 7.6. Час передачі одного біту в системі GSM становить приблизно 3.69 мкс, а типовий пакет містить 148 бітів, отже довжина типового пакету становить приблизно 546 мкс. Час тривалості одного часового інтервалу становить 577 мкс, що дозволяє зберегти відстань між окремими пакетами приблизно 30 мкс. Цю захисну відстань (англ. guard interval) характеризують як 8.25 відступ модуляції (тобто 8.25 бітів), по 3.7 мкс кожний. Отже пакет в системі GSM має загальну довжину 156.25 бітів.

В системі GSM існує 5 типів пакетів, з яких тільки один, так званий основний (англ. normal burst), служить для передачі інформації, що використовується користувачами системи GSM, тобто розмовних сигналів або даних. Тіші типи пакетів системи GSM використовуються для сигналізаційних сигналів. Окремі типи пакетів будуть по порядку описані нижче.

1. ОСНОВНИЙ ПАКЕТ (англ. normal burst). В системі GSM типом пакету, що найчастіше передається є основний пакет (рис. 7.7). До складу основного пакету входять наступні елементи:

- *інформаційні біти* - два блоки, кожний довжиною 57 бітів, які містять захищені від помилок і зашифровані інформаційні біти, що відповідають сигналам мови або даних;

- *тренувальний інтервал* (англ. training sequence) - це 26 бітна послідовність, відома як в базовій станції, так і в рухомій. Тренувальний інтервал використовується в приймачі схемою коректора для наближеного визначення параметрів радіоканалу, що дозволяє компенсувати спотворення, які виникають за рахунок явища багатошляховості. Тренувальний інтервал розташований всередині пакету, між двома блоками інформаційних бітів. В зв'язку з тим, що умови поширення в радіоканалі можуть досить швидко змінюватися, то таке розташування тренувального інтервалу збільшує правдоподібність того, що характер завад, що вносяться радіоканалом в тренувальному інтервалі, подібний до характеру завад, що діють на інформаційні біти. В системі GSM об'єднано вісім різних тренувальних інтервалів. Для довільної пари серед них їх функція взаємкореляції має форму, яка полегшує процес правильної синхронізації приймача. Базові станції, які ведуть передачу на тій самій частоті і розташовані відносно недалеко одна від одної застосовують різні тренувальні інтервали позначені іншими ідентифікаційними номерами BSIC, що полегшує розпізнавання сигналів в приймачі;

- *позначники основної частини* (англ. Stealing Flags SF) - це два біти, кожен з яких відповідає одному блоку інформаційних бітів. В деяких ситуаціях, що потребують термінової передачі великої кількості сигналізаційної інформації (напр. підчас процедури перемикавання каналів), деякі блоки інформаційних бітів пропускаються, а на їхнє місце вставляється ряд сигналізаційних бітів. В такому випадку відповідний стан позначників основної частини дозволяє правильно розшифрувати вміст пакету в приймачі;

- *біти закінчення* (англ. Tail Bits TB) - два 3-бітові блоки, що розташовані на початку і в кінці кожного пакету. На цих позиціях передаються завжди нулі, що забезпечує правдоподібну роботу алгоритмів корекції радіоканалу і декодування переплітаючого коду в приймачі;

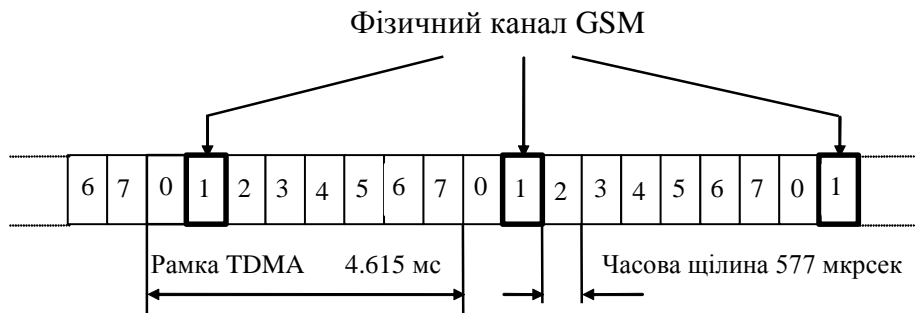


Рис.7.2 Рамка TDMA і утворення фізичних каналів.

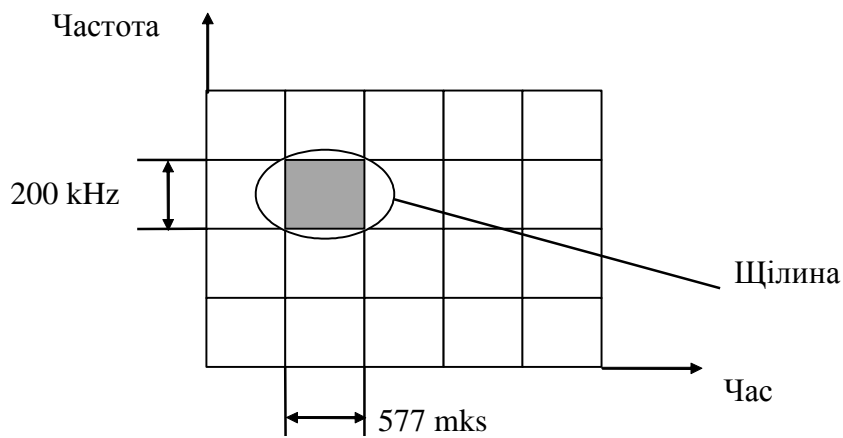


Рис.7.3 Поділ радіозасобів системи GSM на частотно-часові щілини.

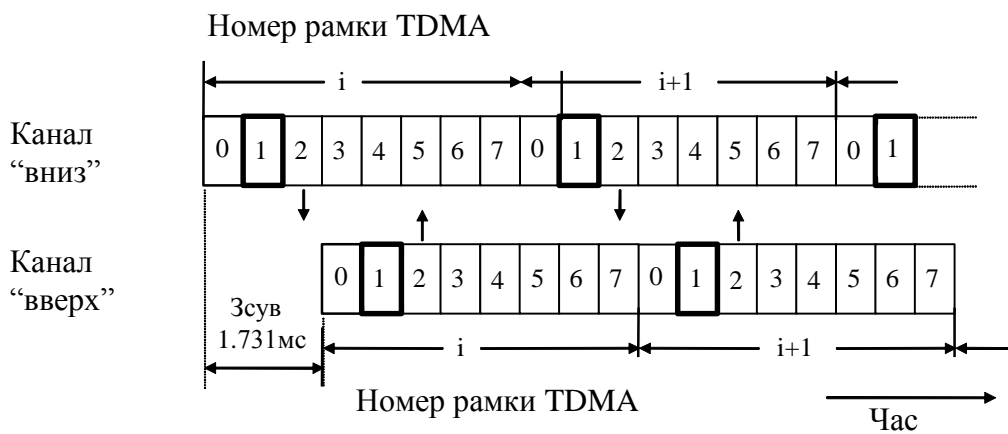


Рис.7.4 Часова схема прийому і передачі в мобільній станції

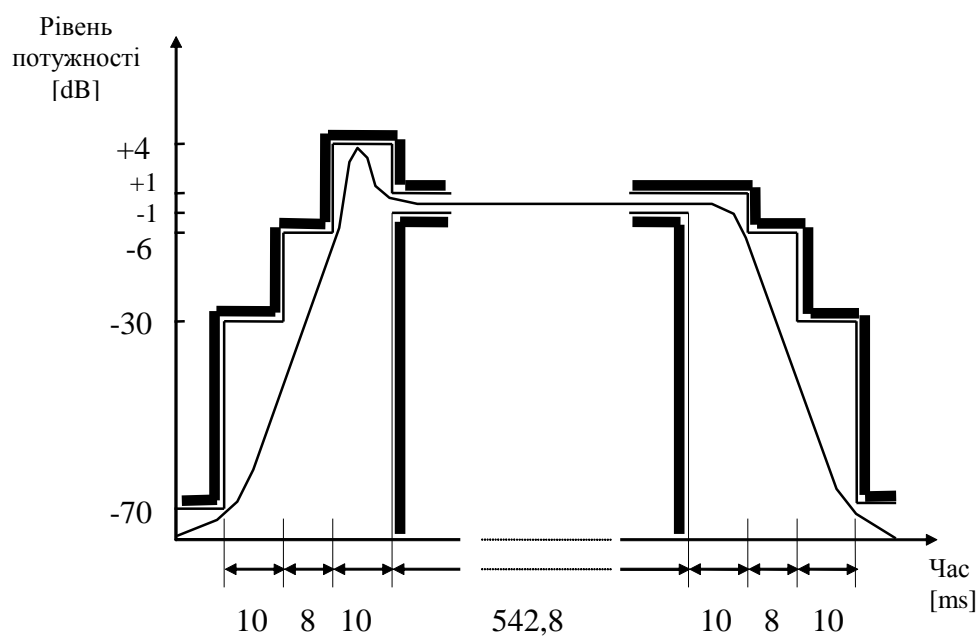


Рис.7.5 Часова діаграма вмикання і вимикання мобільної станції

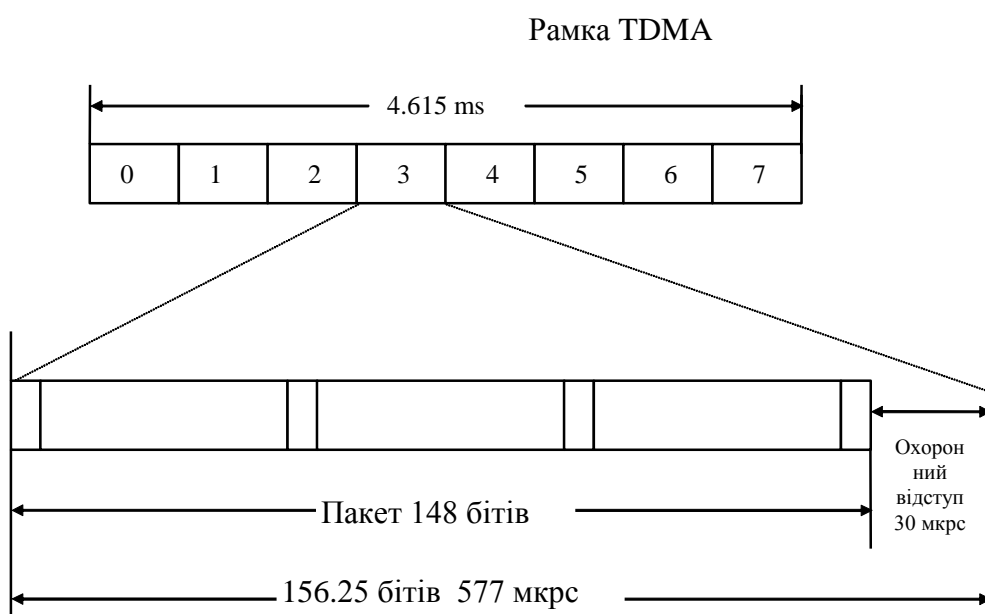


Рис.7.6 Передача пакета в середині часової рамки TDMA

- *захисний інтервал* (англ. Guard Period GP) - це згаданий вище інтервал, тривалістю приблизно 30 мкс, між пакетами, що відповідає довжині 8.25 інтервалів модуляції. Це інтервал між корисними бітами, які належать до різних пакетів. Він розрахований на те, щоб дати час на ввімкнення і вимкнення передавачів рухомих і базових станцій, які працюють в імпульсному режимі. Одночасно це приводить до виникнення деякої ймовірності помилки встановлення, так званого, часового випередження (англ. timing advance). Таке випередження необхідно з огляду на різні відстані окремих рухомих станцій від базової станції.

2. ПАКЕТ КОРЕКЦІЇ ЧАСТОТИ (англ. frequency correction burst). Пакет корекції частоти (рис. 7.8) синхронізує локальний генератор рухомої станції з частотою базової станції. З цією метою базова станція через рівномірні проміжки часу, на протязі одного часового інтервалу, передає чистий синусоїдальний сигнал - немодульовану несучу. Це означає посилку в часовому інтервалі самих нулів. Проектанти рухомих станцій самі вирішують, як часто їх рухомі станції будуть використовувати з можливості синхронізації частоти з базовою станцією. В пакеті корекції частоти захисний інтервал GP та біти початку і кінця ТВ такі самі, як в основному пакеті.

3. СИНХРОНІЗАЦІЙНИЙ ПАКЕТ (англ. synchronization burst). Після виконання частоти рухома станція повинна виконати процедуру синхронізації циклу. Спеціальний синхронізаційний пакет містить для цієї мети 64-бітову синхронізаційну групу, а два 39-бітові інформаційні блоки передають номери циклу TDMA, який є одночасно видом ключа для вірного дешифрування інформації, що передається в основних пакетах, а також ідентифікаційний номер базової станції (BSIC), який визначає правильний тренувальний інтервал (рис. 7.9).

4. ПАКЕТ ДОСТУПУ (англ. access burst). В момент часу, коли рухома станція висилає першу вимогу доступу до системи, ще не відомою є відстань від неї до базової станції. Отже і невідоме запізнення, з яким вислана інформація прийде до приймача базової станції.

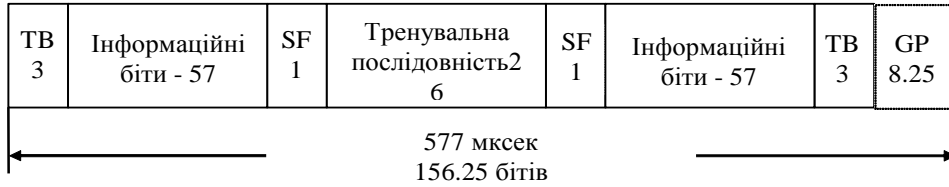


Рис.7.7 Основний пакет; ТВ - кінцеві біти; GP - охоронний відступ; SF - позначник підстановки

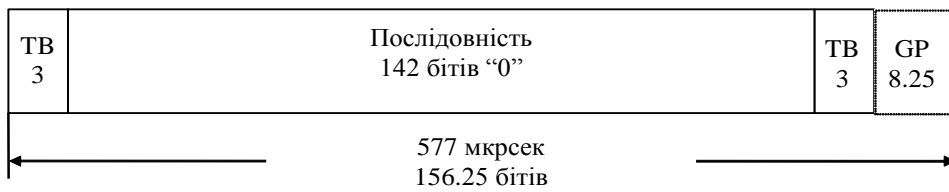


Рис.7.8 Пакет корекції частоти

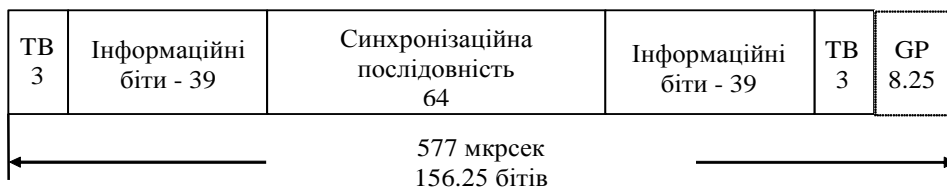


Рис.7.9 Синхронізаційний пакет

В результаті це запізнення не можна компенсувати, передаючи сигнали від базової станції з відповідним випередженням. Подібною буде ситуація у випадку перемикання (англ. handover) рухомої станції до нової базової станції. В цьому випадку, рухома станція посиляє сигнал своєї появи в формі, так званого, пакету доступу, захисний інтервал якого відповідно видовжений (рис. 7.10).

Довжину захисного інтервалу розраховано, враховуючи максимальний радіус комірки так, щоб навіть в випадку, коли рухома станція знаходиться на границі комірки, пакет доступу не накладався на інформацію, що передається в сусідньому часовому інтервалі. Час тривалості захисного інтервалу становить $68.25 \cdot 3.69$ мкс — 252 мкс. В цей час електромагнітна хвиля, яка рухається з швидкістю світла, подолає шлях $252 \text{ мкс} \cdot 300000 \text{ км/с} = 75.5 \text{ км}$, поділивши це число на два (радіохвиля повинна два рази подолати відстань між базовою та рухомою станціями) вийде 37,75 км. З практичної точки зору приймають, що максимальні розміри комірки не повинні перевищувати 35 км. Механізм появи запізнення, для обох напрямків передачі показано на рис. 7.11. Всередині пакету доступу розташований видовжений тренувальний інтервал, вісім бітів початку і три біти кінця та інформаційні біти.

5. ЗАМІННИЙ ПАКЕТ (англ. dummy burst). В деяких ситуаціях базова станція може вислати, так званий, замінний пакет, структура якого ідентична з описаною вище структурою основного пакету з тією різницею, що інформаційні біти замінено в ньому рядом бітів, що не несуть інформації.

7.1.2.4. Цикли вищого рівня

Крім описаної в п.5.2.1 організації фізичного каналу, яка базується на основному циклі TDMA тривалістю 4.615 мс (рис. 7.2), в системі GSM організовано також цикли вищого рівня. Вони дозволяють якісно розташувати логічні канали в фізичних, а також потрібні в процедурах захисту інформації від несанкціонованого доступу.

На рис. 7.12 показано структуру циклів вищого рівня, організованих в

системі GSM. Наступний рівень відносно основного циклу TDMA (англ. TDMA frame) - це, так званий, мультицикл (англ. multiframe).

Є два типи мультициклів: мультицикл 26-цикловий, тривалістю 120мс, призначений перш за все для передачі сигналів мови та мультицикл 51-цикловий, тривалістю приблизно 235 мс, призначений виключно для передачі сигналізаційних та керуючих сигналів. Організація двох різних типів мультициклів корисна з уваги на цілком різні вимоги щодо ємності трансмісійного каналу пакетів мови (тобто логічних розмовних каналів) відносно пакетів, що містять сигналізаційні біти (тобто логічних сигналізаційних каналів). Мультицикл 26-цикловий, який використовується у випадку передачі сигналів мови, де швидкість передачі пакетів становить 200 пакетів/с не містить каналів низької швидкості для передачі деяких сигналізаційних пакетів, в яких кількість інформації відповідає деколи тільки лиш 2 пакетам/с. Отже для сигналізаційних пакетів корисно використовувати довший мультицикл, який відповідає 51 циклу TDMA.

Наступний рівень організації циклів займає, так званий, суперцикл (англ. superframe), тривалість, якого становить 1326 циклів TDMA, тобто 6,12с. Число 1326-це результат множення чисел 26 і 51, отже суперцикл може містити або 51 короткий мультицикл з сигналами мови, або 26 довших сигналізаційних мультициклів. Найвищий рівень організації циклів в системі GSM займає, так званий, гіперцикл (англ. hyperframe), створений з 2048 суперциклів. Один гіперцикл містить 2715648 циклів TDMA, а його тривалість становить майже 3.5 години.

Номер наступного циклу TDMA всередині циклів вищого рівня використовується як один з параметрів при шифруванні сигналу мови, який передається в радіоканалі. Номерація циклів TDMA відбувається за допомогою трьох чисел.

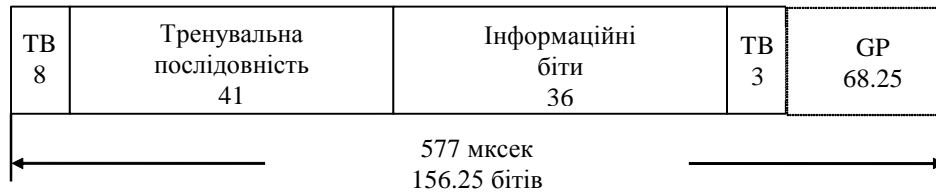


Рис.7.10 Пакет доступу

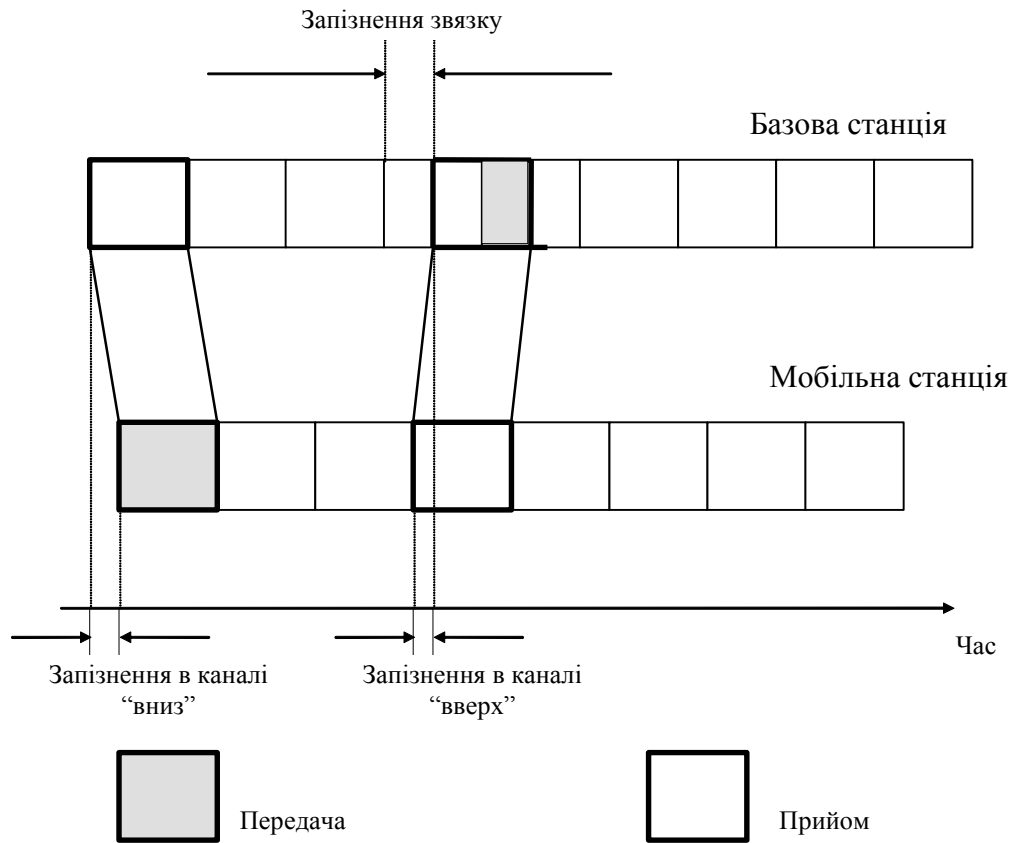


Рис.7.11 Механізм появи запізнення пакетів в радіоканалі

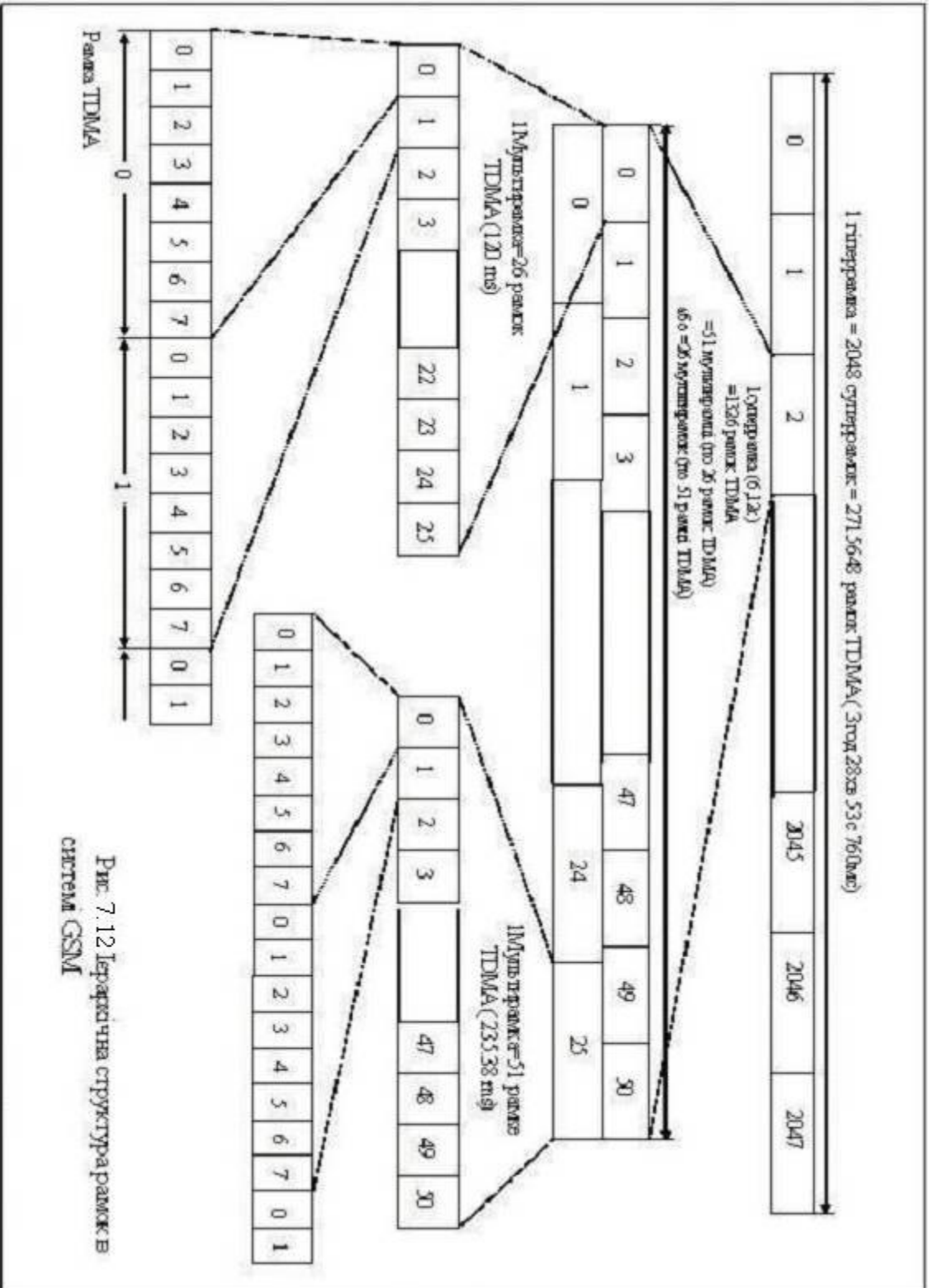


Рис. 7.12 Иерархическая структура рамок в системе GSM

Число T1 - це номер суперциклу (інтервал від 0 до 2047), число T2 - номер розмовного циклу, з'являється в 26-елементних мультициклах (інтервал від 0 до 25), число T3 - номер сигналізаційних циклів об'єднаних в 51-елементні мультицикли (інтервал від 0 до 50). Величини чисел T1, T2 і T3 утворюють номер циклу TDMA, який передається базовою станцією в синхронізаційному каналі SCH.

7.1.3. Логічні канали

Як згадано вище, поняття логічного каналу в системі GSM відповідає окремим видам інформації, яка передається в фізичному каналі. В першій частині цього пункту будуть описані види логічних каналів (п.10.3.1), а далі способи розташування логічних каналів в фізичних каналах (п.10.3.2). В кінці, в п.10.3.3, представлено перебіг кількох сигналізаційних процедур, які використовують різні види логічних сигналізаційних каналів.

7.1.3.1. Типи логічних каналів

Логічні канали в системі GSM можна поділити на розмовні канали і сигналізаційні (рис. 7.13). Розмовні канали служать для пересилки інформації від користувачів (закодовані сигнали мови або сигнали даних). Сигналізаційні канали використовуються всередині системи для забезпечення вірної роботи системи. Серед сигналізаційних каналів можна виділити розсіюючі, спільні та спеціальні канали. Нижче будуть описані по-порядку всі типи логічних каналів. Більшість логічних каналів використовує для передачі основні пакети. На рис. 7.13 представлено поділ всіх типів логічних каналів, які є в системі GSM.

- **РОЗМОВНІ КАНАЛИ TCH** (англ. Traffic Channels). Існують два типи розмовних каналів в залежності від продуктивності алгоритму компресії сигналу мови. Всі розмовні канали є двонапрямленими і діють як в напрямку “вверх”, так і “вниз”:

- **Розмовний канал типу full-rate TCH/FS** (англ. Traffic Channel/Full - rate Speech). Використовується для передачі мови у швидкістю 13 кбіт/с.

Цей канал дозволяє також передавати дані з швидкостями: 9.6; 4.8; 2.4 кбіт/с;

- **Розмовний канал типу half-rate TCH/HS** (англ. Traffic CHannel/Half-rate Speech). Передбачений для використання після впровадження кодування мови з швидкістю, нижчою 7 кбіт/с, що дозволить подвоїти ємність системи. Цей канал дає можливість передавати дані з швидкістю 4.8 або 2.4 кбіт/с;
- **РОЗСІЮЮЧІ КАНАЛИ BCH** (англ Broadcast CHannel). Використовуються для передачі сигналізаційної інформації або синхронізаційної в каналі “вниз”, тобто від базової станції до рухомих станцій. Інформація, яка передається в розсіюючих каналах і використовується рухомими станціями в фазі встановлення з'єднання Існують три типи розсіюючих каналів:
 - **канал корекції частоти FCSH** (англ. Frequency Correction CHannel). Дозволяє рухомих станціям синхронізуватися по частоті з базовою станцією, інформація, що передається в цьому каналі, має форму пакету корекції частоти.
 - **синхронізаційний канал SCH** (англ. Synchronization CHannel). Дозволяє синхронізувати цикли приймача та передає ключ, який розшифровує інформаційні біти, що передаються в розмовних каналах. Інформація, яка передається в цьому каналі має форму синхронізаційного.
 - **сигналізаційний розсіючий канал BCCH** (англ. Broadcast Control CHannel). В цьому каналі передається до рухомих станцій ідентифікаційні параметри системи (оператора); це код зони викликів LAC, який відповідає даній базовій станції, ідентифікатор оператора MNC, номери радіоканалів, що використовуються в сусідніх комірках та інші параметри доступу до системи. Ця інформація передається через регулярні інтервали часу кожною базовою станцією.
- **СПІЛЬНІ СИГНАЛІЗАЦІЙНІ КАНАЛИ CCCH** (англ. Common Control CHannels). Беруть участь у встановленні з'єднань між базовою станцією і рухомою:

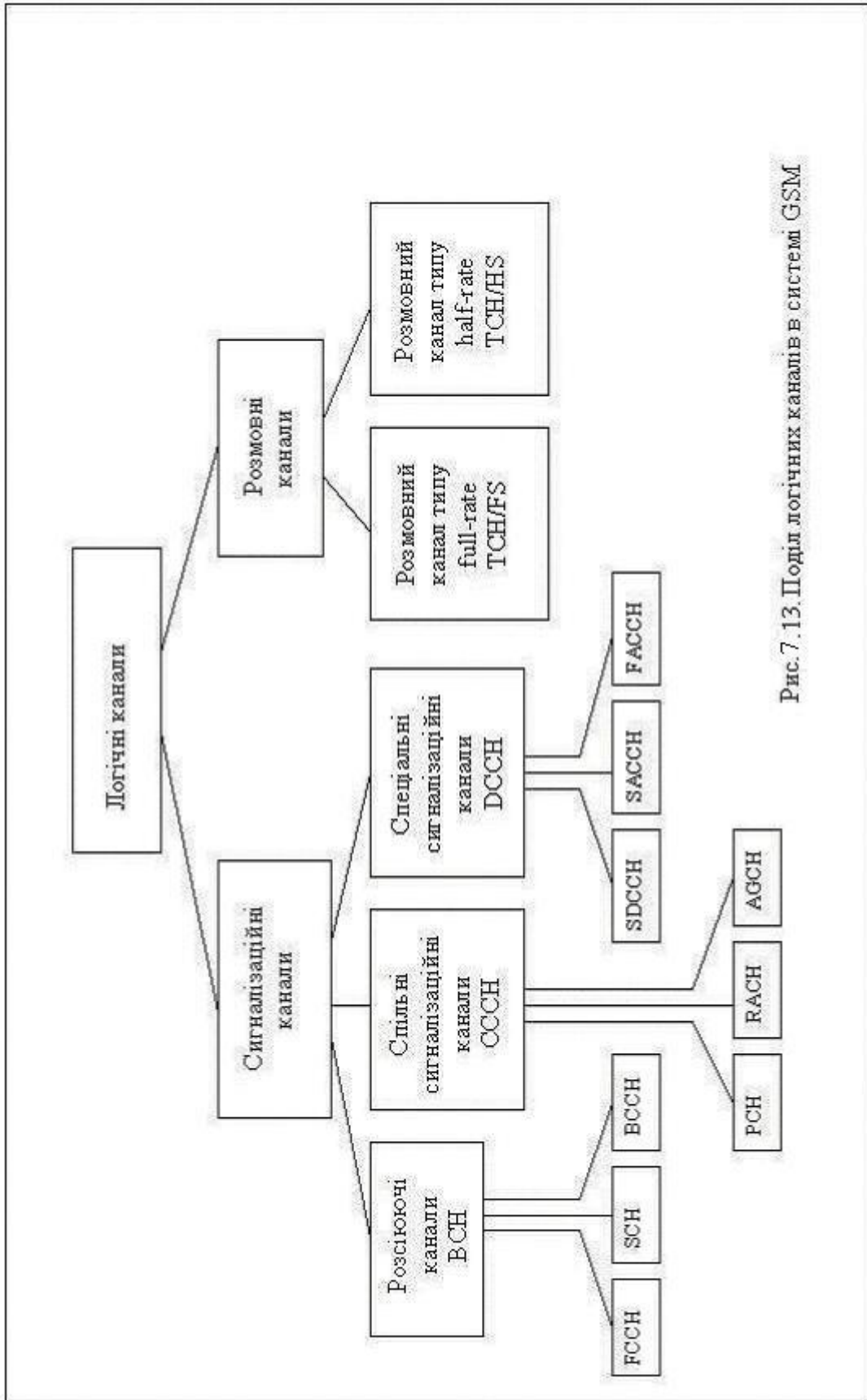


Рис. 7.13. Поділ логічних каналів в системі GSM

- **канал викликів PCH** (англ. Paging CHannel). Використовується для виклику рухомого абонента, до якого адресовано цей виклик. Базова станція викликає абонента, передаючи сигнали виклику в межах своєї комірки. Це логічний канал, який працює тільки на лініях “вниз”;
- **канал випадкового доступу RACH** (англ. Random Access CHannel). Це канал, в якому рухома станція може вимагати виділення їй спеціального сигналізаційного каналу DCCH. Така ситуація може виникнути при встановленні з'єднання. Інформація, яка передається в каналі RACH має формат описаного в п.7.1.2.3 пакету доступу і це перше повідомлення, яке передає рухома станція до базової в процедурі встановлення з'єднання між абонентом системи GSM (викликаючим) і іншим абонентом (якого викликають). Це логічний канал, який працює тільки на лініях “вверх”;
- **канал виділення ліній AGCH** (англ. Access Grant CHannel). У відповідь на вимогу виділення спеціального сигналізаційного каналу DCCH, базова станція виділяє рухомій станції окремий сигналізаційний канал SDCCH, інформуючи її про це в каналі виділення лінії AGCH. Це логічний канал, який діє тільки в каналах “вниз”.
- **СПЕЦІАЛЬНІ СИГНАЛІЗАЦІЙНІ КАНАЛИ DCCH** (англ. Dedicated Control CHannels). Використовуються для обміну сигналізаційною інформацією між рухомою станцією і системою під час процедури повідомлення появи рухомої станції в комірці та ідентифікації абонента, а також під час тривання самого з'єднання. Всі спеціальні сигналізаційні канали є двонапрямлені і розташовані як в каналах “вниз”, так і “вверх”.
 - виділений сигналізаційний канал SDCCH (англ. Standalone Dedicated Control CHannel). Використовується для сигналізації під час встановлення з'єднання до виділеного розмовного каналу (процедура появи абонента в комірці та ідентифікація абонента);
 - повільний допоміжний сигналізаційний канал SACCH (англ. Slow Associated Control CHannel). Виділяється разом з розмовним каналом

або окремим сигналізаційним каналом SDCCH. В каналі SACCH передається системна інформація з низьким пріоритетом, така як результати вимірювань, що виконуються рухомою станцією під час тривалості з'єднання (вимірювання потужності сигналу власної і сусідньої базових станцій для процедури перемикання). Канал SACCH використовується також для керування потужністю рухомої станції та для регулювання величини часового випередження (англ. timing advance);

- швидкий допоміжний сигналізаційний канал FACCH (англ. Fast Associated Control Channel). Канал завжди зв'язаний з розмовним каналом. Використовується тоді, коли є необхідний швидкий обмін сигналізаційною інформацією під час тривання з'єднання, наприклад, під час виконання процедури перемикання каналів, що належать до різних комірок. В такому випадку замість одного з 20-мілісекундних циклів сигналу мови (тобто замість восьми основних пакетів) передається сигналізаційна інформація. Позначники основної частини SF тоді стоять в активній позиції.

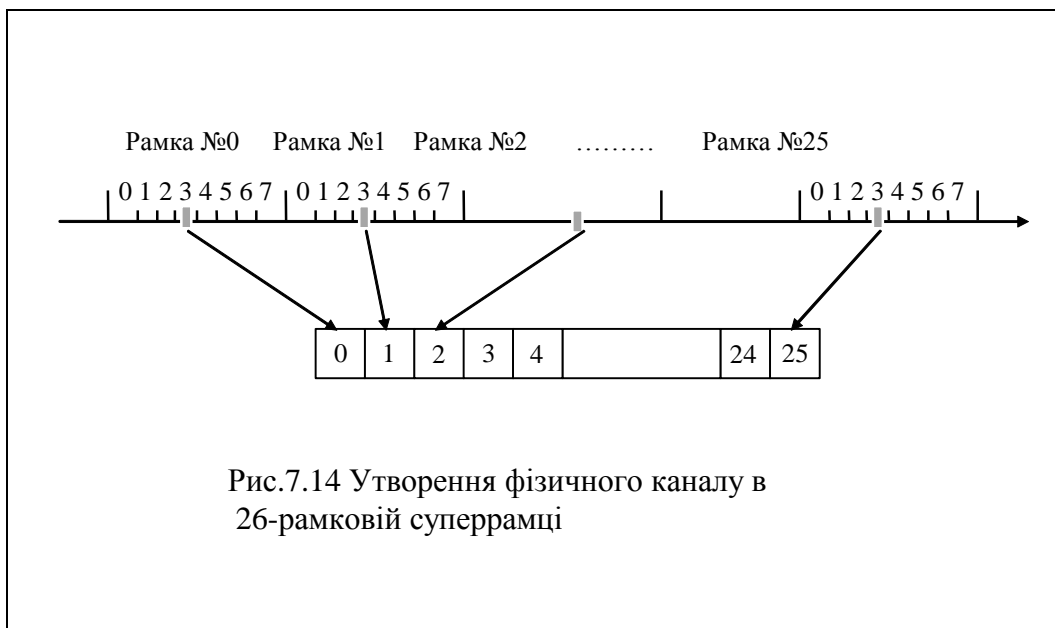
7.1.3.2. Розташування логічних каналів в фізичних каналах

Логічні канали розташовуються в фізичних каналах за допомогою однієї з семи комбінацій (таблиця 7.1). Кожна комбінація логічних каналів потребує одного фізичного каналу, ємністю одного частотно-часового інтервалу, що циклічно повторюється через кожні 4.615 мс. Кожний з восьми фізичних каналів, що знаходяться на тій самій несучій частоті, заповнюється однією з комбінацій, представлених в таблиці 7.1.

На рис. 7.14 пояснено значення спрощеного запису, який буде застосований для представлення комбінації логічних каналів, описаних в таблиці 7.1. Фізичний канал №3 в 26-цикловому мультициклі організується за допомогою 26 часових інтервалів №3, що знаходяться в 26 циклах TDMA даного мультициклу (верхня частина рисунку 7.14). В спрощеному записі видно

тільки 26 циклів TDMA (нижня частина рисунку 7.14). Потрібно пам'ятати, що в нижній частині рисунку 7.14 показано не весь мультицикл, а тільки одного фізичного каналу, а отже тільки 1/8 частину мультициклу.

Комбінації логічних каналів описані в таблиці 7.1 і охарактеризовані нижче.



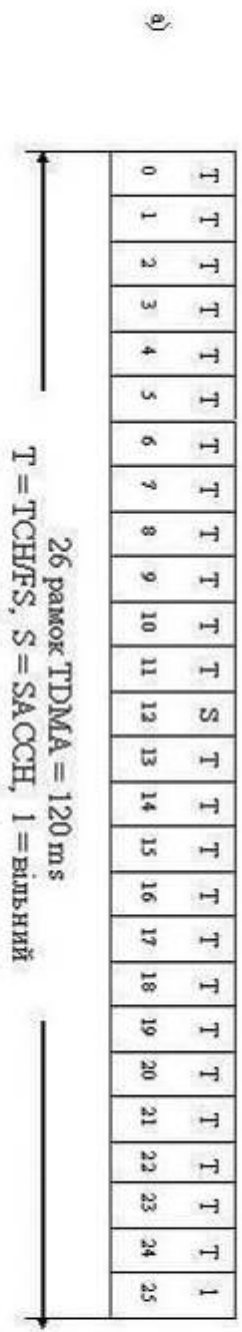
• **КОМБІНАЦІЇ ЛОГІЧНИХ РОЗМОВНИХ КАНАЛІВ.** Рис.7.15 представляє структуру описаного в п.7.1.2.4 26-циклового мультициклу, призначеного для передачі сигналів мови. Кожне поле відповідає і-тому часовому інтервалу в кожному з циклів TDMA. На рисунку показано фізичний канал тільки в одному напрямку, тоді як всі логічні канали, які зображені на цьому рисунку є двонаправленими і організація фізичного каналу в другому напрямку ідентична.

- **Комбінація І: TCH/FS+FACCH/FS+SACCH/FS** (рис. 7.15а). Це комбінація призначена для передачі розмовних сигналів, які містяться в логічному розмовному каналі типу full-rate (TCH/FS). Двадцять чотири поля цього каналу, позначені літерами Т, призначені для трансмісії закодованих сигналів мови (логічний канал TCH/FS), поле S призначене для повільного допоміжного сигналізаційного каналу

SACCH, а поле I не використовується. Цикл з рис. 7.15 повторюється 8,33 (120мс) рази на секунду, отже одному розмовному каналу відповідає $8,33 \text{ помн} * 24 = 200 \text{ полів/с}$. В кожному полі передається один основний пакет. З алгоритму кодування мови випливає, що для передачі 20-мілісекундного циклу сигналу мови потрібно чотири пакети, отже ємність одного фізичного каналу (216.67 пакетів/с, з них для розмовних каналів TCH/FS - 200 пакетів мови/с) достатня для передачі в реальному часі сигналу мови разом з сигналізаційною інформацією, що міститься в каналі SACCH. Згідно поданого в п.7.1.3.1 опису швидкого допоміжного сигналізаційного каналу FACCH, цей канал має найвищий пріоритет і по потребі заміняє поля T, передбачені для трансмісії розмовних пакетів з каналу TCH/FS.

- **Комбінації II і III** (рис. 7.15б). Вони призначені для передачі розмовних каналів тилу half-rate (TCH/HS). У випадку комбінації III парні поля на рис. 7.15б (позначені літерами "T") призначені для першого розмовного каналу, а непарні поля (позначені літерами "t") призначені для другого розмовного каналу. Кожний з каналів має також свій повільний допоміжний сигналізаційний канал SACCH, позначений, відповідно, літерами "S" і "s" на рис. 7.156. Отже кожному з розмовних каналів припадає, в цьому випадку, 100 пакетів мови/с (тобто 100 полів/с). Комбінація II відрізняється від комбінації III тільки тим, що в комбінації використовується тільки через одне поле, тому що в фізичному каналі передається тільки один логічний канал TCH/HS. Роль пакетів FACCH в трансмісії така сама як і в випадку комбінації I.

- **КОМБІНАЦІЇ ЛОГІЧНИХ СИГНАЛІЗАЦІЙНИХ КАНАЛІВ.** Комбінації IV, V, VI, і VII в таблиці 7.1 містять виключно логічні сигналізаційні канали. Обговорюючи ці комбінації потрібно окремо описати напрямом "вниз" і напрямом "вверх", тому що сигналізаційні канали для окремих напрямків часто організовують по-іншому.



$$T = T_{CH/HS0}, S = SA_{CSCH0}, t = T_{CH/HS1}, s = SA_{CSCH1}$$

Рис. 7.15. Організація фізичного каналу, призначеного для передачі логічних розмовних каналів:
 а) один канал типу full-rate, б) два канали типу half-rate

Таблиця 7.1 Розміщення логічних каналів в фізичних

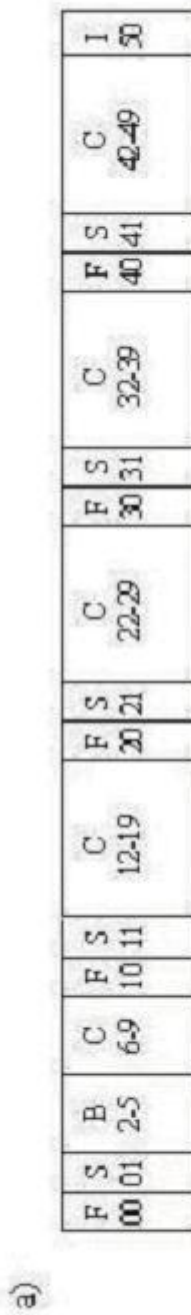
Номер комбінації	Організація логічних каналів	Примітки
I	TCH/FS + FACCH + SACCH/FS	основна комбінація для передачі сигналів мови
II	TCH/HS(0,1) + FACCH/HS(0,1) + SACCH/HS(0,1)	необхідно використовувати кодування мови типу <i>half-rate</i>
III	TCH/HS(0) + FACCH/HS(0) + SACCH/HS(0) + TCH/HS(1) + FACCH/HS(1) + SACCH/HS(1)	
IV	FCCH + SCH + CCCH + BCCH + SDCCH/4 + SACCH/4	для взаємодії з комбінацією VII
V	FCCH + SCH + CCCH + BCCH + SDCCH/4 + SACCH/4	заміняє комбінації IV і VII
VI	CCCH + BCCH	розширює комбінацію IV
VII	SDCCH/8 + SACCH/8	для взаємодії з комбінацією IV

- **Комбінація IV: FCCH+SCH+CCCH+BCCH** представлена на рис. 7.16. В каналі “вниз” розташовані розсіюючі канали FCCH, SCH, BCCH та спільні сигналізаційні канали CCCH, причому ці останні можуть бути довільною комбінацією викличних каналів PCN та каналів виділення лінії AGCH. Поля, які відповідають розсіюючим каналам завжди містять корисну інформацію. Поля CCCH використовуються, звичайно, тільки частково в залежності від кількості викликів. Визивні канали PCN беруть участь в підготовчій фазі до встановлення з'єднання, що надходить, а канали AGCH у встановленні вихідних з'єднань від абонента системи GSM. Якщо не всі поля CCCH використовуються, то в цих полях передаються замінні пакети.

Комбінація IV передається завжди в нульовому інтервалі на одній з частот, що використовується даною базовою станцією. Ця частота використовується як спеціальна сигналізаційна частота для сусідніх комірок (англ. *beacon frequency*). На цій частоті, в нульовому часовому інтервалі, рухомі станції, які перебувають в сусідніх комірках проводять постійні вимірювання потужності сигналу. В комбінації IV, канал “вгору” призначений для передачі рухомою станцією несинхронізованих між собою випадкових вимог доступу до системи (канал RACH). Решта інтервалів в той час не використовується. Комбінація IV призначена для використання разом із, взаємодіючою з нею в іншому інтервалі, комбінацією VI, в якій знаходиться решта сигналізаційних каналів. Для прикладу процедуру, яка використовує комбінацію IV описано в п.7.1.3.3.

Комбінація IV використовується тоді, коли в комірці є кілька несучих частот. Такі комірки здатні обслуговувати відносно великі навантаження. В комірці, яка обслуговує невелике навантаження використовується комбінація V.

- **Комбінація V: FCCH+SCH+CCCH+BCCH+SDCCH/4+SACCH/4**
Представлена на рис. 7.17. Запис SDCCH/4 і SACCH/4 означає можливість використання в цій комбінації чотирьох різних спеціальних каналів DCCH з чотирма допоміжними каналами SACCH. Таким чином одержують чотири рівноправні сигналізаційні канали в одному фізичному каналі. Комбінація V передбачена для використання в малих базових станціях, які використовують одну або дві несучі частоти. Вона надає повний комплект потрібних сигналізаційних каналів: розсіюючі, спільні і спеціальні сигналізаційні канали. Комбінація V завжди передається в нульовому часовому інтервалі і взаємовиключається з комбінацією IV.



Канали "вниз": F=FSSH, S=SSH, V=VSSH, C=CSSH(PSH або AGSH), I=вільний

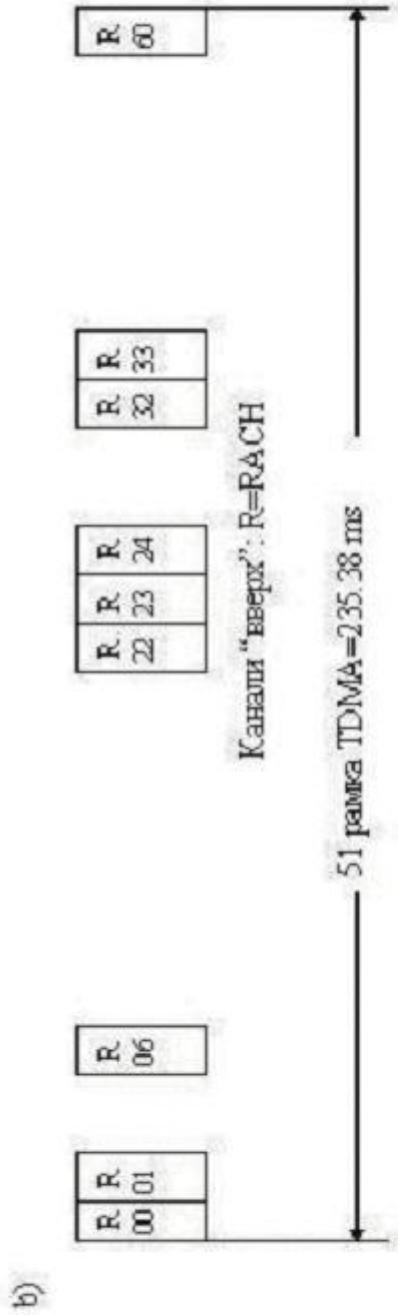


Рис. 7.16. Организация физического канала для пересылки IV комби наци логичних сигналізаційних каналів

Кожний з допоміжних каналів SACCH передається кожним другим мультициклом. Як видно, швидкість каналу SACCH невелика і становить тільки приблизно 2 пакети/с.

- **Комбінація VI: CCCH+BCCH.** У випадку, коли базова станція використовує велику кількість несучих частот, що вказує на велике навантаження в сигналізаційних каналах, то кількість каналів CCCH в комбінації IV може виявитись занадто малою. Комбінація VI збільшує кількість спільних сигналізаційних каналів CCCH. На відміну від комбінації IV, розташованої завжди в нульовому часовому інтервалі, комбінація VI може знаходитися в інтервалах: другому, четвертому або шостому. Коли діє ця комбінація то канали FCCH і SCH вже не передаються.
- **Комбінація VII: SDCCH/8+SACCH/8** показана на рис. 7.18. Вона призначена для взаємодії з комбінацією IV, в якій немає місця на передачу сигналізаційної інформації в фазі встановлення з'єднання (напр. реєстрація абонента або його ідентифікація). Для цієї мети служать описані в п.7.1.3.1 спеціальні логічні канали DCCH. Запис SDCCH/8 і SACCH/8 означає можливість використання в цій комбінації восьми різних каналів DCCH з вісьмома допоміжними каналами SACCH. В цей спосіб одержують вісім логічних сигналізаційних каналів в одному фізичному каналі.

Отже всі комбінації логічних каналів, які можна розміщувати в фізичних каналах системи GSM описані і представлені в таблиці 7.1.

На рис. 7.19 представлено два типи плану трансмісії для комірок, відповідно, з малим і великим навантаженням руху. В першому випадку (рис. 7.19а), базова станція використовує тільки один частотний канал. Часовий інтервал №0 в кожному з циклів TDMA зайнятий тоді комбінацією V сигналізаційних каналів. Решта інтервалів використовується комбінацією I

розмовних каналів. Отже, в комірці можна проводити одночасно 7 телефонних розмов. На рис. 7.19б показано випадок, коли комірки призначені для обслуговування більшого навантаження, в яких базова станція працює на чотирьох частотах. В такій ситуації комбінація IV сигналізаційних каналів в нульовому інтервалі на першій частоті, так званій спеціальній сигналізаційній частоті (англ. *beacon frequency*), повинна мати ще і комбінацію VI сигналізаційних каналів в інтервалі №2 також на першій частоті. В інтервалі №1 розташована комбінація VI, в якій знаходяться спеціальні сигналізаційні канали. Решта часових інтервалів першої та інших частот призначені для комбінацій розмовних каналів, що дозволяє проводити одночасно 29 розмов.

В наступному пункті описано кілька прикладів системних процедур, що використовують логічні канали, які були описані в п.7.1.3.1 і 7.1.3.2.

7.1.3.3. Приклади процедур, що використовують логічні канали

Нижче описано три приклади системних процедур, в яких кілька разів проходить обмін сигналізаційними повідомленнями. Це відбувається за допомогою відповідних логічних каналів.

- **Ввімкнення рухомої станції в систему.** Після ввімкнення рухома станція шукає спеціальну сигналізаційну частоту базової станції, тобто частоту на якій передаються логічні канали FSSN, SCH і BCCH. На відміну від інших частот, на яких в даний час також може працювати базова станція, в кожному з восьми часових інтервалів на цій частоті базова станція циклічно передає пакети. Якщо один з інтервалів (тобто один з фізичних каналів) не використовується для встановлення зв'язку з рухомою станцією, тоді в ньому передаються замінні пакети (англ. *dummy bursts*). Потужність сигналу передачі базової станції на спеціальній сигналізаційній частоті звичайно більша, ніж потужність сигналу на інших частотах. Отже рухома станція обстежує смугу частот в пошуках частотного каналу з найбільшим рівнем потужності.

Віднайшовши такий канал рухома станція аналізує спектр сигналу, що передається в цьому каналі в пошуках виразної синусоїди. Така синусоїда

відповідає каналу корекції частоти FCCN (частота на 67 кГц вища від середньої частоти смуги спеціального сигналізаційного каналу). Після виконання синхронізації несучої частоти, рухома станція розпізнає канал циклової синхронізації SCH, який займає сусідній інтервал після логічного каналу FCCN. З каналу SCH рухома станція зчитує номер циклу TDMA та тренувальний інтервал комірки. На цій підставі виконується процедура циклової синхронізації. Наступним етапом процедури включення рухомої станції в систему є ідентифікація спільного каналу BCCH і зчитування з нього інформації про комірку, в якій зараз знаходиться станція (номер зони викликів і код оператора). Всі ці кроки займають час рухомій станції від 2 до 5 секунд (а деколи до 20 секунд).

Другою частиною процедури ввімкнення рухомої станції в систему є процедура уточнення інформації про місце перебування рухомої станції. Описуємо її окремо тому, що ця процедура використовується також в багатьох інших ситуаціях.

- **Уточнення інформації про положення рухомої станції.**

Процедуру уточнення інформації про положення рухомої станції описано в таблиці 7.2. Відмічено тип сигналізаційного каналу, в якому передаються повідомлення, напрямок передачі сигналів та їх значення. Як видно, майже вся ця процедура відбувається в двонапрявленому виділеному сигналізаційному каналі SDCCH. Ця процедура стосується, найчастіше, реєстру чужих станцій VLR, а також реєстру власних станцій HLR, якщо станція змінює свою центральну зону.

- **Встановлення з'єднання до рухомої станції.**

Як останній приклад, в таблиці 7.3 показано всі кроки процедури встановлення з'єднання до рухомої станції. Ця процедура також використовує, перш за все, виділений сигналізаційний канал SDCCH (до моменту виділення розмовного каналу), а частково швидкий допоміжний сигналізаційний канал (після виділення розмовного каналу).

F	S	B	C	F	S	C	C	F	S	SD0	SD1	F	S	SD2	SD3	F	S	SA0	I	
00	01	2-5	6-9	10	11	12-15	16-19	20	21	22-25	26-29	30	31	32-35	36-39	40	41	42-45	46-49	50
F	S	B	C	F	S	C	C	F	S	SD0	SD1	F	S	SD2	SD3	F	S	SA2	I	
00	01	2-5	6-9	10	11	12-15	16-19	20	21	22-25	26-29	30	31	32-35	36-39	40	41	42-45	46-49	50

Канал "вниз": B=BCCH, C=CCCH, SD=SDCCH, F=FCCH, S=SCH

SD3	F	S	SA2	SA3	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	SD2			
0-3	4	5	6-9	10-13	14	15	1	17	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37-40	41-44	45	46	47-50
SD3	F	S	SA0	SA1	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	S	R	SD2	
0-3	4	5	6-9	10-13	14	15	16	17	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37-40	41-44	45	46	47-50

Канал "вверх": R=RACH, CD=SDCCH, SA=SACCH

51 рамка TDMA=235.38 ms

Рис. 7.17. Організація фізичного каналу, що призначений для V комбінації логічного сигналізаційного каналу

Парні рамки																			
SD0 0-3	SD1 4-7	SD2 8-11	SD3 12-15	SD4 16-19	SD5 20-23	SD6 24-27	SD7 28-31	SA4 32-35	SA5 36-39	SA6 40-43	SA7 44-47	1 4 8	1 4 8	1 4 8	1 4 8	1 4 8	1 4 8	1 4 8	1 4 8
Непарні рамки																			
SD0 0-3	SD1 4-7	SD2 8-11	SD3 12-15	SD4 16-19	SD5 20-23	SD6 24-27	SD7 28-31	SA0 32-35	SA1 36-39	SA2 40-43	SA3 44-47	1 4 8	1 4 8	1 4 8	1 4 8	1 4 8	1 4 8	1 4 8	1 4 8

Канал "вниз": SD=SDCCN, SA=SACCN, I=вільні

Парні рамки														
SA5 0-3	SA6 4-7	SA7 8-11	1 2	1 3	1 4	SD0 15-18	SD1 19-22	SD2 23-26	SD3 27-30	SD4 31-34	SD5 35-38	SD6 39-42	SD7 43-46	SA0 47-50
Непарні рамки														
SA1 0-3	SA2 4-7	SA3 8-11	1 2	1 3	1 4	SD0 15-18	SD1 19-22	SD2 23-26	SD3 27-30	SD4 31-34	SD5 35-38	SD6 39-42	SD7 43-46	SA4 47-50

Канал "вверх": SD=SDCCN, SA=SACCN, I=вільні

51 рамка TDMA = 235,38 ms

Рис. 7.18. Організація фізичного каналу, що призначений для пересилання VП комбінації логічних сигналізаційних каналів

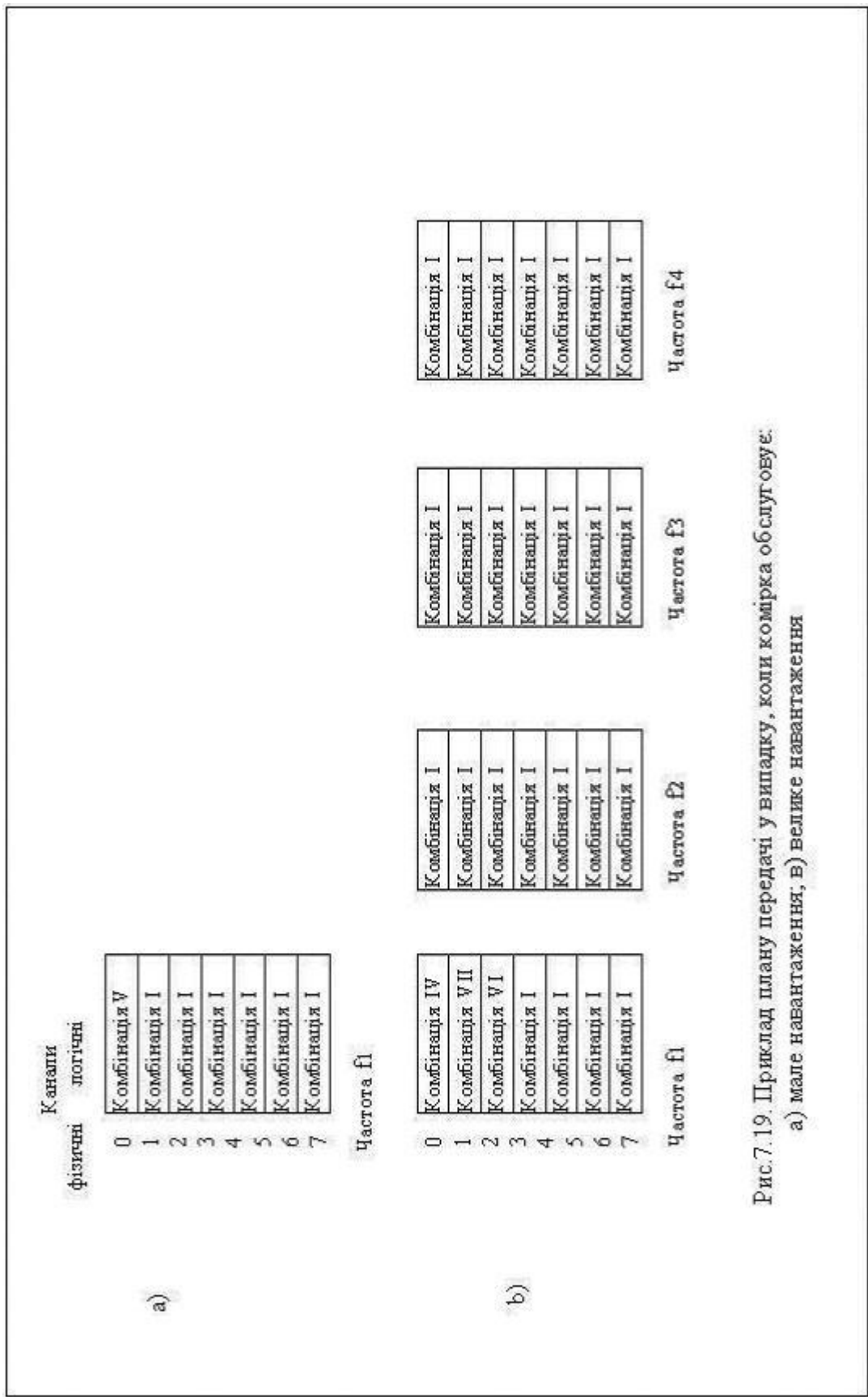


Рис.7.19. Приклад плану передачі у випадку, коли комірکا обслуговує:
 а) мале навантаження; в) велике навантаження

7.2. Трансмісія в радіоканалі

В розділі будуть описані етапи обробки сигналу на телекомунікаційній ділянці, безпосередньо зв'язаній з радіоканалом, тобто із встановленням зв'язку між базовою та рухомою станціями. Розділ присвячений обробці сигналу мови, модуляції та захисту сигналу від помилок, а також групі методів, які збільшують ефективність використання радіозасобів, таких, як скакання по частотах (англ. frequency hopping), керування потужністю сигналу передачі з рухомої станції, передача з випередженням, яка дає можливість циклічної синхронізації в приймачі та організація трансмісії сигналу в моменти часу, коли абонент не є активним під час триваючого з'єднання.

7.2.1. Кодування мови, каналне кодування та модуляція

Етапи перетворення сигналу мови показано на рис. 7.20. Сигнал мови, генерований в передавачі, наприклад абонентом рухомої станції, спочатку дискретизують і квантують, а потім реалізується складний алгоритм кодування мови, метою якого є зниження швидкості вихідного потоку.

Наступним етапом обробки сигналу мови є захист групи бітів від помилок, доповнюючи групу додатковими бітами. Це відбувається в комплекті каналних кодерів, які складаються з кількох модулів. Важливу роль тут відіграє, так зване, переплітання, як бітове так і блокове, яке підвищує ефективність окремих етапів кодування. Переплітання дозволяє розсіяти пакетні помилки, які виникли під час передачі інформації.

Двома останніми етапами обробки сигналу є шифрування і модуляція. В системі використовується модуляція частоти з гаусовським формуванням імпульсів несучих частот. В приймачі проходять зворотні перетворення: демодуляція, дешифрування, розплітання, каналне декодування та відтворення сигналу мови.

Таблиця 7.2 Процедура уточнення інформації про місце знаходження рухомої станції.

Логічний канал	MS BTS	Інформація
RACH AGCH	→ ←	Вимога виділення сигналізаційного каналу SDCCH Виділення каналу SDCCH, містить номер каналу
SDCCH	→	Вимога уточнення інформації про місце перебування; містить дані про нове положення рухомої станції
SDCCH SDCCH	← →	Вимога перевірки аутентичності користувача, містить ідентифікаційний параметр RAND Відповідь рухомої станції; містить параметр SRES
SDCCH SDCCH	← →	Наказ зміни режиму роботи на режим з шифруванням передачі Підтвердження зміни режиму
SDCCH SDCCH	← →	Підтвердження уточнення інформації про перебування MS, присвоєння тимчасового номеру рухомого абонента – TMSI Підтвердження нового місця перебування та тимчасового номера
SDCCH	←	Звільнення каналу SDCCH

Таблиця 7.3. Процедура встановлення з'єднання до рухомої станції.

Логічний канал	MS BTS	Інформація
PCH	←	Виклик рухомої станції; містить номер MS
RACH	→	Вимога виділення сигналізаційного каналу SDCCH
AGCH	←	Виділення сигналізаційного каналу SDCCH
SDCCH	→	Відповідь на виклик, передається в виділеному каналі

SDCCH	←	Вимога перевірки аутентичності користувач; містить ідентифікаційний параметр RAND
SDCCH	→	Відповідь рухомої станції; містить параметр SRES
SDCCH	←	Наказ зміни режиму роботи на режим з шифруванням передачі
SDCCH	→	Підтвердження зміни режиму
SDCCH	←	Інформація про встановлення з'єднання
SDCCH	→	Підтвердження
SDCCH	←	Виділення розмовного каналу
FACCH	→	Підтвердження
FACCH	→	Сигнал виклику до рухомого абонента
FACCH	→	Інформація про отримання абонентом, якого викликають, виклику
FACCH	←	Прийняття повідомлення про отримання абонентом виклику
TCH	←→	Обмін розмовною інформацією

7.2.1.1. Кодування мови

Першим етапом обробки сигналу на телекомунікаційних ділянках, представлених на рис. 7.20, є цифрове кодування сигналу мови. Швидкість бінарного потоку, який є результатом кодування мови типу full-rate в системі GSM становить 13 кбіт/с, тобто приблизно в 5 разів менша, ніж в такому ж стандартному кодері мови, що використовується в системі ІКМ. Можна уявити собі, з одного боку, який технологічний поступ пройшов за останні десятиліття, а з іншого боку складність кодера мови, який використовується в системі GSM.

Проектантам системи GSM було поставлено наступні вимоги, щодо передачі сигналів мови:

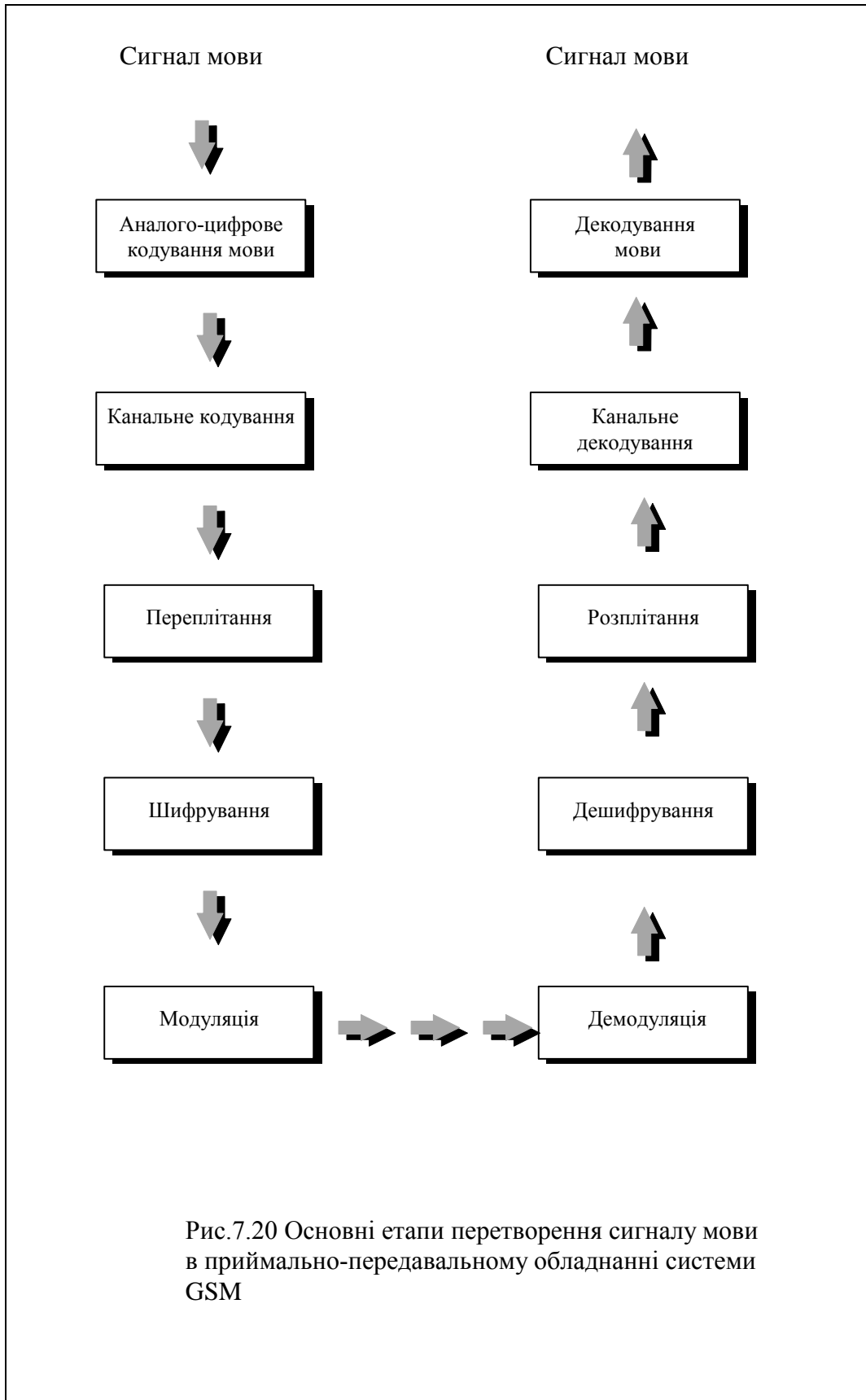
- невисока швидкість закодованого бінарного потоку, що дозволяє ефективно використовувати доступні радіозасоби;

- якість передачі мови, що може порівнюватися з якістю в аналогових системах;
- обмеження передачі в моментах, коли абонент під час триваючого з'єднання тимчасово неактивний.

Перші дві вимоги досить добре виконує кодер мови, який є поєднанням трьох елементарних кодерів. Його назва, кодер LPC-LTP-RPE, є поєднанням назв складових кодерів (англ. Linear Predictive Coding - Long Term Prediction - Regular Pulse Excitation). Третя вимога виконується за допомогою вмонтованого блоку виявлення активності абонента (англ. Voice Activity Detection VAD) та переривчатої трансмісії (англ. Discontinuous Transmission DTX).

Класичні, відносно найпростіші методи цифрового кодування сигналів мови базувалися на бінарному кодуванні окремих квантованих дискрет сигналу (система ІКМ) - рис. 7.21а (на рисунку 7.21 прийнято, що на входи окремих кодерів подається сигнал мови після дискретизації і квантування). Якщо замість дискрет сигналу кодуванню піддавали різницю між окремими дискретами, або більш складну функцію кількох наступних дискрет, то отримували алгоритми у вигляді дельта-модуляції, різницевої ІКМ і т. п. (рис. 7.21б). Спільною рисою алгоритмів цього типу є те, що в каналі передаються закодовані величини тільки перетворених дискрет. Алгоритми цього типу не є достатньо ефективними у випадках, коли вимагається бінарна швидкість закодованого сигналу мови 13 кбіт/с, як це має місце в системі GSM.

Компресія мови в системі GSM базується на алгоритмах іншого типу. Сигнал мови в таких алгоритмах перетворюється в два етапи: спочатку аналіз сигналу мови дозволяє визначити параметри відповідного лінійного фільтру, а потім сигнал мови фільтрується в цьому фільтрі (рис. 7.21с). На наступний етап компресії передається тільки вихідний сигнал з фільтру, а параметри фільтру повинні бути передані через трансмісійний канал до приймача.



Для ефективного кодування сигналу на виході фільтру потрібно вже значно менше бітів, ніж для кодування сигналу на вході фільтру. Перш ніж сигнал після фільтрації буде поданий на вхід кодера він може пройти через кілька наступних фільтруючих частин. Після останнього етапу компресії цього типу, генерований вихідний сигнал передається в каналі в дискретизованому вигляді з параметрами всіх фільтрів.

На рисунку 7.22 представлено функціональну схему блоку кодера мови, що застосований в системі GSM. Можна побачити модулі, які виконують початкову обробку сигналу і наступні два етапи кодування методом фільтрації в кінці кодування вихідного сигналу в кодері RPE. Окремі етапи компресії, які виконує даний блок будуть описані нижче.

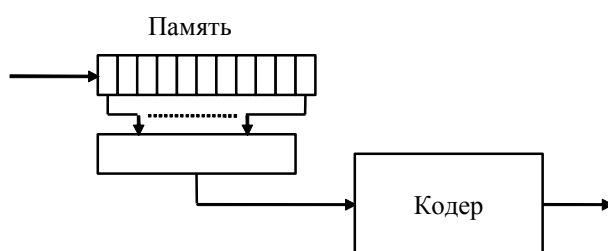
- **Початкова обробка сигналу мови.**

Початкова обробка мови здійснюється в декілька етапів, які описані нижче. Перш ніж сигнал мови буде підданий алгоритму кодування LPC-LTP-RPE, необхідною є його конверсія з аналогової форми в цифрову. Подібно, як в стандартній системі ІКМ, сигнал мови спочатку проходить через фільтр нижніх частот смугою 4 кГц, а потім дискретизується з частотою 8 кГц. Аналогові імпульси сигналу, які з'являються кожні 125 мкс рівномірно квантуються в 13-бітовому аналого-цифровому перетворювачі (А/С). Отже швидкість бінарного потоку на виході перетворювача А/С становить $8000 \text{ імпульсів/с} \times 13 \text{ біт/с} = 104 \text{ кбіт/с}$. Потім закодований сигнал мови подається на фільтр прімфази, завданням якого є підсилення високочастотних складових сигналу за рахунок складових спектру, що лежать на нижчих частотах. Далі, сигнал ділиться на пакети по 160 імпульсів, які відповідають фрагментам сигналу мови довжиною 20 мс. Частина бінарного потоку, що відповідає 20-мілісекундним фрагментам сигналу мови називається циклом сигналу мови.

a) ІКМ кодування



b) Різницеве кодування



c) Кодування фільтровим методом

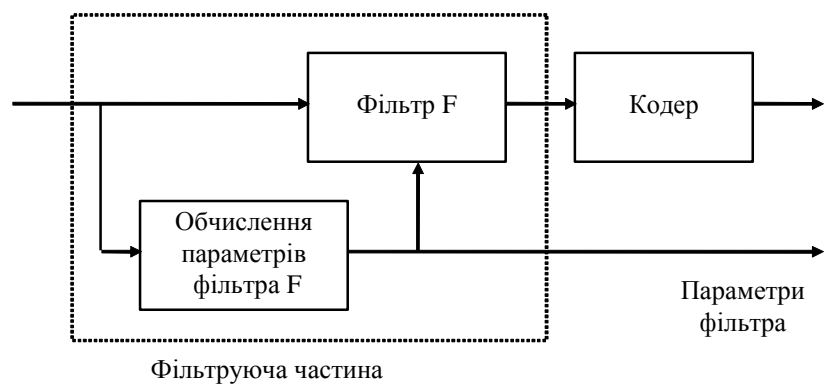


Рис.7.21 Способи кодування сигналів мови:
а) ІКМ кодування; в) різницеве кодування;
с) кодування фільтраційним методом

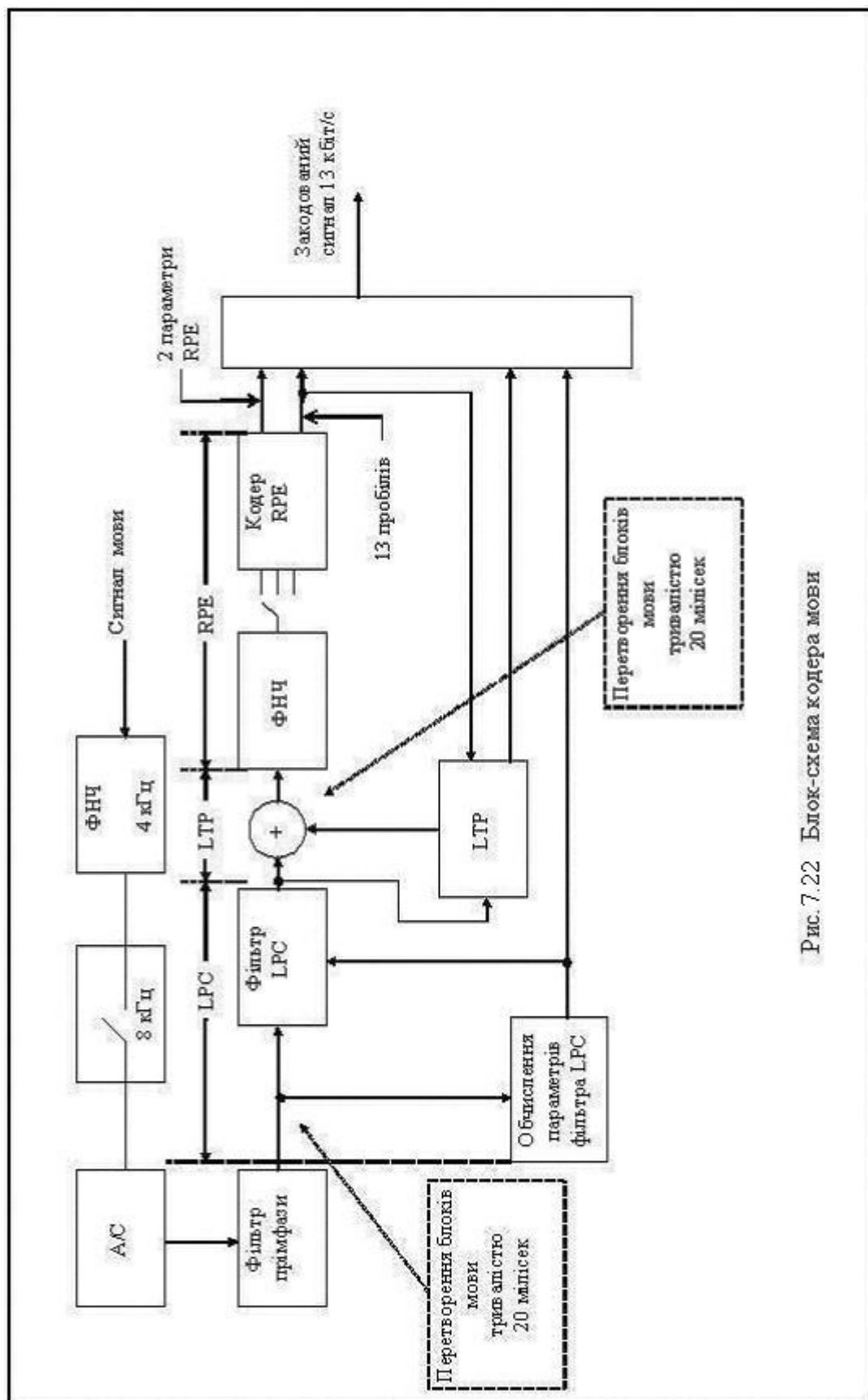


Рис. 7.22 Блок-схема кодера мови

- **Кодування з лінійним передбаченням LPC.**

Наступним етапом обробки сигналу мови в системі GSM є фільтрація сигналу в фільтрі LPC (англ. Linear Predictive Coding). Якщо людські голосові зв'язки змоделювати як лінійний фільтр, то фільтр LPC є фільтром зі зворотною дією. Завданням фільтру LPC є максимальне обмеження енергії дискретизованого сигналу мови. Це відбувається відповідним вибором параметрів фільтру. Параметри фільтру LPC визначаються окремо для кожного 20-мілісекундного циклу сигналу мови. Результатом операції для кожного циклу є так званий збуджувальний сигнал (англ. excitation signal) та величини восьми параметрів фільтру LPC. Збуджувальний сигнал подається на вхід блока LTP, а параметри фільтру LPC передаються безпосередньо на вихід кодера сигналу мови. Фільтр LPC є реально блоком обмежувача, що виконаний як лінійний фільтр восьмого порядку. Кожний біт, який з'являється на виході такого фільтру є певною лінійною комбінацією восьми попередніх бітів. Звідси назва операції: кодування з лінійним передбаченням.

- **Довготермінове передбачення LTP.**

В кодері LTP кожний 160-дискретний пакет збуджувального сигналу, який поступає з виходу фільтру LPC, ділиться на 4 пакети по 40 дискрет. Кожний пакет містить кожен четверту дискрету з оригінальної комбінації 160 дискрет і в певному сенсі відповідає фрагменту мови довжиною 5 мс. На наступному етапі компресії використовується подібність (кореляція) між 5-мілісекундними пакетами сигналу мови.

Для кожного з чотирьох наступних 5-мілісекундних пакетів сигналу мови блок LTP порівнює, який із решти трьох, що залишилися є найбільш подібним до першого (є найбільш скорельований). Потім ці пакети віднімаються один від одного, в результаті чого на виході блоку LTP з'являється різницевий сигнал, який закодувати набагато легше ніж вхідний сигнал. Результатом операції є різницевий збуджувальний сигнал та додаткові параметри, що дозволяють відтворити оригінальний сигнал в блоці зворотної дії в приймачі. Ці параметри подаються на вихід кодера; отже цей етап кодування подібний до схеми з

рисунку 7.21b.

- **Аналіз збуджувального сигналу RPE.**

Різницевий збуджувальний сигнал на виході блоку LTP фільтрується ФНЧ. Після фільтрації кожна третя дискрета різницевого сигналу (англ. subsampling) подається на вхід кодера RPE (англ. Regular Pulse Excitation). Фаза такої дискретизації (з частотою 8 кГц/3) підбирається так, щоб вибраний ряд мав якнайбільшу енергію. Потім дискрети кодуються в кодері RPE з застосуванням адаптивної версії кодування ІКМ. В результаті операції отримуємо закодовані дискрети різницевого збуджувального сигналу та параметри кодера RPE, в тому числі і фазу дискретизації.

Кожному фрагменту сигналу мови довжиною 20 мс відповідає на виході кодера цикл сигналу мови довжиною 260 бітів (таблиця 7.4). В загальному бінарному потоці, що має швидкість 13 кбіт/с параметри модулів LPC, LTP і RPE утворюють потік із загальною швидкістю 4.2 кбіт/с, а закодовані дискрети потік швидкістю 8.8 кбіт/с. Порівняно з вхідною швидкістю 104 кбіт/с, швидкість трансмісії бінарного потоку зменшилась у 8 разів. Про складність кодера мови говорить той факт, що він виконує приблизно 1,5 млн. операцій множення і додавання на секунду.

На рисунку 7.23 показано спрощену функціональну схему декодера мови. Окремі блоки виконують функції, що обернені до блоків, які були описані вище. На виході декодера отримуємо потік 104 кбіт/с, що відповідає сигналу на виході перетворювача А/С в передавачі (рис. 7.22). Схема декодера є значно простіша від схеми блоку кодера.

7.2.1.2. Канальне кодування сигналу мови

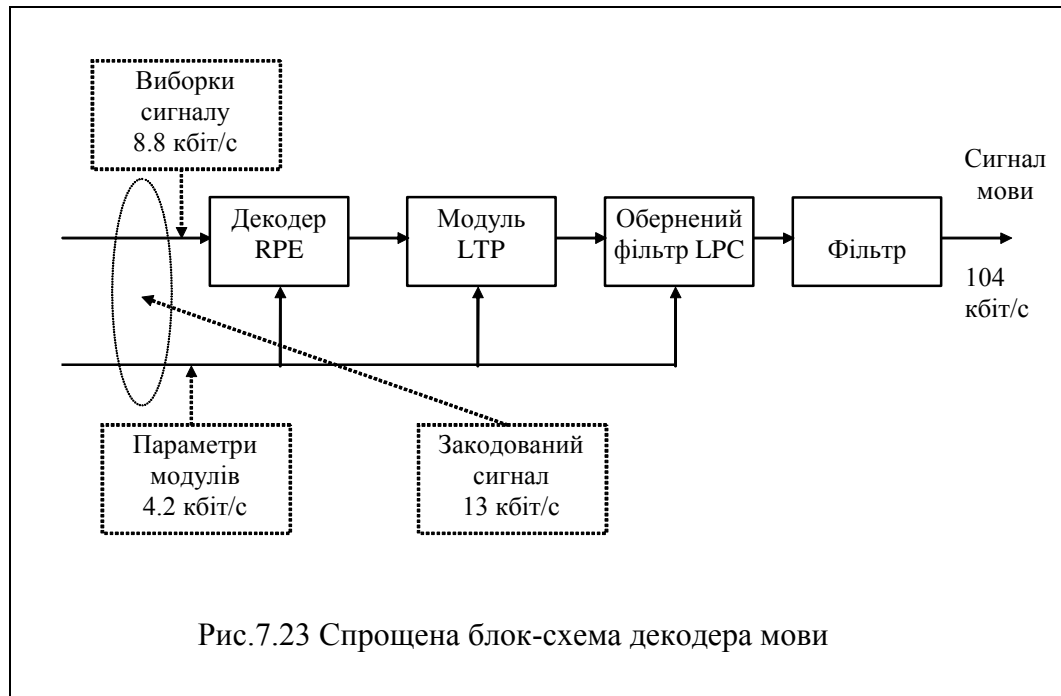
Метою канального кодування є захист інформації, що передається, від впливу завад і спотворень, які вносить трансмісійний канал (шум, інтерференція, явище багатошляховості, ефект Доплера і т.п.).

Принципи канального кодування є зовсім іншими ніж описані вище принципи кодування мови. Канальний кодер не знищує надлишкові біти, а

дописує додаткові біти до потоку, що передається. Ці додаткові біти використовуються в приймачі в блоці каналного декодера для виявлення і виправлення помилок.

Таблиця 7.4

Назва модуля	Кількість параметрів	Кількість бітів в блоці 5 мс	Кількість бітів в циклі 20 мс
LPC	8 параметрів	---	36
LTP	2 параметри	9	36
RPE	2 параметри	8	32
	13 закодованих дискрет	39	156
Разом			260



Як показано в таблиці 7.4, значення окремих бітів, що передаються в сигналі на виході кодера мови, є різні і в залежності від цього різними є реальні ймовірності помилковості окремих бітів. В цій ситуації в системі GSM

вирішено по різному захищати окремі елементи закодованого сигналу мови. З цією метою 260 бітів, що містяться в кожному циклі сигналу мови поділено на три класи. Організацію каналного кодування окремого блоку бітів, що відповідає циклу сигналу мови тривалістю 20 мс описано на рис. 7.24 і в таблиці 7.5.

Для каналного кодування використовується блоковий кодер (50, 53), тобто до кожного п'ятибітового блоку, що подається на вхід кодера додаються три захисні біти. Використовується також змішувальний код з параметром 1/2. Це означає, що вхідна послідовність бітів розширюється вдвоє.

Кодер мови генерує кожної секунди 50 циклів, кожний довжиною 260 бітів. Отже швидкість бінарного потоку після кодування становить 50 циклів/с x 465 бітів/цикл=22.8 кбіт/с.

7.2.1.3. Переплітання

На практиці більшість телекомунікаційних каналів вносить завади до сигналу, що передається. Помилки, які утворюються на виході демодулятора мають тенденцію групуватися в, так звані, “пакети помилок”. Такий характер каналу є небажаним для роботи каналних кодерів. Класичним методом, який використовується в таких ситуаціях є бітове або блокове переплітання.

Переплітання розмовних сигналів в системі GSM виконується двома кроками. Спочатку виконується бітове переплітання, а потім блокове переплітання.

Виконання бітового переплітання в системі GSM виглядає так. Блок 456 бітів, що відповідає одному циклу сигналів мови на виході каналного кодера, ділиться на 8 частин по 57 бітів - це відповідає довжині кожного з двох полів, призначених для передачі інформаційних бітів в основному пакеті GSM.

Таблиця 7.5 Організація каналного кодування сигналу мови в системі GSM

Назва групи	Кількість бітів	Рівень помилок	Захист	Кількість бітів після
-------------	-----------------	----------------	--------	-----------------------

бітів				кодування
клас Ia	50	великий	пакетний код і змішуючий код	$(50+3) \cdot 2 = 106$
клас Ib	132	середній	змішуючий код	$132 \cdot 2 = 264$
біти "0"	4	середній	змішуючий код	$4 \cdot 2 = 8$
клас II	78	малий	немає	78
Разом: 260 бітів		Разом: 456 бітів		

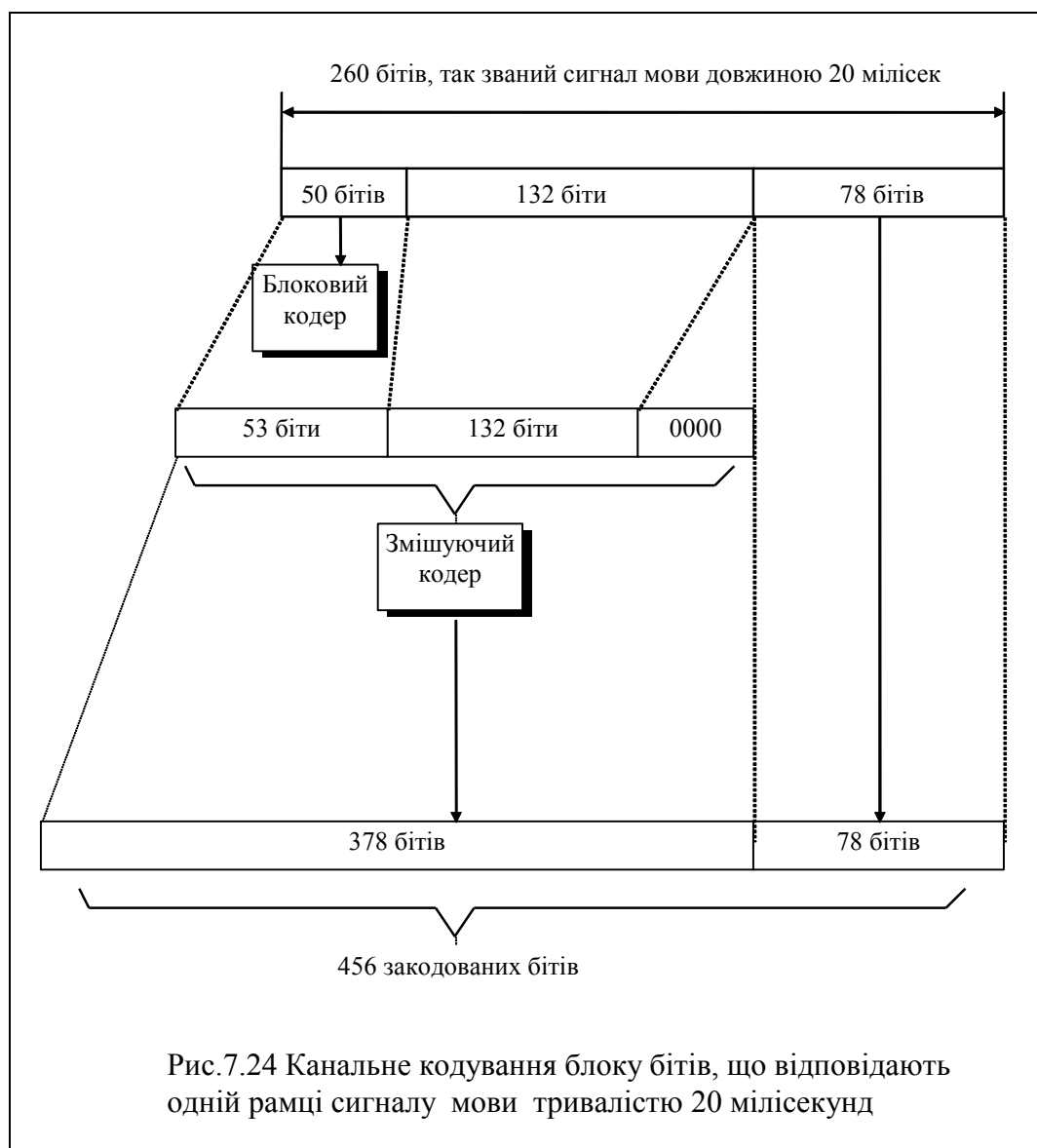


Рис.7.24 Канальне кодування блоку бітів, що відповідають одній рамці сигналу мови тривалістю 20 мілісекунд

Після бітового переплітання один цикл сигналу мови тривалістю 20 мс займає чотири основні пакети, змінюється тільки черговість інформаційних

бітів в пакетах. В наступному кроці виконується блокове переплітання. Під час виконання блокового переплітання інформаційні поля основних пакетів переплітаються між собою так, що після переплітання займають по одному інформаційному полю в восьми наступних основних пакетах.

Переплітання зменшує вразливість переданого сигналу до пакетних помилок. Якщо канал спричиниться до втрати кількох бітів під час передачі, то на виході каналного декодера тільки в 12,5% бітів будуть міститись помилки. У випадку, коли канал спричиниться до втрати всього пакету, блокове переплітання зробить так, що кількість бітів, вражених помилками, не перевищить 12,5%. Реально кількість неправильних бітів є наполовину нижча, тому що серед бітів, вражених помилками, в середньому кожний другий підлягає зміні. Отже, як для коротких, так і для довших пакетів помилок, пакети даних на виході каналного декодера мають, звичайно, не більше ніж приблизно 6% помилок. Це процент, який коректують каналні декодери системи GSM. Недоліком переплітання є вносиме запізнення. Передача одного циклу, що відповідає фрагменту сигналу мови тривалістю 20 мс триває приблизно 33 мс.

Після операції переплітання настає остаточне формування пакетів, які далі модулюються і подаються в канал. До інформаційних бітів додається тренувальна група, два однобітові позначники (SF), які вказують, що міститься в блоці інформаційних бітів (розмовні дані чи сигналізація) та три кінцеві біти (TB) на початку і в кінці пакету.

7.2.1.4. Захист сигналів даних від помилок

Канальне кодування і блокове переплітання сигналізаційної інформації та даних істотно відрізняється від каналного кодування і блокового переплітання, описаних в пунктах 11.1.2 та 11.1.3 для сигналу мови. Ці відмінності виникають зі значно вищих вимог, щодо якості трансмісії, які ставляться при передачі таких сигналів. В таблиці 7.6 показано тільки основні параметри кодування і блокового переплітання для деяких окремих видів передачі інформації.

Детальний опис способів кодування і переплітання, що використовуються у випадку передачі даних виходить за рамки цього розділу. Незважаючи на те, що, на перший погляд, існує велика різноманітність кодів, їх параметри вибрані так, що конструкції кодерів мають спільні риси. Для порівняння, в таблиці 7.6 представлено також параметри описаних раніше кодерів, що використовувались для кодування розмовних сигналів.

7.2.1.5. Модуляція

Останнім етапом перетворення сигналу на рис. 7.20, в передавальній частині, є модуляція. В системі GSM використано модуляцію GMSK (англ. Gaussian Minimum Shift Keying) з параметром $BT=0.3$ (B - ширина смуги в Гц на рівні 3 дБ; T - час тривання одного біту). Модуляція GMSK є модифікацією модуляції FSK (англ. Frequency Shift Keying).

Бінарна швидкість пакету бітів на вході модулятора становить:

$$8.33 \text{ мультирамки/с} \times 26 \text{ рамок (в мультирамці)} \times \\ 8 \text{ пакетів (в рамці)} \times 156.25 \text{ бітів (в пакеті)} = 270.8 \text{ кбіт/с}$$

В зв'язку з тим, що GMSK є бінарною модуляцією, швидкість модуляції на виході модулятора становить також 270.8 кбод. Відносно ширини частотного каналу, яка становить в системі GSM 200 кГц, ефективність використання смуги становить приблизно 1.35 біт/с/Гц. Це відносно висока величина для бінарної модуляції. Набагато вищої величини ефективності роботи діапазону, що сягає 6 біт/с/Гц і вище, можна досягнути використовуючи багаторівневі модуляції, такі як M-PSK або M-QAM. На теперішньому рівні розвитку техніки це не є можливим тому, що рівень завад і спотворень, притаманний каналам рухомої радіокомунікації, робить неможливим, впевнений прийом багаторівневих сигналів.

Спосіб модуляції в системі GSM стандартизований. Схеми модулятора і демодулятора в специфікації GSM не оговорені і можуть бути модернізовані. На рис. 7.25 представлено тилову функціональну схему модулятора GMSK. На

вхід модулятора подаються прямокутні імпульси, що відповідають закодованому різницевому пакету бітів з виходу каналного кодера. Ці імпульси спочатку інтегруються в інтегруючому пристрої, далі згладжуються в фільтрі нижніх частот, який має характеристику кривої Гауса (звідси назва модуляції), а потім подаються на вхід класичного квадратичного модулятора. Утворений сигнал подається в радіоканал.

Модуляція GMSK є частковим випадком бінарних сигналів з фіксованою фазою і є покращеною версією відомої модуляції MSK (англ. Minimum Shift Keying).

Таблиця 7.6 Основні параметри каналного кодування та пакетного переплітання для передачі різних типів сигналів в системі GSM

Тип каналу (1)	Швид- кість передачі на вході, кбіт/с (2)	Кількість бітів у вхідному пакеті	Кодування (3)	Кількість бітів у вихідном у пакеті	Пакетне переплітання
Передача мови					
TCH/FS	Ia		50	пакетне (50,53) та змішуюче 1/2	в 8 “півпакетах”
	Ib	13	132	456	
	II		78	немає	
Передача даних					
TCH/F (9.6)	12	240	змішуюче 1/2 (діркування: 1 біт з 15) (4)	456	в 22 пакетах
TCH/H (4.8)	6				
TCH/F (4.8)	6	120	змішуюче 1/4	456	в 22 пакетах

TCH/F (2.4)	3.6	72	змішуюче 1/6	456	в 22 пакетах
TCH/H (2.4)	3.6	144	змішуюче 1/3	456	в 22 пакетах
Передача в сигналізаційних каналах					
SCH		25	пакетне (25,35) та змішуюче 1/2	78	в 1 синхронізацій ному пакеті
RACH		8	пакетне (8,14) та змішуюче 1/2	36	в 1 пакеті доступу
FACCH			код Фіре		в 8 “півпакетах”
SDCCH, SACCH, BCCH, FCH, AGCH		184	(184,224) та змішуюче 1/2	456	в 4 пакетах
FCCH	немає кодування				

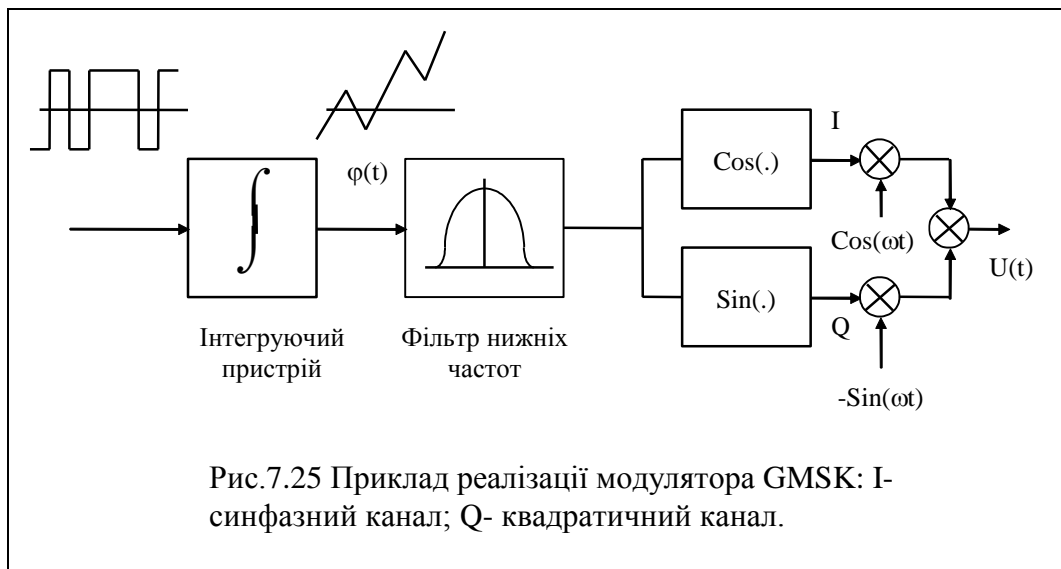
7.2.1.6. Приймач GMSK

Явище багатошляховості поширення, яке проявляється в рухомому радіоканалі, приводить до завмирання сигналу. Крім результатів впливу багатошляховості поширення на сигнал, що передається, накладається також ряд інших завад, таких як: канальна і міжканальна інтерференції, завади від інших систем, природній шум і інше.

На основі прийнятого сигналу приймач повинен бути в стані визначити найбільш правдоподібну групу переданих бітів, тобто такий пакет, для якого модульований сигнал, що відповідає йому, відносно мало відрізняється від прийнятого сигналу на вході приймача.

Існує багато різних алгоритмів демодуляції. Стандарт GSM не встановлює

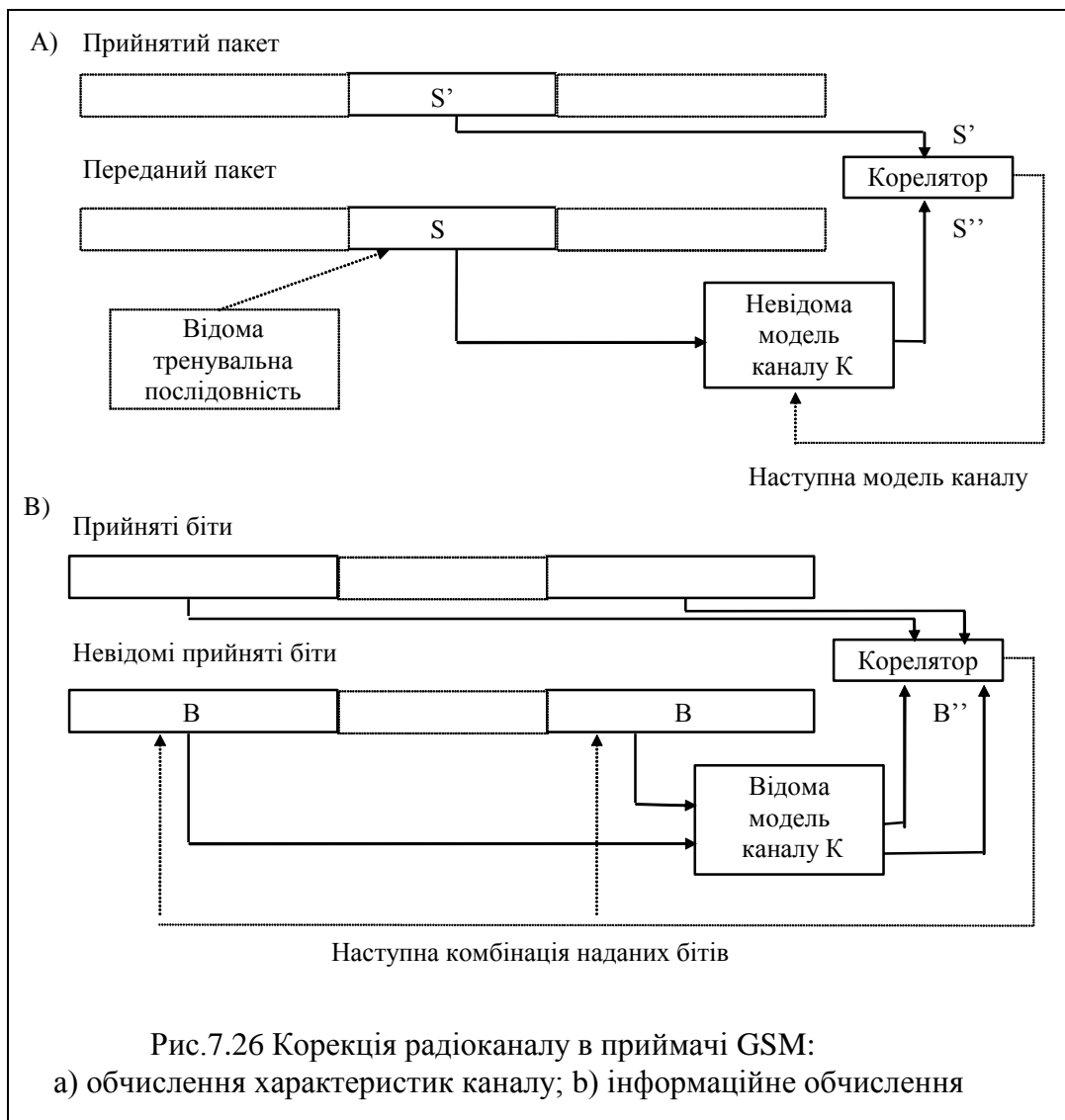
конкретного алгоритму демодуляції, порушуючи однак вимоги щодо якості сигналу (рівня помилок) на виході каналного декодера. Ці вимоги стосуються різних умов середовища, швидкості та типу каналу. Стандарт GSM вимагає також від алгоритму, щоб він був в стані прийняти і правильно декодувати сигнал, що надійшов до приймача двома шляхами із взаємним зсувом в часі, що не перевищує 16 мкс (це час тривалості приблизно чотирьох бітів в системі GSM). При такому зсуві в часі рівень міжсимвольної інтерференції значно перевищує рівень завад, що виникають в самій модуляції. Прості методи демодуляції тут не підходять. Для цього використовують блок корекції.



Принципи роботи коректора радіоканалу представлено на рис. 7.26. Робота коректора є двоетапною. Перший етап полягає на створенні математичної моделі каналу. Якщо радіоканал буде спроектований як лінійний фільтр, то створення моделі каналу відповідає обчисленню імпульсної відповіді фільтру. Для обчислення імпульсної відповіді фільтру потрібно знати, якими є сигнали на його вході і виході. З цією метою в коректорі використовується відомий раніше в обох кінцях каналу пакет бітів, так звана тренувальна група S. Для кожного наступного прийнятого пакету в коректорі аналізуються всі можливі моделі каналу K і вибирається та з них, для якої група S'' є найближча до реально прийнятої групи S' (рис. 7.26а). На цьому етапі відомі групи S і S'', але

невідомою моделлю каналу K .

В наступній частині процесу корекції приймають, що модель каналу K , обчислена на першому етапі вже відома. Відомим також є прийнятий пакет інформаційних бітів V' . На цьому етапі переглядаються всі пакети бітів V і шукається пакет, для якого пакет V'' , що йому відповідає, є найближчий реально прийнятому пакету V' (рис. 7.26В). На цьому етапі відомі група V' і модель K , а обчислюється пакет V .



Описані вище принципи роботи коректора є відносно простими. Основна проблема полягає в ефективному виконанні необхідних обчислень і порівнянь так, щоб запізнення, що вноситься коректором, не було занадто великим, а

коректор мав не дуже складну конструкцію. Для 114 інформаційних бітів, які містяться в одному пакеті, кількість можливих груп В становить 2114, тобто понад 1033. Отже на практиці необхідним є використання ефективних алгоритмів, які обмежують кількість комбінацій, що перевіряються. Прикладом такого алгоритму є алгоритм Вітербі. Опис алгоритму Вітербі виходить поза рамки цього розділу, потрібно тільки зауважити, що він також часто використовується для демодуляції деяких сигналів, в тому числі і сигналів GSMK. Однією з переваг застосування алгоритму Вітербі для корекції радіоканалу є можливість спільного виконання процесів демодуляції і декодування в приймачі GSM.

7.2.2. Ефективне використання радіозасобів

В системі GSM існують високі вимоги на ефективне використання радіозасобів. Цій меті служать, з одного боку, описані раніше, точно підібраний алгоритм кодування мови та цифрова модуляція. Крім них, з іншого боку, в системі GSM використовуються також кілька інших спеціальних методів, які виконують подібні функції. Одним з них є процедура скакання по частотах (англ. frequency hopping), яка в принципі є одним з методів модуляції з розширеною смугою, але в системі GSM використовується з метою зменшення міжканальної інтерференції та підвищення рівня захищеності від завад. Наступним методом є керування потужністю рухомої станції (англ. power control). Це процедура, яка зменшує рівень радіосигналів в каналі. Слідуючим методом є, так звана, передача з випередженням (англ. timing advance). Метод дозволяє ефективно використовувати радіоканал майже весь час, під час тривання передачі і розташування окремих передавачів на різних відстанях від базової станції. Останнім методом є, так звана, переривчаста передача (англ. Discontinuous Transmission DTX), яка дозволяє обмежувати трансмісію сигналу в моменти, коли абонент не є активним під час триваючого з'єднання.

7.2.2.1. Скакання по частотах

Скакання по частотах (англ. Frequency Hopping FH) є, поряд з системами з імпульсним кодуванням, одним з двох основних методів модуляції з розширеною смугою (англ. spread spectrum modulation). Метод скакання по частотах полягає в тому, що несуча частота модульованого сигналу циклічно змінюється і псевдовипадковим способом приймає одну з N можливих величин, причому типово $N = 1000$. В результаті отримують модульований сигнал, який займає дуже широку смугу, приблизно в N раз ширшу від смуги сигналів з модуляцією амплітуди чи фази. Модульований сигнал таким чином набирає рис псевдошумового сигналу, його важко викрити, а також розшифрувати, він дуже завадостійкий. Можливо також одночасно передавати сигнали, які займають після модуляції той самий інтервал часу і ту саму смугу частоти. Такий спосіб називається кодовим розділення каналів CDMA.

В системі GSM метод скакання по частотах (FH) використано в іншому, менш тиловому застосуванні. Метою застосування методу FH було, з одного боку, зменшення залежності від якості трансмісії в окремому частотному каналі, а з іншого боку, зниження середнього рівня міжканальної інтерференції в сусідніх комірках. Скакання по частотах в версії, що використовується в системі GSM, може бути використане тільки в комірках, в яких використовується кілька частотних каналів (на практиці хоча б чотири). В такій ситуації фізичний канал організується за допомогою ряду часово-частотних інтервалів, які періодично повторюються, причому величина несучої частоти для даного фізичного каналу не є сталою, а змінюється циклічним способом в рамках певної групи частот. Переваги скакання по частотах видно, між іншим, в ситуації, коли в радіоканалі проявляються швидкі завмирання. Умови поширення в окремих частотних каналах можуть тоді значно відрізнятися одні від одних. Тоді і фізичний канал системи GSM, в якому застосовано скакання по частотах, використовує кожний з доступних частотних каналів. Отже статистичні характеристики поширення в фізичному каналі також можна усереднити, а якість трансмісії в окремих фізичних каналах є наближено

однакова.

Іншою перевагою використання методу FH в системі GSM є обмеження впливу міжканальних завад, генерованих даною базовою станцією, на інші комірки, які використовують ті самі частоти. Розглянемо з цією метою схему, представлену на рис. 7.27, де показано дві комірки та позначено частоти, які використовуються в кожній. Вважатимемо, що перша комірka обслуговує відносно велике навантаження і має в своєму розпорядженні чотири частоти f_1 , f_2 , f_3 , f_4 , а друга комірka тільки одну частоту f_1 . Комірки з рис. 7.27 використовують частково ті самі частотні канали, отже вони не є комірками, що межують між собою. Звернемо увагу на факт, що типово в кожній комірці (подібно як у всій мережі) значна кількість з'єднань не використовується. Для спрощення вважатимемо, що в даний момент в комірці №1 тільки частоти f_1 і f_4 використовуються повністю (тобто 8 фізичних каналів), а решта частот не використовується. Якщо не буде використовуватись метод FH, то в канал f_1 в комірці №2 будуть проникати дуже значні завади з каналу f_1 комірки №1 (рис. 7.27а). Після застосування методу FH, всі частоти в комірці №1 будуть завантажені в рівній мірі, тобто на 50%, це означає, що як канал f_1 так і f_2 в комірці №2 будуть в рівній мірі піддаватися впливу завад від комірки №1, з рівнем завад на 3 dB нижчим від максимального рівня. Отже, отримуємо середній (оптимальний) рівень міжканальних завад, що в контексті статистичних методів планування телекомунікаційних систем дає можливість понизити вимоги, що стосуються, наприклад, відстані між комірками, які використовують ті самі частоти і тим самим веде до збільшення ємності системи. Потрібно зауважити, що реальна ситуація в радіоканалі є набагато складнішою, наприклад, із-за застосування в обох комірках методу FH одночасно (для цього потрібно було б також кілька частотних каналів в комірці №2), але названі вище якісні показники, що стосуються обмеження впливу завад, залишаються правильними.

Скакання по частотах є визначене для кожної комірки, але не є обов'язковим для виконання кожною базовою станцією. Проте кожна рухома

станція повинна мати можливість зміни своєї частоти на вимогу базової станції на основі отриманого від неї алгоритму. Такий наказ може бути виданий в результаті погіршення якості з'єднання, зауваженого блоком керування базовими станціями BSC. Тоді блок керування виділяє рухомій станції групу частот, в рамках якої вона буде змінювати несучу частоту для даного фізичного каналу та алгоритм змін. Існує кілька таких алгоритмів, вони понумеровані, а до рухомої станції передається номер алгоритму - HSN (англ. Hopping Sequence Number). Розрізняють циклічний алгоритм та псевдовипадкові алгоритми. Циклічний алгоритм полягає на виборі ряду частот з деякої групи: від першої до останньої, потім знову перша. Псевдовипадковий алгоритм полягає у виборі частоти на основі псевдовипадкового закону. Приклад утворення фізичного каналу при виконанні циклічного алгоритму скакання по частотах, для трьох частотних каналів, представлено на рис. 7.28.

Частота базової станції, на якій в нульовому часовому інтервалі передаються сигналізаційні канали FCCH, SCH і BCCH (англ. beacon frequency), завжди є сталою величиною. Ця частота використовується як спеціальна сигналізаційна частота для рухомих станцій і на основі неї рухомі станції проводять вимірювання потужності сигналу прийому, що надходить від сусідніх комірок та синхронізуються з системою.

Групи частот, в рамках яких рухома і базова станції змінюють свої частоти, можуть утворюватися незалежно для кожного часового інтервалу.

Використаний в системі GSM метод скакання по частотах дозволяє на практиці покращити приблизно на 2 dB співвідношення сигнал/шум. З іншого боку, метод FH вимагає використання в даній комірці кількох частот, тоді як в типових комірках на території з невеликим навантаженням руху базові станції укомплектовані часто тільки одним передавально-приймальним блоком TRX, який працює на одній, чітко визначеній частоті.

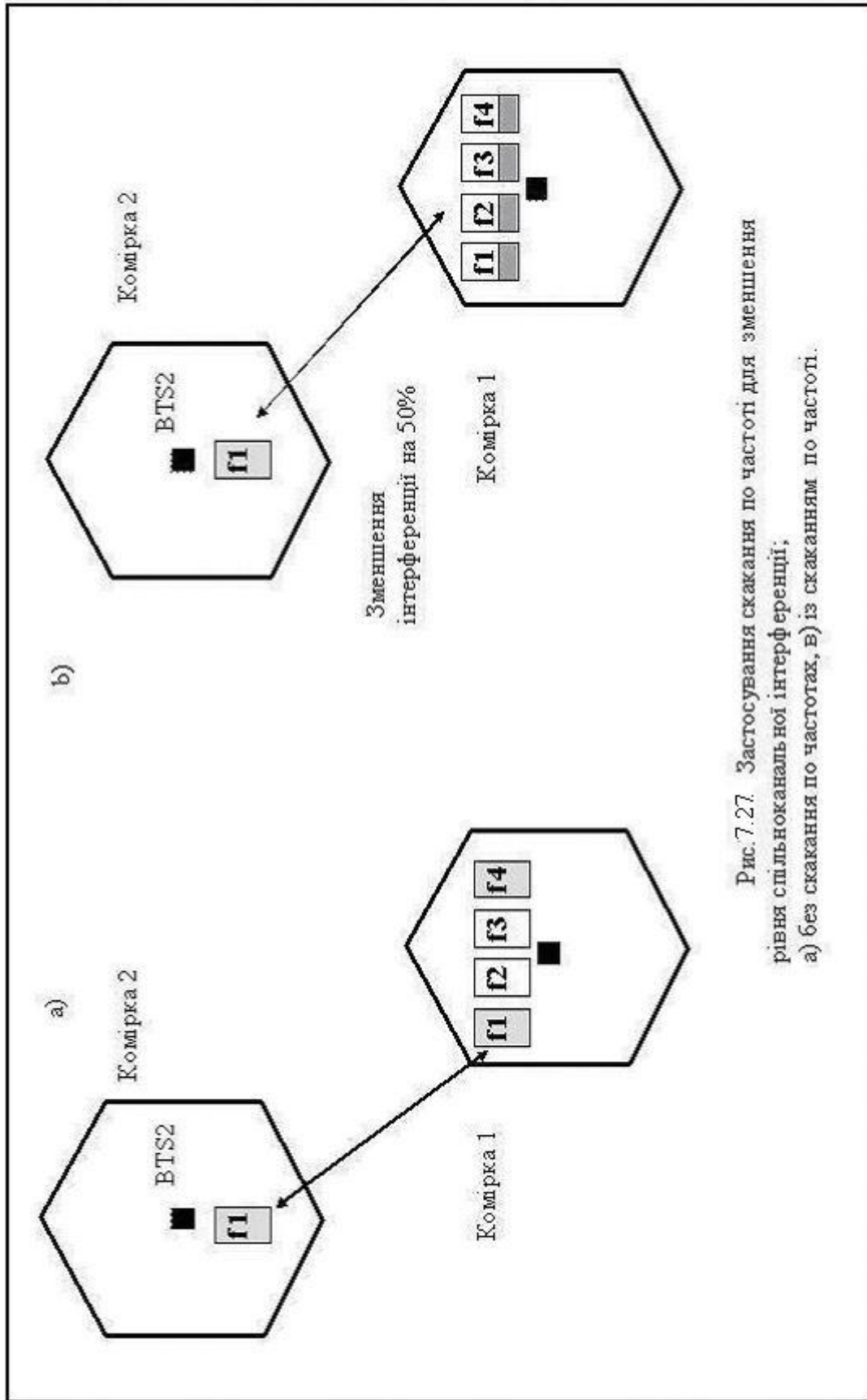


Рис. 7.27. Застосування скакання по частоті для зменшення рівня спільноканальної інтерференції.
 а) без скакання по частотах, б) із скаканням по частоті.

Застосування скакання по частотах означає тоді необхідність монтажу в базовій станції додаткових передавально-приймальних блоків або доукомплектування базової станції блоком синтезу частот, який би змінював частоту роботи передавача при збереженні невеликої кількості фізичних каналів, що використовуються в даній комірці.

7.2.2.2. Керування потужністю

Процедури керування потужністю (англ. power control) дає можливість динамічно підстроювати потужність сигналу, який передається в радіоканалі, під відстань між передавачем і приймачем, що змінюється. Це відбувається за допомогою зміни рівня сигналу передачі, наприклад, рухомою станцією, в певних межах так, щоб в даний момент для даної довжини з'єднання і даного рівня спотворень в каналі це був найменший рівень, необхідний для одержання відповідної якості сигналу. Метою цієї процедури є зменшення інтерференції між фізичними каналами, що працюють на тій самій частоті в сусідніх комірках, а також на сусідніх частотах, та продовження тривалості життя батарей в рухомій станції.

В обох напрямках передачі регулювання рівня потужності відбувається покроково. Максимальна швидкість змін становить 2 dB на протязі 60 мс. Отже, відповідь на раптову зміну вимог щодо рівня потужності, наприклад, після переходу рухомої станції з комірки малих розмірів до комірки великих розмірів або при переміщенні рухомої станції в зону значного затухання сигналу, триває кількасот мілісекунд. Регулювання рівня потужності, яке виникає зі зміни величини затухання у вільному просторі (що є наслідком змін відстані від передавача до приймача) є відносно повільним і відбувається текучо.

В системі GSM межі змін потужності для з'єднання від рухомої до базової станції становлять від 20 dB до 30 dB, з кроком у 2 dB, в залежності від класу потужності рухомої станції. Межі змін для з'єднання від базової станції до рухомої залежать від виробника і не повинні перевищувати 30 dB, також з кроком у 2 dB. Застосування керування потужністю є визначене. Оператор

системи вирішує, чи використовувати цю процедуру в обох напрямках, чи в одному, чи взагалі її не використовувати.

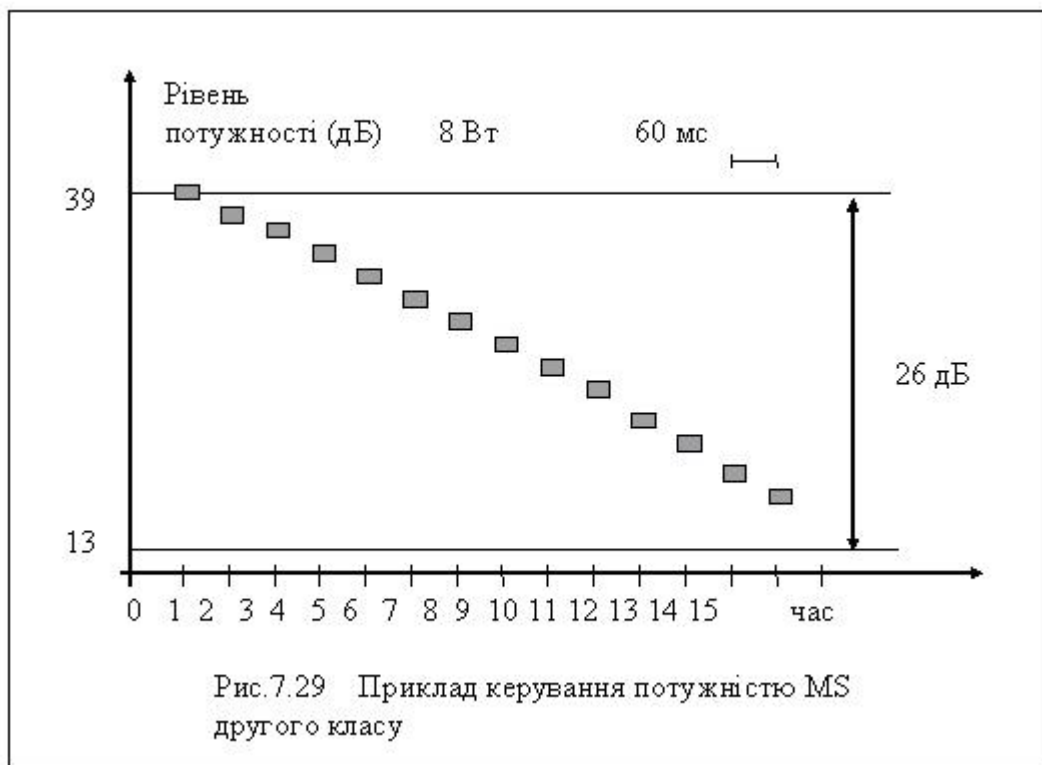
На рисунку 7.29 представлено приклад регулювання потужності передавача рухомої станції з класом потужності №2 при переході з великої комірки в малу. Рухома станція, що знаходиться на краю великої комірки, передає з максимальною потужністю. Після переходу в меншу комірку різко зменшується відстань між рухомою станцією і базовою, виникає необхідність зменшення рівня потужності рухомої станції. Потужність рухомої станції може бути регульована від максимальної величини (8 Вт для класу №2) до мінімальної 0.02 Вт (13 dBm). Регулювання потужності в обох напрямках відбувається незалежно один від одного. Подібно незалежно відбувається керування потужністю всіх рухомих станцій, що знаходяться в даній комірці.



Процедура керування потужністю вимагає від рухомої і базової станцій виконання вимірювань якості передачі під час тривання з'єднання. Базова

станція вимірює рівень потужності і рівень помилок прийнятого сигналу від даної рухомої станції, а рухома станція вимірює рівень потужності прийнятого сигналу з базової станції. На основі цього блок керування базової станції видає накази уточнення рівня сигналу передачі обох передавачів.

В перший момент появи рухомої станції в даній комірці або появи вимоги доступу, рухома станція передає з так званим вступним рівнем потужності (англ. initial power level). Величина вступного рівня потужності для даної комірки передається в каналі BCCH. Рухома станція, максимальний рівень потужності якої лежить нижче вступного рівня, передає зі своєю максимальною потужністю. Процес встановлення вступного рівня потужності та подальше управління потужністю показано на рис. 7.30.



7.2.2.3. Передача з випередженням

Застосування методу часового ущільнення каналів TDMA для організації доступу до радіоканалу в системі GSM приводить до того, що кожна рухома станція веде передачу імпульсним способом, тобто передає тільки в коротких,

виділених їй часових інтервалах. Імпульсний спосіб роботи передавачів дозволяє уникнути взаємопроникнення до сусідніх часових інтервалів інших сигналів, що передаються на тій самій частоті. По мірі збільшення відстані між рухомою та базовою станціями інформація, що передається базовою станцією, надходить до рухомої станції з щораз більшим запізненням. Подібним є запізнення, з яким відповідь рухомої станції надходить до базової станції. Для прикладу, на рис. 7.31a представлено ситуацію, в якій рухома станція MS1 знаходиться далеко від базової станції BTS, а станція MS2 знаходиться дуже близько від базової станції. Легко зауважити, що синхронна передача інформації станціями MS1 і MS2 в своїх часових інтервалах приведе до накладання пакетів один на одного в базовій станції і неможливості їх розділу (рис. 7.31b). Щоб уникнути цих завад, пакет, генерований станцією MS1, потрібно передавати відповідно раніше, тобто з часовим випередженням (англ. timing advance) - рис. 7.31c. Потрібно додати, що віддалення станції MS від базової станції на кожні додаткові 1100 м приводить до того, що до приймача надходить сигнал з запізненням на один відступ модуляції. Воно дає уявлення про точність обчислення величини часового випередження, що вимагається.

Щоб обчислити величину часового випередження, яке вимагається, базова станція, приймаючи пакет доступу (логічний канал RACH), на початку процедури встановлення з'єднання вимірює часовий зсув між її власними пакетами і пакетом, прийнятим від рухомої станції і на цій основі обчислює на скільки часових інтервалів раніше рухома станція повинна передати свої пакети. Величина цього випередження передається рухомій станції в сигналізаційному каналі SACCH.

Часове випередження може коливатися в межах від 0 до 233 мкс. Цей діапазон є достатнім для комірок, радіус яких не перевищує 35 км.

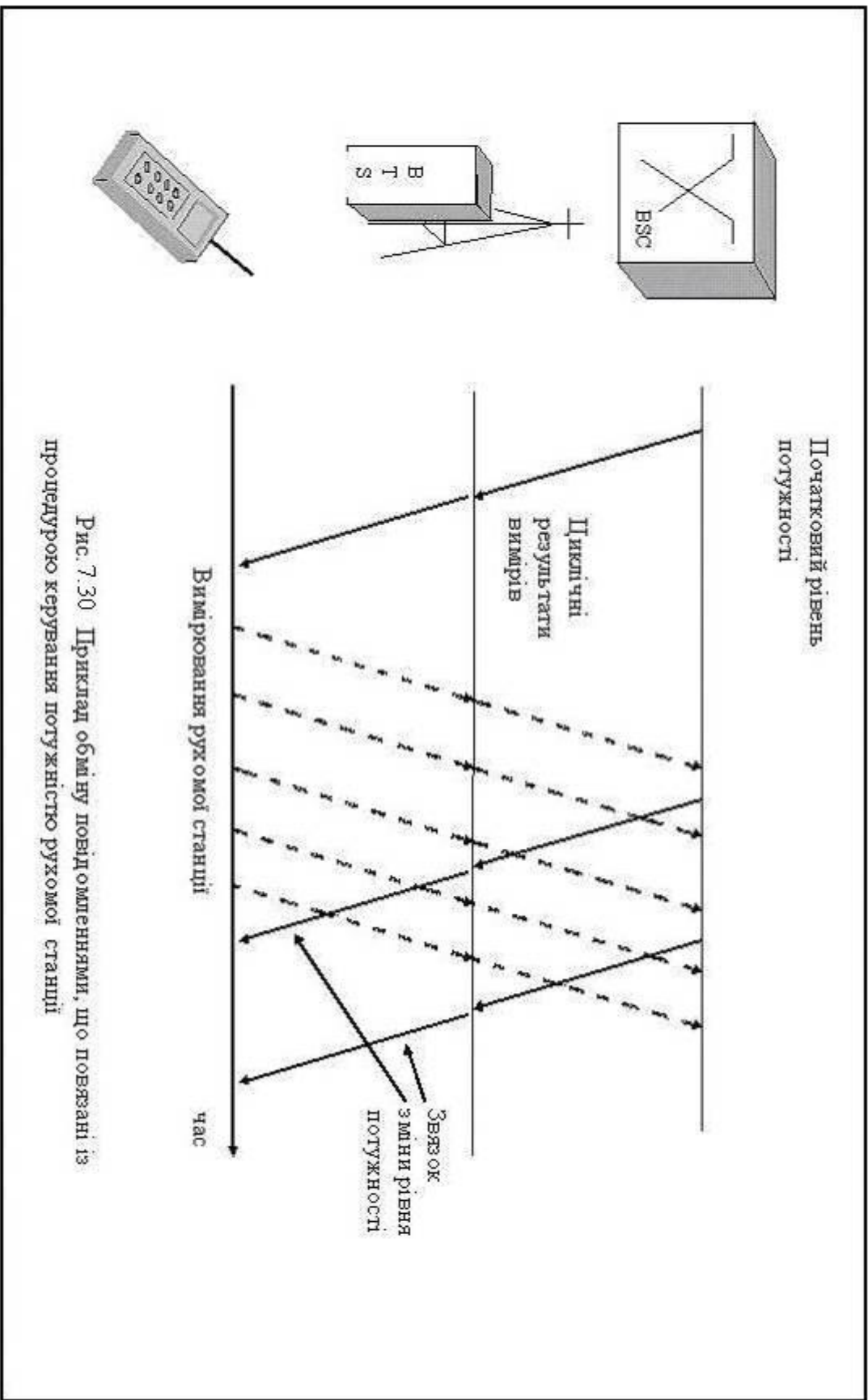


Рис. 7.30 Приклад обміну повідомленнями, що пов'язані із процедурою керування потужністю рухомої станції

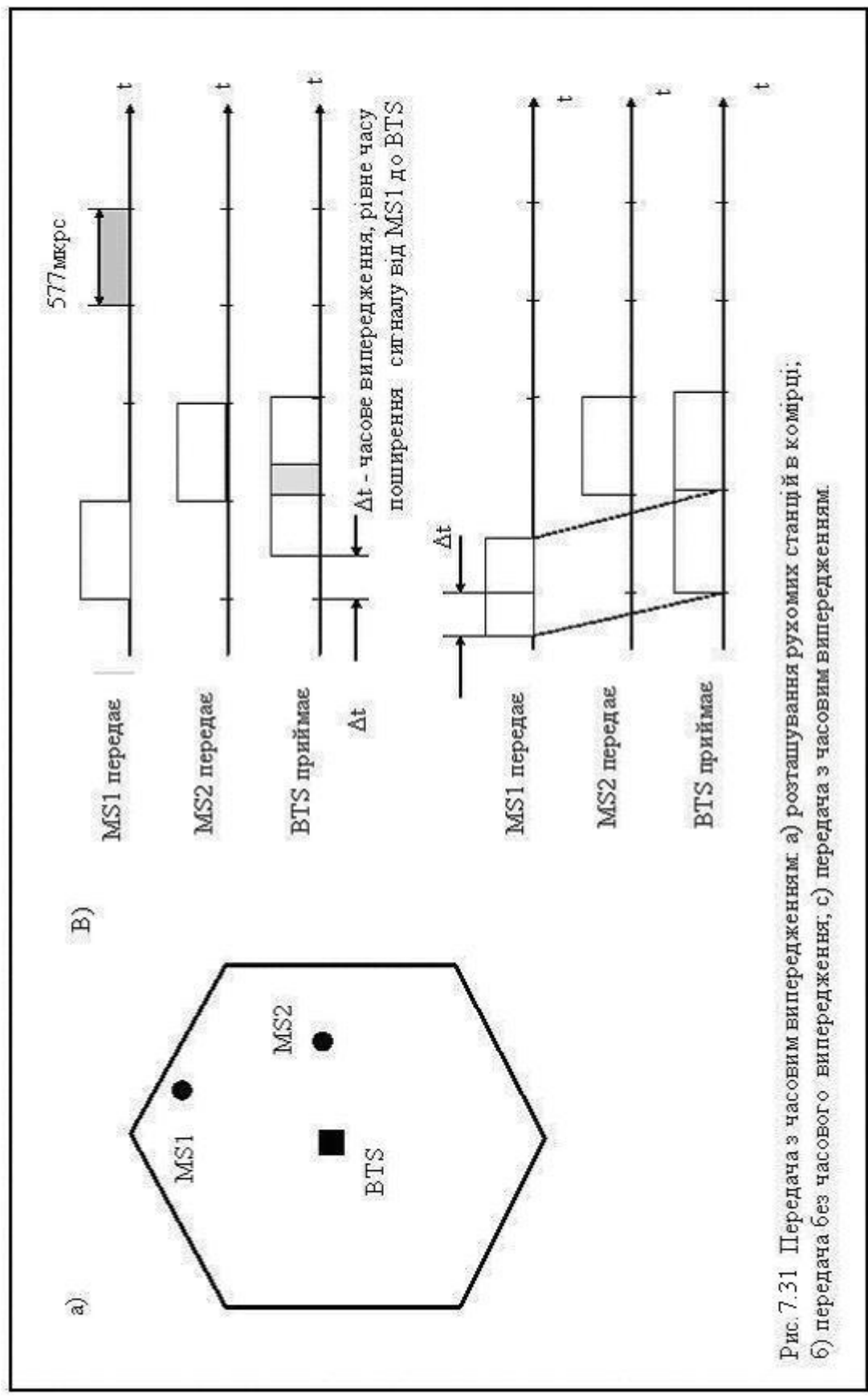


Рис. 7.31 Передача з часовим випередженням. а) розташування рухомих станцій в комірці; б) передача без часового випередження, с) передача з часовим випередженням.

7.2.2.4. Передача з перериванням

В системі GSM передача ведеться в повному дуплексі, тобто на час тривання з'єднання парі абонентів, що розмовляють, виділяються два однонаправлені канали. Ці канали використовуються неповністю, тому що типова передача сигналів мови заключається у змінній активності обох абонентів, тобто в моменти, коли абонент А є активним, абонент В є неактивним. Дослідження показали, що кожний з абонентів є активним в середньому на 40-50% від часу тривання з'єднання. Система GSM базується на комутації з'єднань і незалежно від активності абонентів з'єднання резервуються для них на весь час його тривання. Але є можливим зменшення кількості пакетів, що передаються в радіоканал в моменти, коли абонент є неактивним. Такий метод, що називається переривчастою передачею, або передачею з перериванням (англ. Discontinuous Transmission DTX). Це також дозволяє істотно обмежити інтерференцію в системі.

Введення переривчастої передачі DTX вимагає використання алгоритму, який би розрізняв активний стан від неактивного в сигналі мови даного абонента. Процедура викриття активності абонента (англ. Voice Activity Detection VAD) становить частину описаного в пункті 11.1.1 алгоритму кодування мови. В кожному циклі сигналу мови на виході кодера мови є один біт, який повідомляє чи цей цикл містить корисний сигнал мови, чи тільки шум фону (англ. comfort noise).

Принципи переривчастої трансмісії DTX представлено на рис. 7.32. В моменти активності абонента А передавач передає цикли сигналу мови з частотою 50 циклів/с. Якщо передавач сигналу розпізнає кілька циклів сигналу мови як такі, що містять шум, то він передасть тільки перший з них, а наступні тільки через кожні 480 мс, тобто приблизно два цикли/с, аж до моменту внесення активності абонентом А. Цикли, що містять параметри шуму фону, передаються в спеціальних циклах сигналу мови SID (англ. Silence Descriptor frames). Після прийняття циклу SID декодер мови в приймачі імітує тривалість з'єднання, генеруючи сигнал шуму. Це необхідно для того, щоб абонент В не

мав враження, що з'єднання перервано в моменти, коли абонент А мовчить і на фоні шуму оточення почув би цілковиту тишу.

7.2.3. Вимірювання, що проводяться рухомою станцією

Описуючи процедуру перемикання рухомої станції від однієї базової станції до іншої, було сказано, що одним з критеріїв, які використовуються при прийнятті рішення про перемикання каналів є результати вимірювань рівня і якості прийнятого сигналу, які виконуються рухомою станцією під час тривання з'єднання. Нижче описано дещо детальніше види і перебіг таких вимірювань.

•Активний стан.

В активному стані, тобто під час встановлення з'єднання, рухома станція виконує вимірювання потужності і якості сигналу “власної” базової станції, вимірює також потужність сигналу, прийнятого від сусідніх базових станцій. Рухома станція передає результати цих вимірювань в сигналізаційному каналі SACCH через базову станцію до блоку керування базових станцій BSC. На підставі цих вимірювань блок керування може видати наказ рухомій станції, наприклад, перемкнутись на канал іншої базової станції. Рапорти з результатами вимірювань генеруються рухомою станцією з частотою два повідомлення на секунду. Вимірювання сигналу “власної” базової станції відбувається під час прийому рухомою станцією інформаційного пакету від базової станції. Вимірювання, що стосуються сусідніх комірок, відбуваються в коротких відрізках часу, в яких рухома станція не виконує інші дії, тобто в перерві між прийманням і передачею в виділених часових інтервалах. Ця перерва триває приблизно 2 мс, тобто час тривання чотирьох часових інтервалів. Підчас тривання одного суперциклу, тобто 120 мс, рухома станція володіє 25-ма такими перервами та однією довшою, зв'язаною з невикористаним циклом TDMA в кінці суперциклу розмовних сигналів.

На рисунку 7.33 представлено цикл вимірювань рухомої станції; значення кроків циклу, позначених на рисунку цифрами (1)-(4), наступне:

(1) Рухома станція приймає сигнал від базової станції, вимірює його потужність та якість (вимірювання рівня помилок BER);

(2) Рухома станція передає (в цей час не виконує жодних вимірювань);

(3) В часовому інтервалі між передачею і трансмісією (4 часові інтервали, 2 мс) рухома станція вимірює потужність сигналу на спеціальній сигналізаційній частоті однієї з сусідніх базових станцій;

(4) Під час тривання одного невикористаного циклу TDMA в кінці суперциклу розмовних сигналів рухома станція синхронізується із спеціальною сигналізаційною частотою однієї з сусідніх базових станцій. Під час найближчої часової паузи між передачею і трансмісією, рухома станція вимірює потужність сигналу, прийнятого на тій самій частоті (3). Час, який рухома станція має на синхронізацію є дещо довший, ніж час тривання одного циклу TDMA, і становить 6.28 мс. В синхронізаційному каналі SACCH блок керування базових станцій BSC інформує рухома станцію про частоти, на яких вона повинна виконати вимірювання. Результати вимірювань в частині найсильніших сигналів разом з номерами BSIC відповідних базових станцій передаються в сигналізаційному каналі SACCH до блоку керування базових станцій BSC.

•Стан очікування.

Рухома станція починає виконувати вимірювання зразу ж після її ввімкнення в систему. Після ввімкнення, все ще знаходячись в стані очікування, рухома станція досліджує радіоканали системи GSM і вимірює середню потужність сигналу, прийнятого в кожному з них. Далі рухома станція настроюється на частоту сигналу з найбільшою потужністю і перевіряє чи це спеціальна сигналізаційна частота (англ. beacon frequency), тобто чи на цій частоті передається логічний канал корекції частоти FCCH (немодульована несуча). Якщо це не так, то перевіряється з цієї точки зору частота, на якій передається нижчий, щодо рівня, сигнал. Після знаходження спеціальної сигналізаційної частоти рухома станція виконує процедури синхронізації частоти, а далі синхронізації циклу.

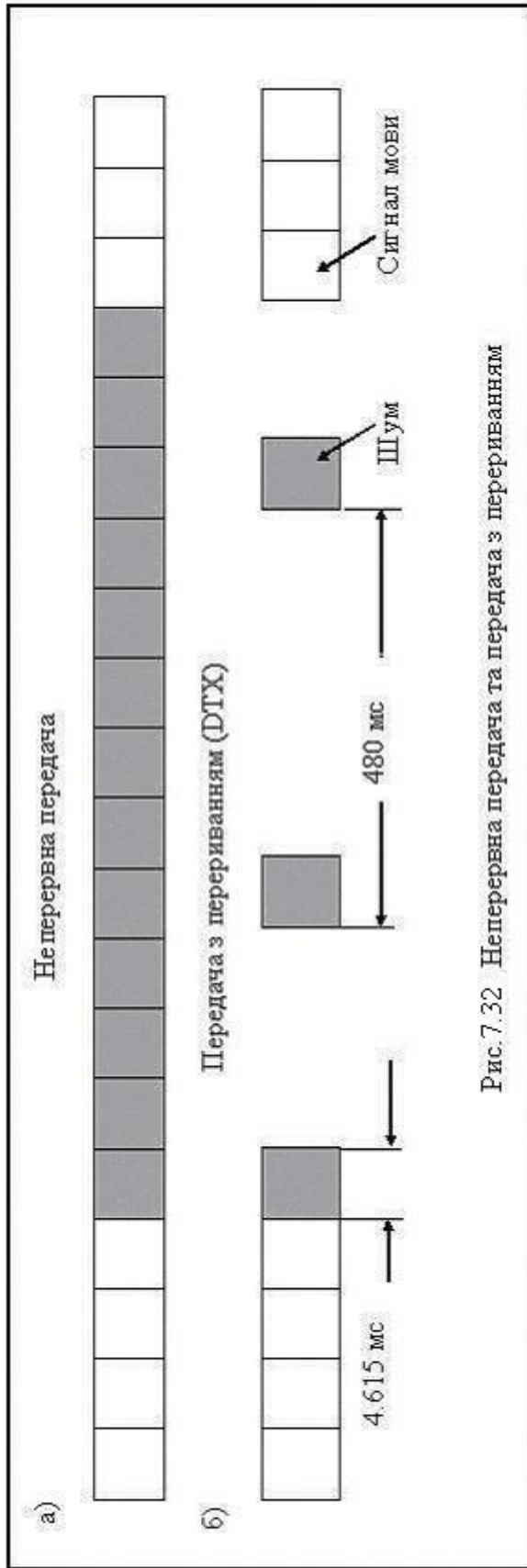


Рис. 7.32 Неперервна передача та передача з перериванням

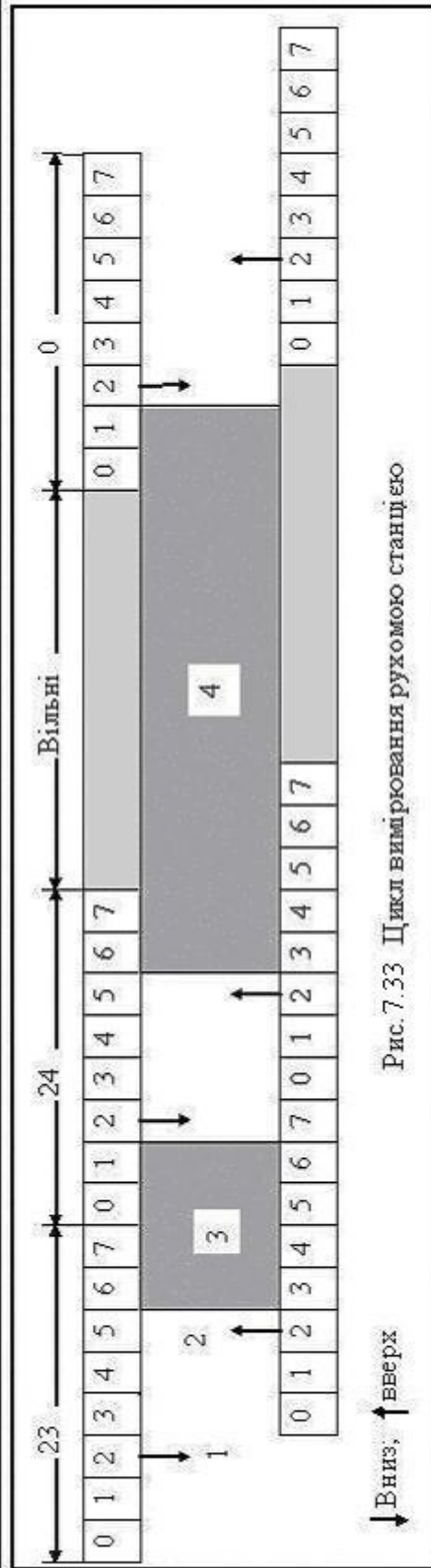


Рис. 7.33 Цикл вимірювання рухомою станцією

7.3. Протоколи та сигналізація

Сигналізаційна система являється дуже важливою частиною телекомунікаційної мережі. Система GSM, подібно як більшість сучасних телекомунікаційних систем, була запроектована в своїй сигналізаційній частині з використанням рівневої моделі ISO/OSI (International Standards Organisation/Open System Interconnection). Сигналізація між рухомою станцією та центральною станцією MSC системи GSM займає три найнижчі серед семи рівнів моделі ISO/OSI: фізичний рівень, рівень даних та мережевий рівень. Опис протоколів, які є в системі GSM важко зробити через те, що більша частина сигналізації системи GSM становить сигналізаційну систему №7 (SS7), описання якої виходить за рамки цього курсу. В кінці розділу описано загальне розташування та взаємодію окремих сигналізаційних протоколів, які є в системі GSM, як в частині, специфічній для системи GSM, так і в частині, що відповідає стандартній системі SS7.

7.3.1. Система GSM, як реалізація моделі ISO/OSI

Створюючи нову телекомунікаційну систему загальносвітового масштабу, проєктанти системи GSM використали для її побудови раніше створені процедури та сигналізаційні інтерфейси, перевірені вже на практиці. Ці процедури та інтерфейси були модифіковані так, щоб вони краще відповідали специфічним умовам безпроводного зв'язку.

В комутаційно-мережній частині системи GSM окремі елементи взаємодіють між собою за допомогою сигналізаційної системи №7 SS7 (англ. Signalling System No.7). Сигналізаційна система №7, що використовується також в мережах ISDN, була затверджена в ССІТТ, як система сигналізації, що передбачена для використання в стаціонарних телекомунікаційних мережах. Використання системи SS7 в умовах рухомої радіокомунікації вимагало розширення її модулями, пристосованими до рухомих станцій, що змінюють своє положення в системі. Наприклад, створено зовсім новий модуль MAP (англ. Mobile Application Part). Таким чином побудована система SS7 дозволяє

обмінюватися сигналізаційними повідомленнями між усіма елементами мережі GSM: комутаційними станціями MSC, базами даних VLN і HLR, центром ідентифікації AuC та рухомими станціями MS.

Складність системи безпроводного зв'язку, що пов'язана зі зміною положення рухомої станції, приводить до того, що кількість сигналізаційної інформації, яка передається в мережі GSM, значно більша, ніж в звичайних телекомунікаційних мережах.

Одним з методів, що широко використовуються для опису складної сигналізаційної системи є семирівнева модель ISO/OSI. Ця модель ділить функції відкритих телекомунікаційних систем на сім груп (табл. 7.7). Найнижчий рівень відповідає за передачу інформації між елементами телекомунікаційної системи, опираючись на фізичному трансмісійному каналі. Рухаючись вгору по таблиці 7.7, разом з наступними рівнями віддаляємось від фізичного каналу, збільшуючи поступово рівень абстракції. Процеси, що відбуваються на окремих рівнях системи, мають різний час тривання: від мікросекунд на першому рівні (час тривання одного біта) до років, якщо дивитись на функціонування системи в цілому.

Таблиця 7.7 Рівні, відносно моделі ISO/OSI

№	Рівень	
7	прикладний	(англ. <i>Application layer</i>)
6	презентаційний	(англ. <i>Presentation layer</i>)
5	сесійний	(англ. <i>Session layer</i>)
4	транспортний	(англ. <i>Transport layer</i>)
3	мережний	(англ. <i>Network layer</i>)
2	даних	(англ. <i>Data link layer</i>)
1	фізичний	(англ. <i>Physical layer</i>)

Семирівнева модель ISO/OSI дозволяє представити телекомунікаційну систему в двохвимірному просторі (рис. 7.34). На рисунку 7.34 вертикальні

блоки представляють фізичні модулі системи (наприклад, базова станція, центральна станція MSC та інше). Рівневі площини відповідають згрупованим функціям цих модулів. Кожна площина користується послугами сусідньої нижчої площини, розширює їх і надає сусідній вищій площині. Реалізація послуг відбувається завдяки взаємодії модулів телекомунікаційної системи на рівні площин, що відповідають одна одній (площини на рис. 7.34). Взаємодія модулів полягає в обміні інформацією. Принципи цього обміну описані в сигналізаційних протоколах. Існують протоколи, за допомогою яких відбувається обмін рівневою інформацією між модулями в межах тієї самої площини (англ. peer-to-peer protocol), а також протоколи обміну інформацією між площинами в межах того самого модуля.

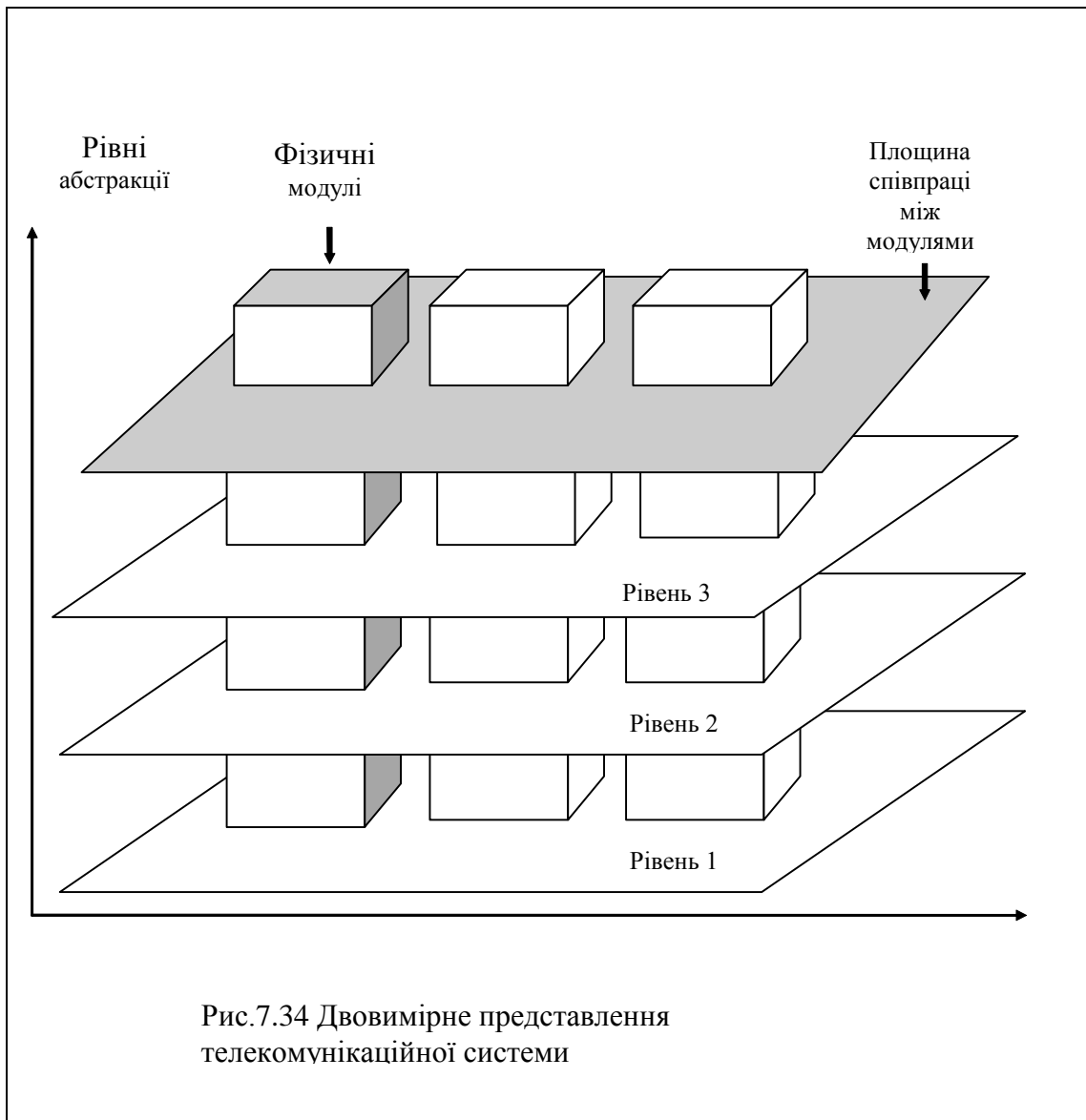
Важливу роль в організації телекомунікаційної системи відіграють інтерфейси, тобто нормалізовані місця стику двох пристроїв (напр. радіоінтерфейс в системі GSM). Той самий інтерфейс дозволяє обмінюватись інформацією, використовуючи кілька протоколів, наприклад, радіоінтерфейс в системі GSM дозволяє обмінюватись інформацією між рухомою станцією та базовою, але також між рухомою станцією і блоком керування базовими станціями, між рухомою станцією і комутаційною станцією MSC та між рухомою станцією і реєстром HLR (рис. 7.35).

В системі GSM обмін інформацією між рухомою станцією і комутаційною станцією MSC займає три найнижчі рівні моделі ISO/OSI (рівні від 1 до 3). Ці рівні будуть описані нижче.

7.3.2. Фізичний рівень

Найнижчим рівнем в моделі ISO/OSI є фізичний рівень (англ. Physical layer). Цей рівень стосується традиційно зрозумілих трансмісійних аспектів телекомунікаційної системи. В системі GSM фізичний рівень охоплює всі методи, які дозволяють передавати сигнали між передавачем і приймачем через радіоканал типу: ущільнення, каналне кодування, переплітання, модуляція, синхронізація, керування потужністю і т.п. Перший рівень в GSM надає вищим

рівням фізичні канали та організовує і керує логічними каналами, які розташовуються в фізичних каналах.



7.3.3. Рівень даних

Сигналізаційна інформація має вигляд повідомлень. Основним завданням другого рівня моделі ISO/OSI, так званого рівня даних (англ. Data link layer), є окреслення структури пакетів, в яких передаються сигналізаційні повідомлення. Крім того, другий рівень моделі ISO/OSI повинен забезпечити низький рівень невикритих помилок.

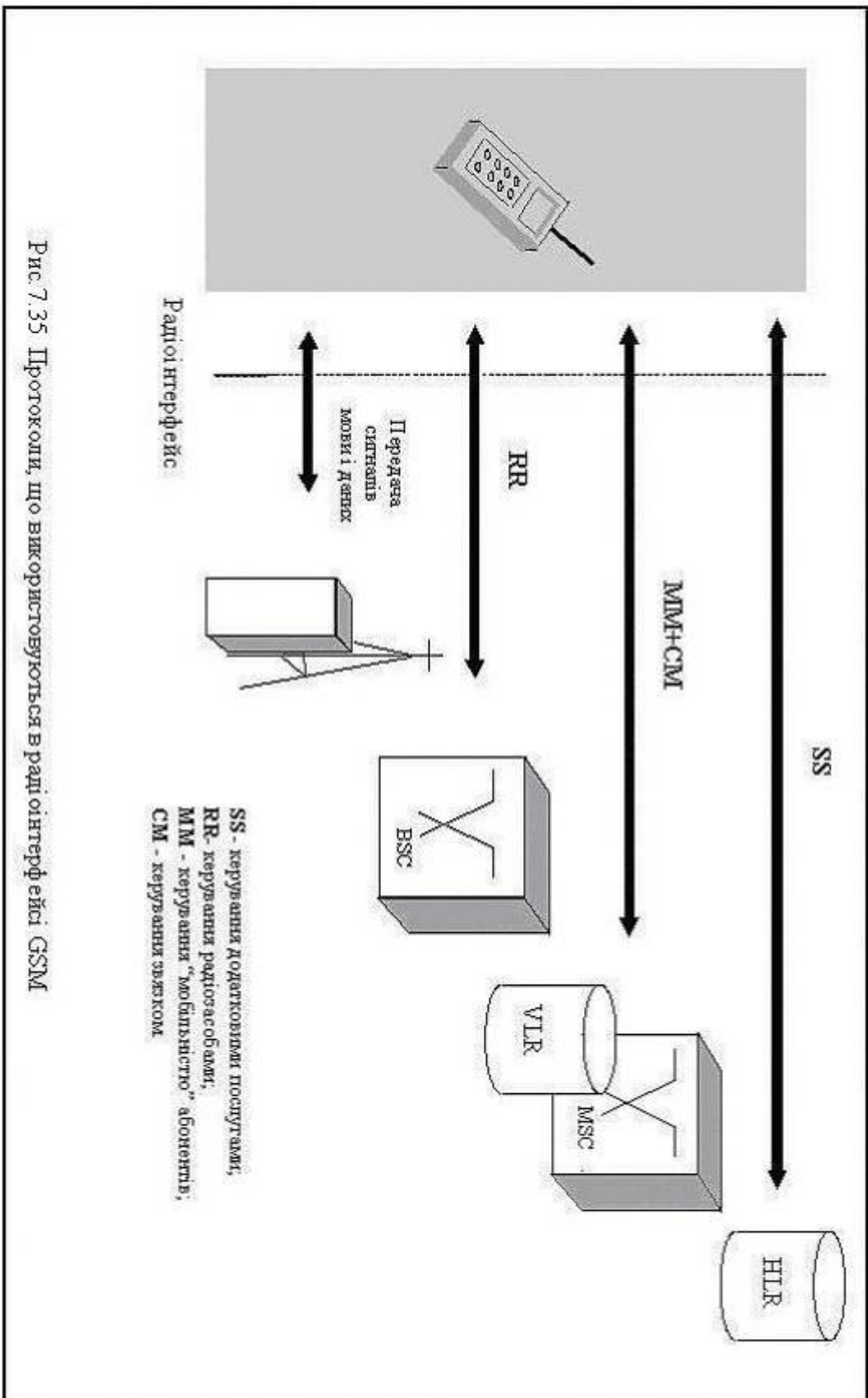


Рис. 7.35 Протоколи, що використовуються в радіоінтерфейсі GSM

У випадку передачі сигналізаційних повідомлень підвищення рівня невикритих помилок приведе до дуже небажаних результатів. Помилка може змінити значення повідомлення і привести до помилкової реакції системи.

В системі GSM протоколи рівня даних моделі ISO/OSI виконують наступні функції:

- організація сигналізаційної інформації мережного рівня (третій рівень) в цикловій структурі;
- рівнева трансмісія (англ. Peer-to-peer) сигналізаційної інформації та розпізнавання форматів циклів;
- встановлення, контроль і роз'єднання з'єднань в сигналізаційних каналах;
- підтвердження передачі і прийому, так званих, нумерованих сигналізаційних циклів, тобто циклів типу **I** (англ. I-frame, I:numbered Information);
- передача без підтвердження та прийом нумерованих сигналізаційних циклів, так званих, циклів тилу **UI** (англ. UI-frame, UI:Unnumbered Information).

На другому рівні системи GSM використовуються кілька протоколів, в залежності від типу інтерфейсу (таблиця 7.8). Протокол MTP (англ. Message Transfer Part), взятий без жодних змін з сигналізаційної системи SS7, використовується в інтерфейсі A (лінії BSC-MSC) системи GSM. Адаптований для потреб системи GSM протокол LAPD (англ. Link Access Protocol), що застосовується в мережі ISDN для каналу типу «D», використовується в інтерфейсі A-bis між базовою станцією та блоком керування базових станцій. Протокол LAPDm (англ. LAPD-mobile) є специфічною версією протоколу LAPD для системи GSM і використовується для обміну сигналізаційною інформацією між базовою станцією та рухомою через радіоінтерфейс.

Одним з важливих завдань другого рівня моделі ISO/OSI є розташування сигналізаційних повідомлень третього рівня в структурах, які передаються далі

по сигналізаційних лініях. Повідомлення передаються у вигляді циклів. Нижче коротко опишемо утворення циклів повідомлень в протоколах LAPD і MTP, тому що ці протоколи – це типові протоколи, які використовуються в стаціонарній мережі ISDN. Дещо детальніше буде описане утворення циклів в протоколі LAPDm, який не використовується в стаціонарних мережах.

Протоколи LAPD та MTP використовують алгоритм утворення циклів, що застосовується в протоколі HDLC (рис. 7.36). Цикл HDLC (High level Data Link Control) має змінну довжину. На початку і в кінці циклу знаходиться 8-бітовий так званий значник початку/кінця циклу. Використання абл. ляю дозволяє передавати цикли різної довжини, не вказуючи їх актуальну довжину.

В протоколі LAPDm не використовуються позначники початку і кінця циклу, але цикли можуть бути різної довжини. Сигналізаційна інформація містить максимально 184 біти, тобто 23 байти. Ці біти спочатку піддаються процедурі захисту від помилок в каналному кодері, що приводить до збільшення їх кількості до 456 бітів і відповідає ємності чотирьох часових інтервалів. Спосіб каналного кодування однаковий для сигналізаційних каналів: BCCH, PCN, AGCH, SDCCH або SACCH. Повідомлення, що передаються в сигналізаційних каналах SCH і RACH кодуються по-іншому, а канал корекції частоти FCCH не вимагає кодування. Отже, сигналізаційний цикл протоколу LAPDm, з максимальною ємністю 23 інформаційні байти, передається по-порядку в чотирьох циклах TDMA (цьому відповідає і розташування сигналізаційних каналів BCCH, CCCH, SDCCH і SACCH в IV і V комбінаціях логічних каналів.

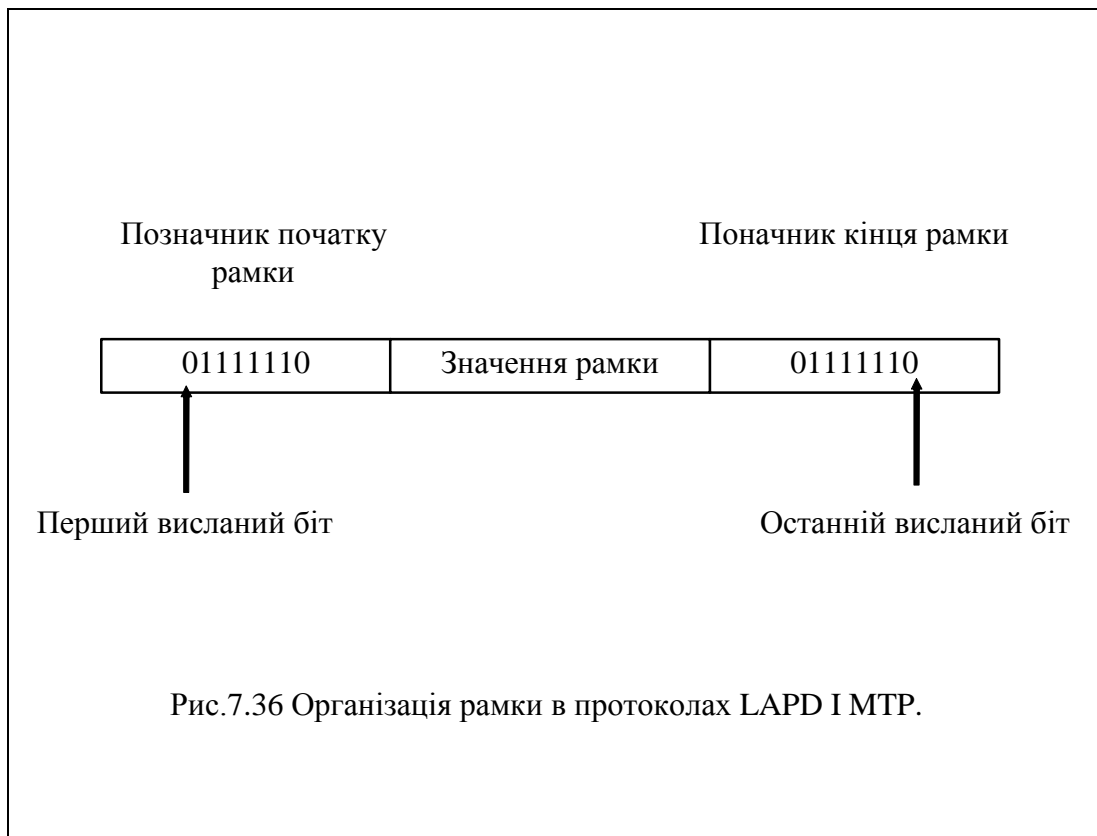
Протокол LAPDm використовує чотири формати циклів: А, В, А-bis і В-bis. Цикл формату А використовується в спеціальних каналах SDCCH і FACCH. В ній знаходиться адресне поле, поле керування. Показник довжини та доповнюючі біти (рис. 7.37а). Всі поля, за винятком однобайтового поля керування, можуть мати змінну довжину (штрихові лінії на рисунку 7.37). Цикл формату А не містить інформаційних бітів, а заповнений доповнюючими бітами (англ. Fill bits). Цикл цього формату використовується у випадку, коли

сигналізаційне з'єднання повинно бути утримане, якщо в даний момент не має сигналізаційних повідомлень для передачі. Наприклад, якщо третій рівень в фізичному модулі, який якраз прийняв сигналізаційне повідомлення, ще не передав другому рівню повідомлення (відповідь) для передачі, то з метою утримання сигналізаційного з'єднання, фізичний модуль надішле до свого "розмовляючого" цикл формату А.

Коли в сигналізаційному каналі повинна бути передана корисна інформація, то використовують цикл формату В (рис. 7.37b). Порівняно з форматом А, формат В має поле для інформаційних бітів. Сигналізаційний цикл формату В називається циклом типу І (англ. i-frame, I: numbered Information). Цикли типу І передаються в режимі з підтвердженням (англ. acknowledged mode), що означає, що цикли по черзі нумеруються в передавачі, а потім рахуються з приймальної сторони для того, щоб впевнитись, що жодний цикл не втрачено (для цієї операції використовується поле керування). В приймачі перевіряється, чи послідовність прийняття циклів є правильною. Після правильного прийому циклу типу І приймач надсилає в зворотньому каналі до передавача підтвердження. Сигнали підтвердження також мають формат циклу А або В.

Таблиця 7.8 Протоколи другого рівня, що використовуються в окремих інтерфейсах системи GSM

Інтерфейс	Протокол	Примітки
MS-BTS	LAPDm	специфічний для GSM
BTS-BSC	LAPD	типовий для ISDN
BSC-MSC	MTP	типовий для ISDN



Принцип передачі з підтвердженням означає, що передавач повинен пам'ятати цикли, які вже передані, але щодо яких він ще не має певності, що вони правильно прийняті. Цикли, прийняті з помилками або втрачені, передаються в каналі ще раз. Передавач повинен мати буферну пам'ять, необхідну для зберігання непідтверджених циклів. З метою обмеження об'єму пам'яті в системі встановлюють максимальну кількість циклів, які потрібно запам'ятати після їх передачі, але, які ще не підтверджені в передавачі.

Взятий з протоколу HDLC спосіб передачі з підтвердженням використовується також в інших протоколах другого рівня (LAPD і MTP). В протоколі LAPD (також в LAPDm) приймач надсилає до передавача номер наступного циклу, який повинен до нього прийти, а в протоколі MTP до передавача надсилається номер останнього правильно прийнятого циклу. Механізм передачі з підтвердженням для протоколу LAPD показано на рисунку 7.38.

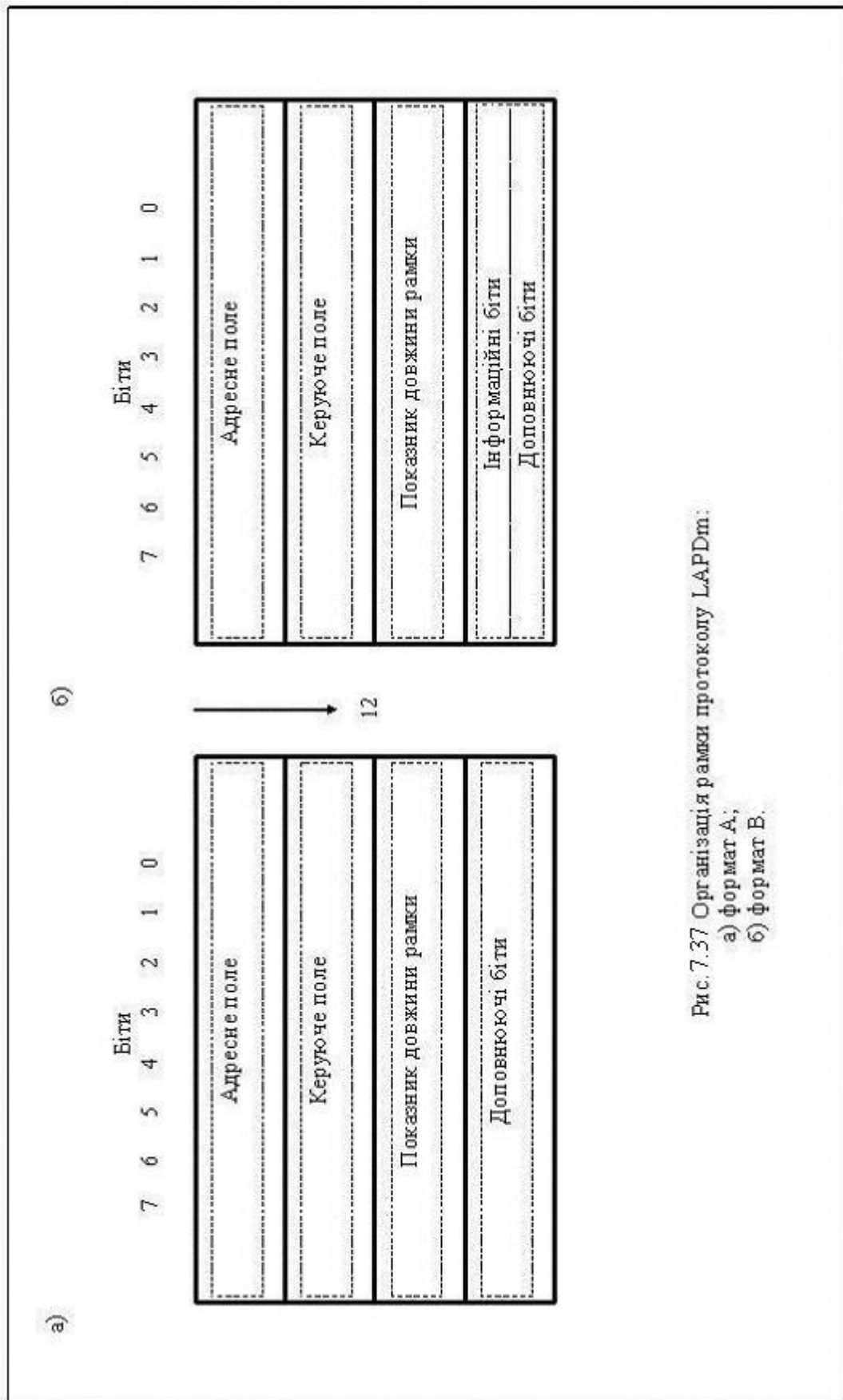


Рис. 7.37 Організація рамки протоколу LACPm:

а) формат А;

б) формат В.

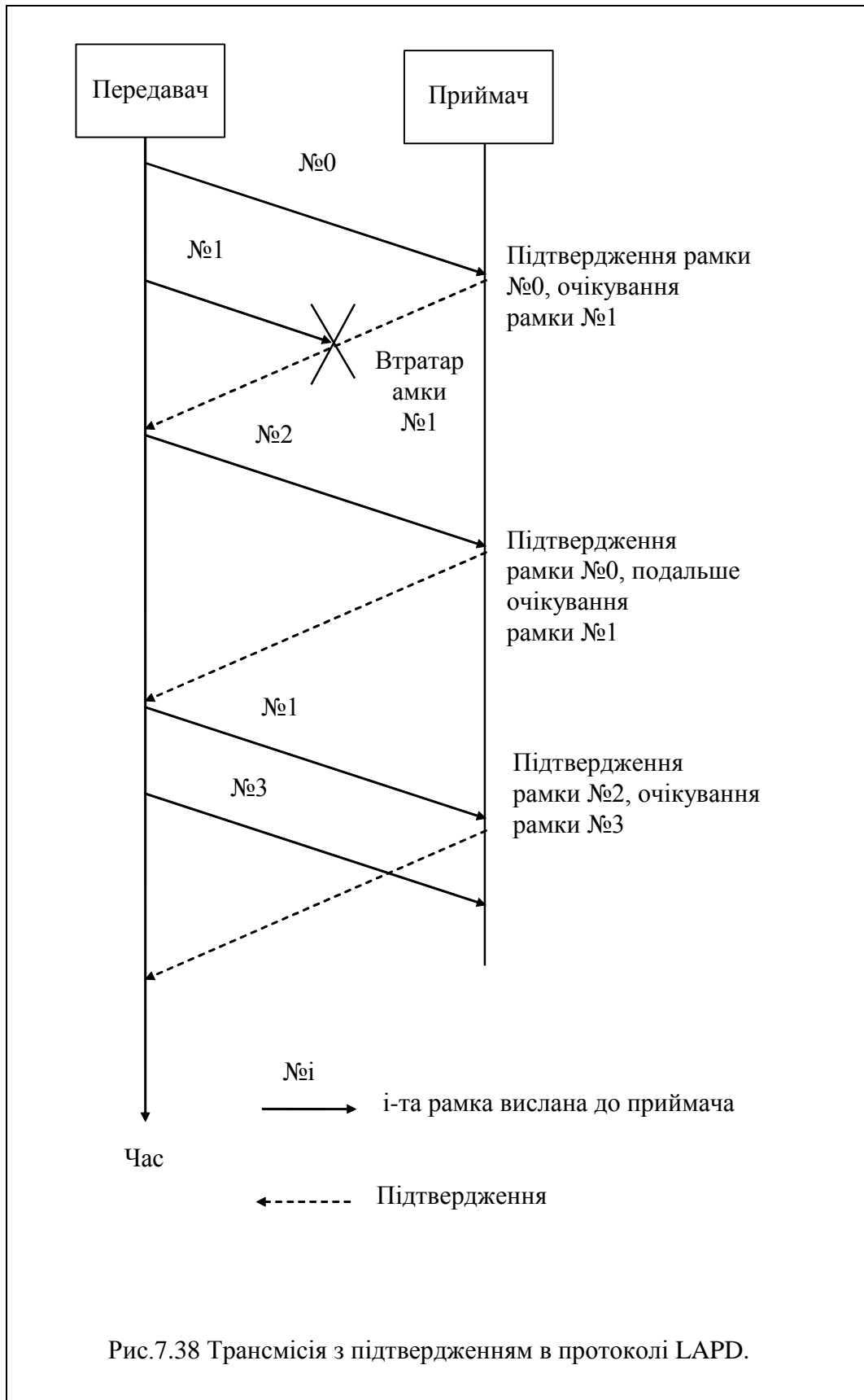


Рис.7.38 Трансмісія з підтвердженням в протоколі LAPD.

Формати циклів типу A-bis і B-bis - це формати, що аналогічні, відповідно, до форматів A і B, але їх використовують для передачі в режимі без підтвердження (англ. unacknowledged mode). В циклах типу A-bis і B-bis немає поля керування і їх структура така ж, як і структура циклів A і B, представлених вище. Режим без підтвердження використовується в спільних логічних каналах, які несуть інформацію тільки в напрямку від базової станції до багатьох рухомих станцій одночасно, таких як сигналізаційні канали: виділення лінії AGCH, викличний RCH, розсіюючий BCCH. Режим без підтвердження використовується також при циклічній передачі результатів вимірювань від рухомої станції до базової. У випадку втрати одного рапорту вигідніше почекати на наступні, уточнені результати вимірювань, ніж вимагати ретрансмісії втраченого повідомлення. Сигналізаційні цикли передані в режимі без підтвердження носять назву циклів типу UI (англ. UI-frame, UI: Unnumbered Information).

До функцій, які виконує другий рівень моделі ISO/OSI, належить також функція розпізнавання помилок в прийнятих сигналізаційних циклах. Протоколи LAPD та MTP використовують для викриття помилок. Механізм взятий з протоколу HDLC. До кожного циклу додається 16 захисних бітів (англ. Frame Check Sequence FCS). Протокол LAPDm дозволяє викривати спотворені цикли, користуючись кодами, що захищають від помилок і застосовуються на фізичному рівні радіоінтерфейсу системи GSM.

Викриття помилок має дві мети. По-перше, в режимі передачі з підтвердженням можна вимагати поновної передачі спотвореного циклу. По-друге, дозволяє контролювати якість з'єднання і генерувати тривогу у випадках, коли якість передачі стане нижче допустимого рівня. В сигналізаційній системі SS7, типово, сигналізаційні з'єднання вважаються поганими, якщо частота появи помилкових циклів перевищує 0,4%.

7.3.4. Мережевий рівень

Об'єм обміну сигналізаційною інформацією в системі GSM є дуже

великий. Отже, важливою задачею стає відповідна організація проходження інформації та вибір відповідного шляху для кожного повідомлення. Керування сигналізаційними повідомленнями належить до завдань третього рівня моделі ISO/OSI, так званого мережного рівня (англ. network layer). Третій рівень створює також види сигналізаційних повідомлень, які заповнюють описані вище цикли другого рівня. Функції мережного рівня поділені на три групи: керування радіозасобами, керування “рухливістю” абонентів та керування встановленням з'єднань. Кожна з цих трьох груп функцій створює протокол, відповідальний за виконання певного сегменту сигналізаційного завдання на мережному рівні системи GSM. Ці протоколи будуть по-порядку описані нижче. На рисунку 7.39 показано елементи системи GSM, які беруть участь в сигналізаційних процедурах окремих протоколів. Для порівняння показано також елементи системи, які беруть участь в передачі розмовних сигналів.

• **Керування радіозасобами - протокол RR** (англ. Radio Resource management). Завдання, що виконуються протоколом керування радіозасобами, є тісно пов'язані з фізичним рівнем системи GSM. В стаціонарних телекомунікаційних мережах немає відповідника цьому протоколу. Протокол RR відповідає за керування доступною смугою частот, за реакцію системи на зміну умов поширення в радіоканалі та за заповнення вільного радіоканалу з метою встановлення з'єднання між рухомою та базовою станціями. Для реалізації цих завдань використовуються наступні процедури системи:

- процедура виділення каналу;
- процедура звільнення каналу;
- процедури, що пов'язані зі зміною каналу і перемиканням до іншої базової станції;
- процедура скакання по частотах;
- передача результатів вимірювань рухомої станції;
- процедура керування потужністю і передачею з часовим випередженням;
- зміна режиму передачі (сигнали мови або передача даних);

- ввімкнення режиму шифрування передачі в радіоканалі.

Функції протоколу керування радіозасобами в основному виконуються в рухомій станції та блоці керування базовими станціями, за винятком процедури перемикання каналу, пов'язаної зі зміною зони дії комутаційної станції. В цьому випадку частина протоколу RR виконується в комутаційній станції MSC.

Керування “рухливістю” абонентів - протокол MM (англ. Mobility Management). Керування “рухливістю” абонентів охоплює функції, що пов'язані з ідентифікацією абонента, захистом переданої інформації та уточненням інформації про місце перебування рухомої станції. Для виконання цих функцій використовують наступні процедури:

- процедура уточнення інформації про місце перебування рухомої станції;
- реєстрації абонентів на певний термін;
- процедура ідентифікації абонента;
- процедура реєстрації рухомої станції після її ввімкнення;
- процедура скасування реєстрації рухомої станції після її вимкнення;
- процедура присвоєння тимчасового номера рухомому абоненту TMSI;
- процедура ідентифікації обладнання.

В процедурах, описаних вище, приймають участь: рухома станція (а перш за все ідентифікаційний модуль абонента SIM), реєстр власних станцій HLR, центр ідентифікації AuC та комутаційна станція разом з реєстром гостей станцій MSC/VLR. В процедурах протоколу керування “рухливістю” абонентів не беруть участі елементи ансамблю базових станцій, тобто ні базові станції BTS, ні блоки керування BSC.

• **Керування встановленням з'єднань - протокол CM** (англ. Communication Management). Керування встановленням з'єднань є тільки однією з функцій протоколу CM. Функції протоколу CM поділено на три групи:

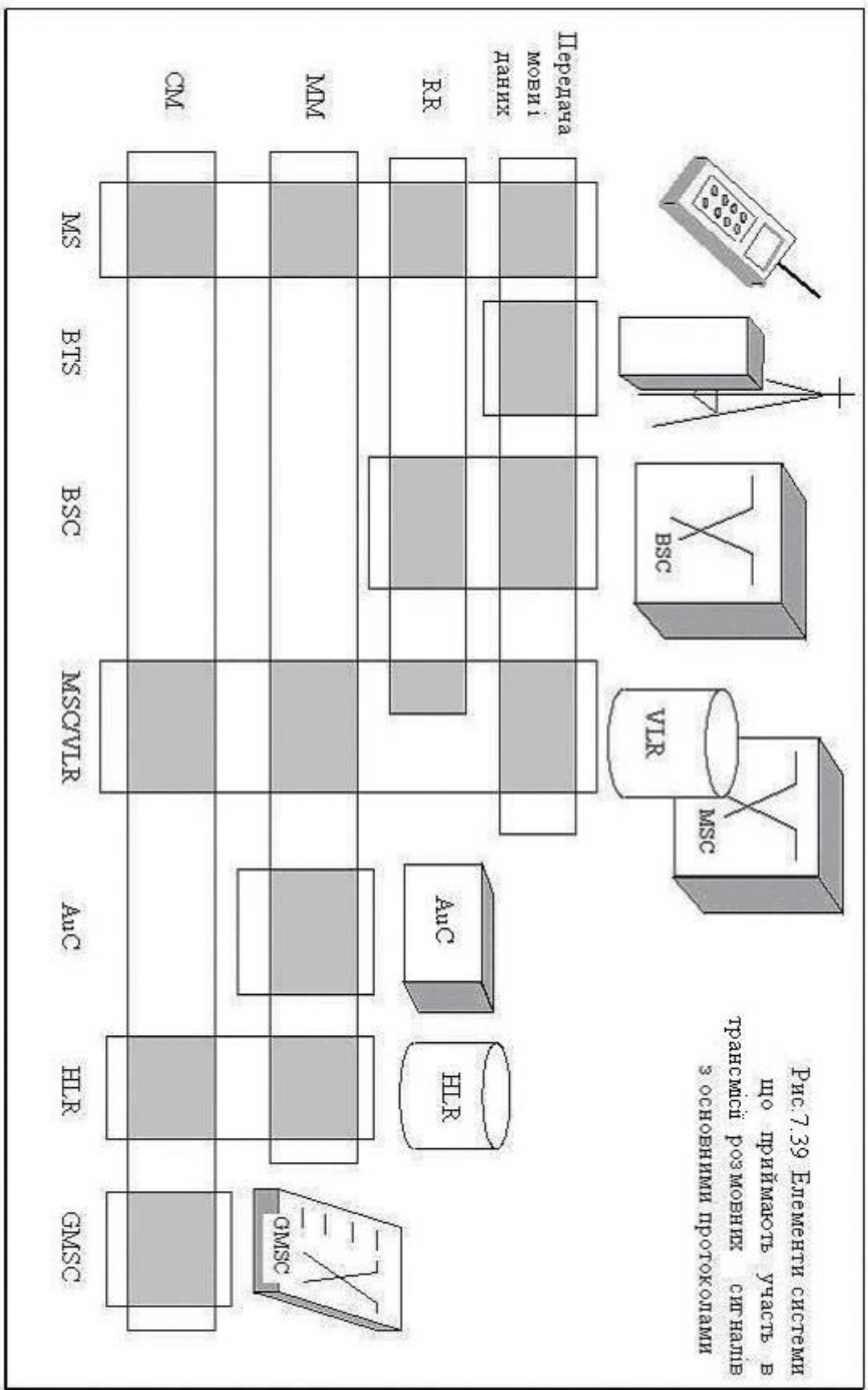


Рис. 7.39 Елементи системи що приймають участь в трансмісії розмовних сигналів з основними протоколами

- Керування з'єднаннями (англ. Call Control). Основним завданням цієї групи функцій є встановлення, контроль та звільнення з'єднань, генерованих рухомими абонентами, та з'єднань, адресованих до рухомих абонентів. Важливим завданням є також вибір відповідного з'єднувального шляху (система GSM користується послугами посередницьких мереж, наприклад, стаціонарної телефонної мережі ISDN), елементи мережі GSM, які приймають участь в керуванні з'єднаннями це: MSC/VLR, GMSC та HLR;

- Керування додатковими послугами (англ. Supplementary Services management SS). Додаткові послуги дозволяють абонентові в певній мірі впливати на те, яким способом система встановлює його з'єднання. В цих процедурах приймають участь тільки два елементи системи GSM: рухома станція MS та реєстр власних станцій HLR;

- Передача коротких повідомлень (англ. Short Message Services SMS). Ця група функцій протоколу SM пов'язана з виконанням послуги, яка полягає в передачі коротких текстових повідомлень (до 160 знаків). Рухома станція може як генерувати, так і приймати повідомлення.

Кожний з трьох протоколів мережного рівня представляє собою комплект сигналізаційних процедур, які полягають в обміні сигналізаційними повідомленнями між елементами системи GSM. Виконання певних процедур в певній послідовності створює сигналізаційну структуру. Наприклад, встановлення з'єднання рухомою станцією вимагає процедури виділення сигналізаційного каналу, ідентифікації користувача, ввімкнення режиму шифрування передачі та виділення розмовного каналу. Інформація, яка міститься в сигналізаційному повідомленні, встановлюється в інформаційне поле описаного раніше циклу другого рівня і в цьому вигляді передається по сигналізаційному з'єднанні.

Структуру повідомлень мережного рівня представлено на рисунку 7.40.

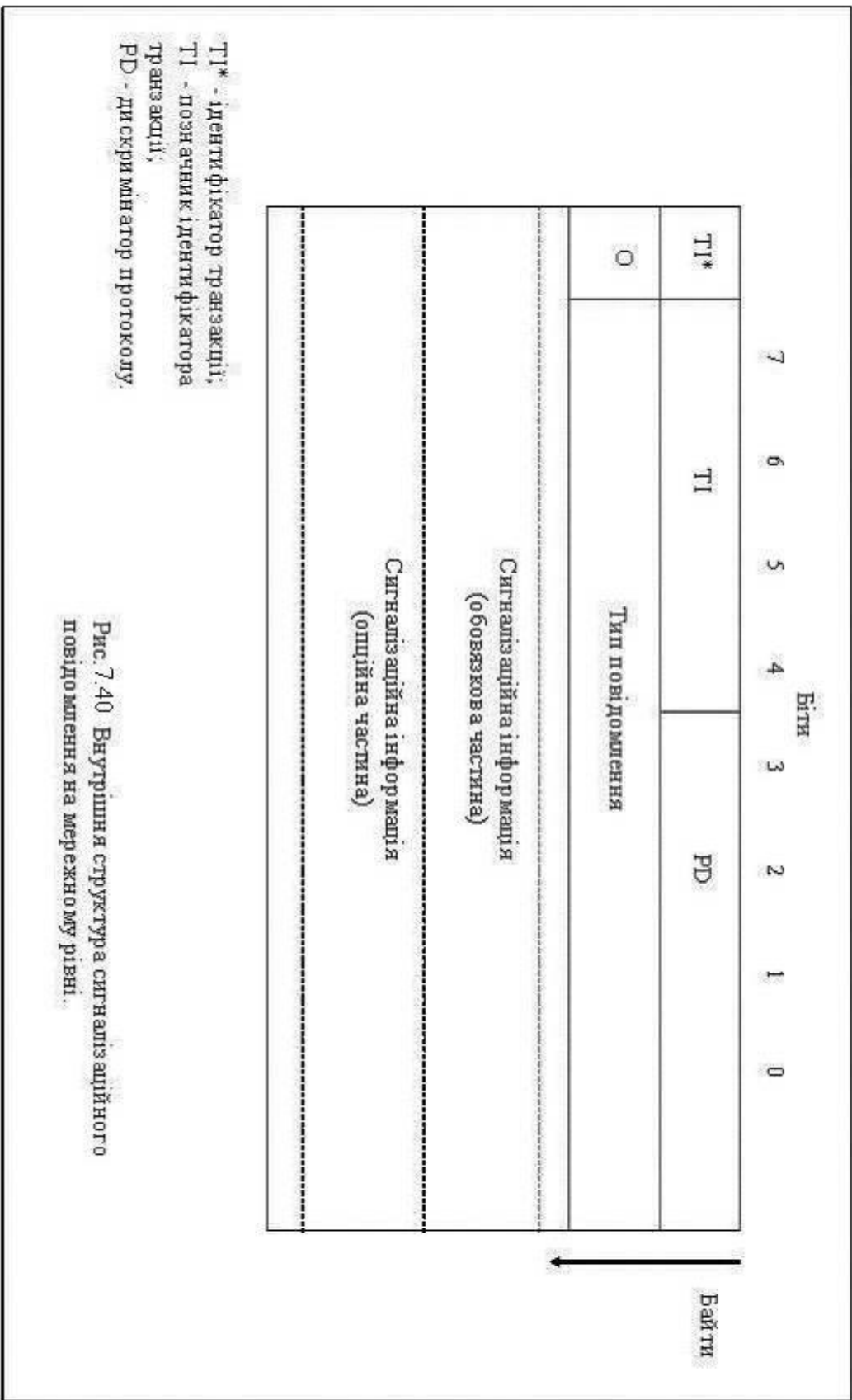


Рис. 7.40 Внутрішня структура сигналізаційного повідомлення на мережному рівні.

В ідентифікаторі режиму транзакції TI (англ. Transactions Identifier) знаходиться закодоване позначення виконаної транзакції протоколу CM, однобітовий позначник TI, який вказує власника повідомлення (“0” означає, що повідомлення вислане ініціатором транзакції, “1” означає, що повідомлення від іншого абонента). В полі дискримінатора протоколу PD (англ. Protocol Discriminator) є записане позначення одного з описаних протоколів мережного рівня, до якого належить передане повідомлення.

Наступне поле повідомлення, представленого на рис. 7.40, містить окреслення типу повідомлення в даному протоколі. В інших двох полях на рисунку 7.40 знаходиться інформаційна частина повідомлення, поділена на обов'язкову частину та опційну. Окремі повідомлення можуть бути різної довжини. Довжина кожного повідомлення вказана в полі “тип повідомлення”.

7.3.5. Загальна архітектура сигналізації в системі GSM

В попередніх частинах розділу вже описано завдання фізичного рівня системи GSM, сигналізаційні протоколи, які використовуються на рівні даних: LAPDm, LAPD, MTP та сигналізаційні протоколи мережного рівня: RR, MM, CM.

На рисунку 7.41 представлено загальну схему сигналізації в системі GSM. Вертикальні лінії означають три стандартні інтерфейси системи: радіоінтерфейс, інтерфейс A-bis та інтерфейс A. Інтерфейси з'єднують між собою окремі елементи системи: рухому станцію, базову станцію, блок керування базовими станціями та комутаційні станції. В горизонтальному напрямку, починаючи з фізичного рівня, найнижчого, показано рівні системи GSM відносно моделі ISO/OSI. Прямокутники на рисунку представляють протоколи окремих рівнів, які по черзі виконуються в інтерфейсах системи.

Крім описаних вище протоколів другого і третього рівнів на рисунку 7.41 показані також два протоколи, що пов'язані з керуванням системою базових станцій: BTSM і BSSAP.

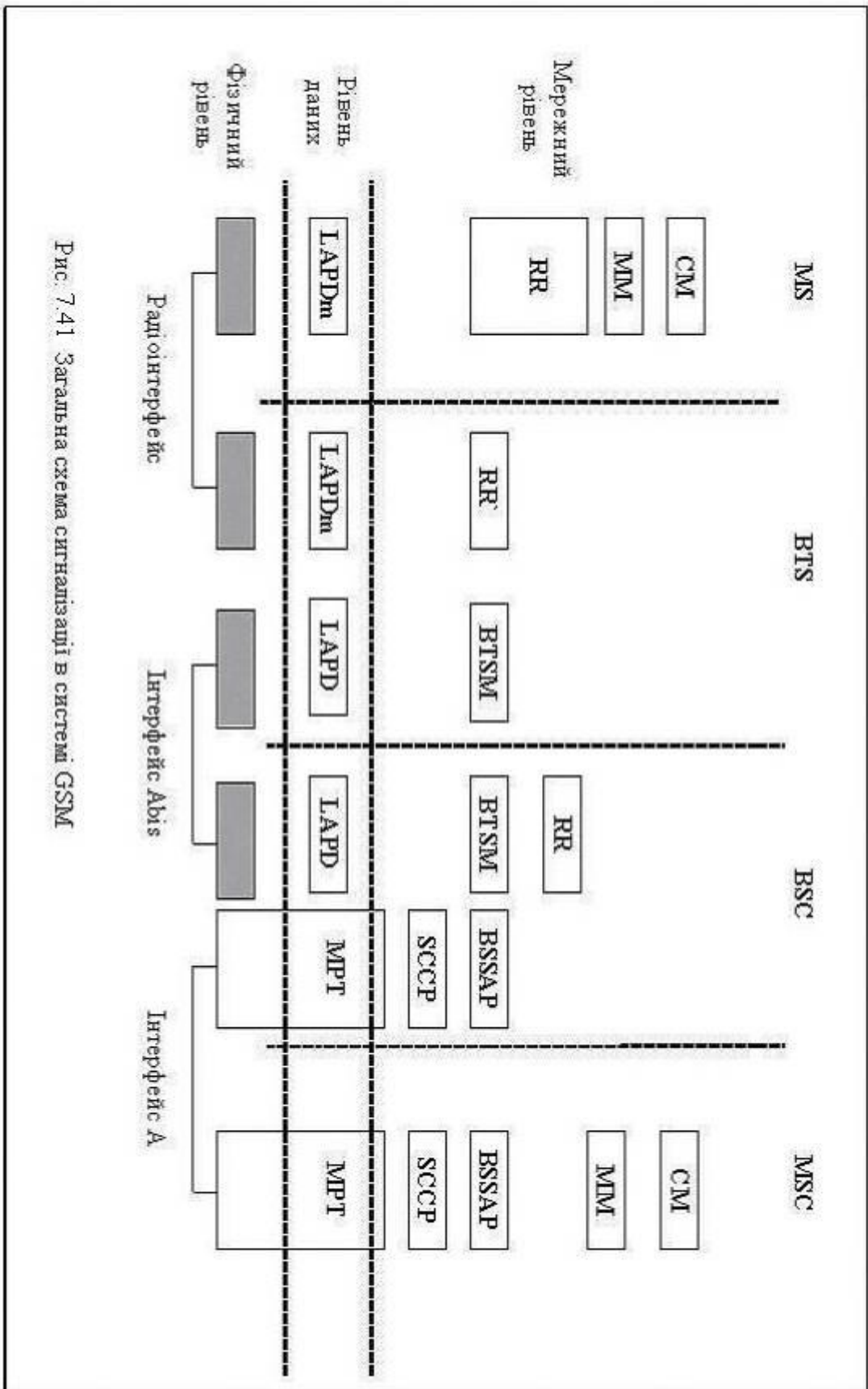


Рис. 7.41 Загальна схема сигналізації в системі GSM

Протокол BTSM (англ. Base Transceiver Station Management) дозволяє блоку керування базовими станціями BSC керувати базовими станціями, протокол BSSAP (англ. Base Station Subsystem Application Part) використовується комутаційною станцією MSC для керування системою підлеглих їй базових станцій.

Протокол BSSAP використовує протоколи сигналізаційної системи SS7: MTP і SCCP. Протокол SCCP (англ. Signalling Connection Control Part) відповідає за скерування повідомлень в сигналізаційну мережу №7. Протокол другого рівня MTP був описаний в пункті 7.3.3.

Блок RR' на рисунку 7.41 містить частину функцій керування радіозасобами (протокол RR), які виконує базова станція, тобто керування: передачею з часовим випередженням, потужністю, шифруванням передачі. Друга половина протоколу RR виконується в рухомій станції і в блоці керування базовими станціями. Функції, що пов'язані з керуванням “рухливістю” абонентів (MM) та з керуванням встановлення з'єднань (CM) виконуються виключно в базовій станції та комутаційній станції MSC. Елементи ансамблю базових станцій є для них “прозорі”, тобто вони є транзитними для передачі сигналізаційної інформації при використанні власних протоколів другого рівня та механізмів першого рівня.

На рисунку 7.42 представлено протоколи, які використовуються в сигналізації між комутаційною станцією MSC і реєстрами VLR і HLR. Сигналізація, що не зв'язана з розмовою, міститься в кількох різних протоколах, об'єднаних під назвою MAP (англ. Mobile Application Part). Протокол MAP описує також і обмін сигналізаційною інформацією в випадку перемикання каналів між двома комутаційними станціями MSC, обмін інформацією між комутаційною станцією MSC та реєстрами VLR, HLR і EIR, а також обмін сигналізаційною інформацією між реєстром HLR і комутаційною станцією GMSC.

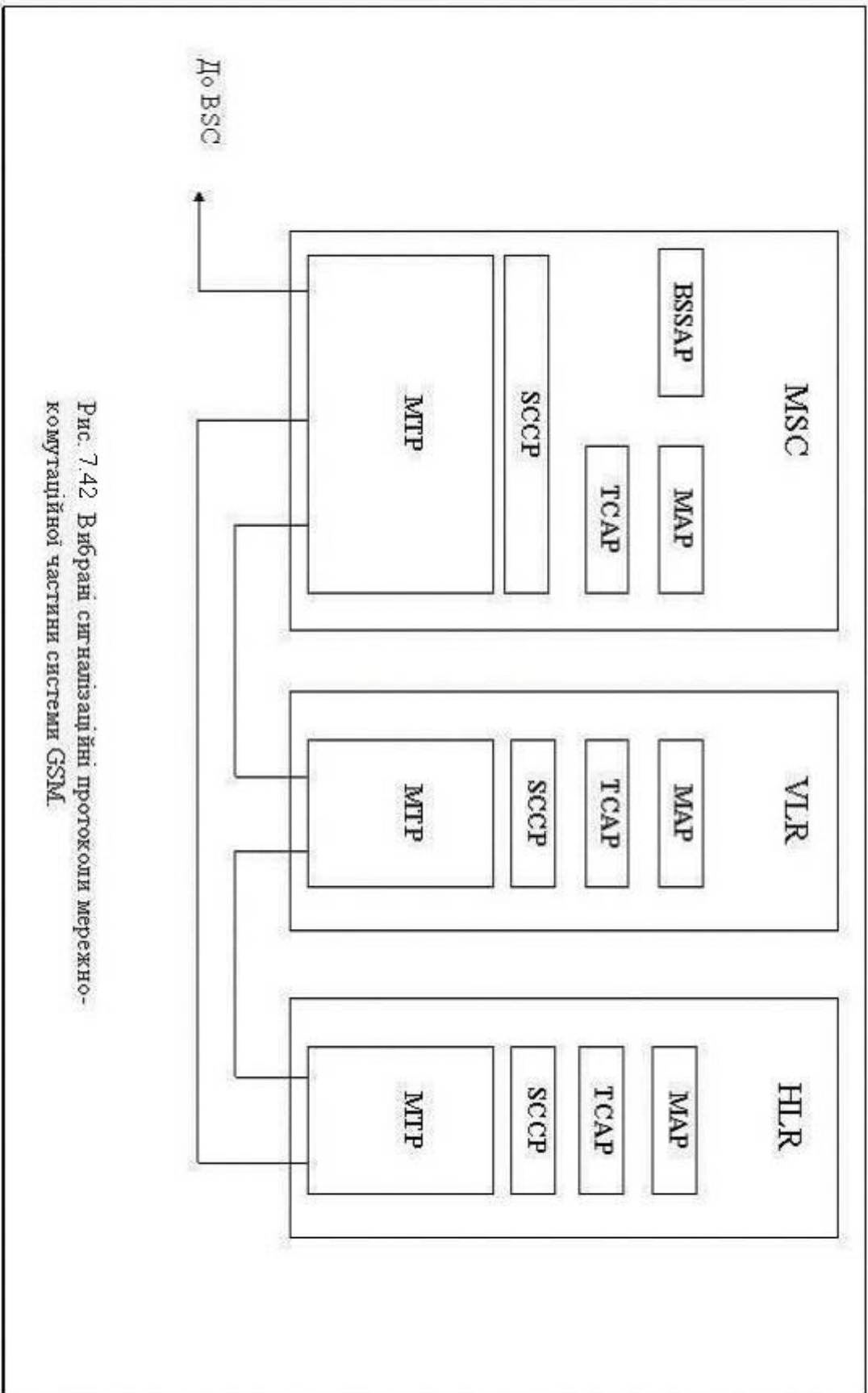


Рис. 7.42 Вибрані сигналізаційні протоколи мережно-комутаційної частини системи GSM.

В зв'язку з тим, що в комутаційно-мережній частині кожний пристрій має власний інтерфейс з системою сигналізації SS7, то протокол MAP для різних пристроїв комутаційно-мережної частини системи GSM використовує протоколи системи SS7: TCAP, SCCP та MTP. Протокол TCAP (англ. Transaction Capabilities Application Part) є одним з протоколів сигналізаційної системи SS7, який керує обміном сигналізаційною інформацією між пристроями стаціонарної мережі. Для спрощення на рис. 7.42 в комутаційній станції MSC не описано протоколи, які відповідають за зв'язок з іншою комутаційною станцією системи GSM (крім представлених на рис. 7.42 протоколів MTP, SCCP і MAP, в сигналізації між двома комутаційними станціями MSC приймають участь також і протоколи третього рівня системи GSM: CM і MM).

Сигналізація між пристроями комутаційно-мережної частини в значній мірі базується на протоколах сигналізаційної системи SS7. Система SS7 була створена до того, як було опрацьовано модель ISO/OSI і не має його рівневої структури, звідси на рис. 7.42 не позначено рівнів. В системі SS7 виділяють чотири рівні, які в певній мірі відповідають сімом рівням моделі ISO/OSI. Відносно такого відповідника, протокол MTP відповідає трьом довільним рівням моделі, протокол SCCP третьому рівню, а протокол TCAP відповідає сьомому рівню.

8. СИСТЕМА БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ

8.1. Основні поняття системи базової станції

8.1.1. Форми комірок в коміркових мережах

Мережа коміркового зв'язку - це мережа, яка функціонує у двовимірному просторі, поділеному на зони. Ці зони називаються комірками і кожна з них обслуговується окремою базовою станцією BTS (англ. Base Transceiver Station) - у випадку антен з ненапрявленою діаграмою направленості, або окремим приймально-передавальним обладнанням базової станції (у випадку секторних антен). Для спрощення завдань при проектуванні мережі зручно використовувати регулярну форму комірок. При цьому форма комірки у вигляді кола, яка отримується при використанні ненапрямлених антен, непридатна для завдань проектування, оскільки комірки або взаємоперекриваються, або між комірками утворюються непокриті ділянки. Вирішення цієї проблеми можливе за рахунок апроксимування кола багатокутником, причому слід враховувати кількість сусідніх комірок, з якими можлива передача обслуговування (рис. 8.1). При використанні рівностороннього трикутника комірка буде мати 12 сусідів, при використанні квадрата - 8, а при використанні правильного шестикутника - лише шість. Більш того, з приведених вище багатокутників правильний шестикутник забезпечує найбільшу площу покриття.

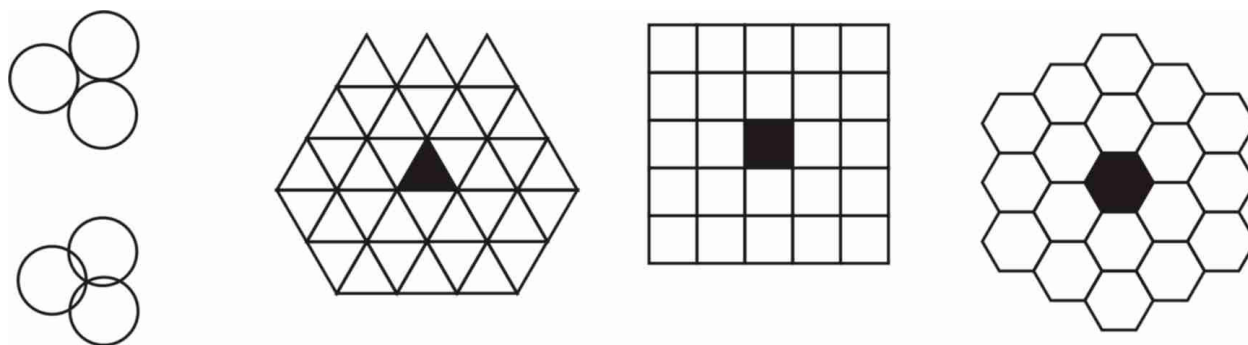


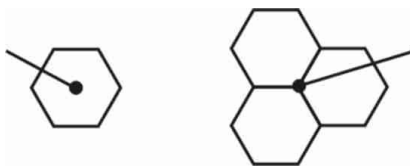
Рис.8.1 Вибір форми комірки в коміркових мережах

Отже гексагональними комірками можна покрити визначену територію з меншою кількістю базових станцій при незмінному радіусі комірки.

Як наслідок, в коміркових мережах прийнято гексагональну форму комірок. У випадку використання ненапрямлених антен базова станція розміщується в центрі правильного шестикутника і обслуговує одну комірку. У випадку використання секторних антен базова станція може обслуговувати до трьох комірок.

Насправді форма комірки залежить від таких факторів як: потужність випромінювання базової станції, рельєф, забудова (в умовах міста). Тому в дійсності комірки ніколи не бувають строгої геометричної форми. Більш того, межі комірки взагалі не можуть бути чітко визначені, оскільки рубіж передачі обслуговування рухомої станції з однієї комірки в сусідню може в деяких межах зміщуватись із зміною умов поширення радіохвиль залежно від напрямку руху мобільної станції. Аналогічно і положення базової станції лише приблизно співпадає з центром комірки (ненапрямлені антени), який до того ж не так легко визначити однозначно, якщо комірка має неправильну форму. Якщо ж на базових станціях використовуються направлені (не ізотропні в горизонтальній площині) антени, то базові станції фактично розміщуються на межі комірок.

BTS обслуговує
 одну комірку
 (містить одну
 ненапрямлену
 антену)



BTS обслуговує три
 комірки (містить три
 секторіальні антени і
 три групи прийомо-
 передавачів)

Рис.8.2 Розміщення базової станції при гексагональній формі комірки

8.1.2. Підвищення доступності до коміркової мережі

Питання підвищення доступності до системи - це одна з основних проблем сучасного коміркового зв'язку. Кількість мобільних абонентів постійно зростає

і все частіше трапляється втрата викликів через недостатню кількість вільних каналів. Для усунення цієї проблеми використовуються як нові спеціальні алгоритми обробки виклику в контролері базових станцій, так і стандартні алгоритми планування коміркової мережі. Способи підвищення доступності до мереж коміркового зв'язку можна розділити на 4 групи:

- Вдосконалення методів обробки сигналів. Прикладом такого методу є напівшвидкісне кодування мови, що дозволяє підвищити доступність до мережі вдвічі.
- Поділ комірок. На початковій стадії оператор GSM намагається покрити якомога більшу територію протягом короткого проміжку часу. Із збільшенням кількості абонентів виникають ділянки, на яких комірки перевантажені, тобто не здатні обслуговувати всі виклики. В деяких випадках перевантаження може становити декілька сотень процентів, що викликає невдоволення абонентів і приносить збитки оператору. При поділі комірок кількість базових станцій збільшується, а потужність випромінювання знижується. В результаті кількість відмов в обслуговуванні значно зменшується. Цей же ж ефект спостерігається при переході від всенаправлених антен до секторних, наприклад, при поділі комірки на три сектори (при 120-градусних секторах). Слід відмітити, що на практиці в стандарті GSM всенаправлені антени використовувати немає змісту, оскільки навіть на початковій стадії проектування мережі (а на цьому етапі забезпечують покриття великих міст) концентрація абонентів на більшості території є значна, а тому виникає необхідність збільшення кількості розмовних каналів. Використання надто дрібних комірок призводить до збільшення інтенсивності передач обслуговування від однієї комірки до іншої. Тому в стандарті GSM передбачене використання ієрархічних схем побудови мережі.
- Використання адаптивного призначення каналів. При цьому способі підвищення доступності до мережі частотні канали (всі або частково) перебувають в оперативному розпорядженні контролера базових станцій,

який виділяє їх для користування окремим коміркам по мірі поступлення викликів, тобто залежно від реальної інтенсивності трафіку, але враховуючи територіально-частотне рознесення. Такий адаптивний алгоритм складніший, але він може підвищити доступність до мережі за рахунок гнучкого відстежування флуктуацій трафіку. Слід відмітити, що на практиці цей спосіб в “чистому” вигляді практично не використовується.

- Розширення виділеної смуги частот. Частоти - це надзвичайно дефіцитний ресурс, тому даний спосіб хоча і є найпростіший, він не завжди доступний.

8.1.3. Повторне використання частот

Повторне використання частот (англ. frequency reuse) - це основний принцип системи коміркового зв'язку, який радикально відрізняє її від інших систем рухомого зв'язку і дозволяє суттєво (теоретично до безмежності) підвищувати ємність системи. Ідея повторного використання частот полягає в тому, що в близько розміщених одна відносно одної комірках системи використовуються різні частотні канали, а через декілька комірок ці частоти повторюються, що дозволяє охопити системою будь-яку велику зону обслуговування. Це виявляється вдвічі вигіднішим, якщо врахувати можливість підвищення ємності мережі за рахунок поділу комірок.

Група комірок з різними наборами частот називається кластером. Основним параметром, який характеризує кластер, є кількість частот, що використовуються в сусідніх комірках. Зрозуміло, що чим більша кількість частот в кластері, тим легше боротись з явищем інтерференції - однією з основних проблем коміркового зв'язку. В стандарті GSM допускається використання кластера, який складається лише з трьох частот. В аналогових системах це призвело б до катастрофічного погіршення якості зв'язку за рахунок інтерференції.

Суміжні базові станції, які використовують різні набори частотних каналів, утворюють групу з S станцій (кількість комірок в кластері). Якщо кожній базовій станції виділяється набір з N каналів з шириною смуги кожного F_K , то

загальна ширина смуги, яку займає система коміркового зв'язку, складає:

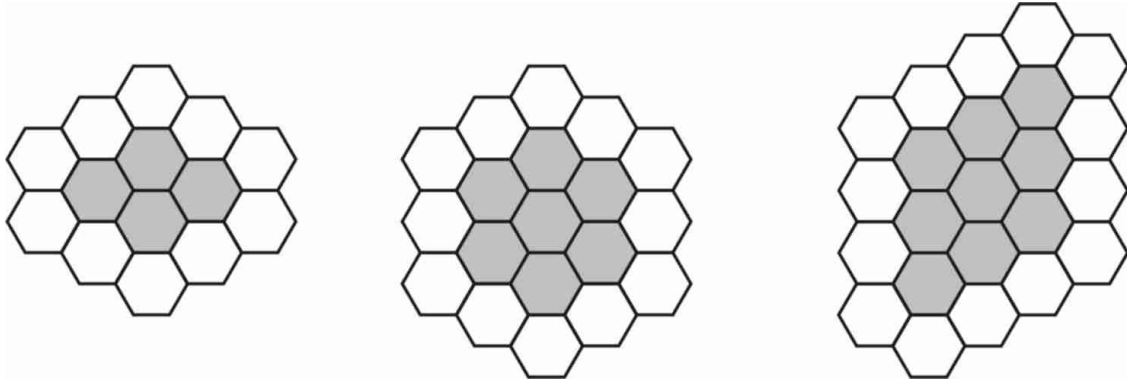


Рис.8.3 Приклад кластерів з чотирьох, семи та дев'яти комірок

$$F_c = F_k N C.$$

Звідси кількість каналів в комірці визначається виразом:

$$N = \frac{1}{C} \cdot \frac{F_c}{F_k}.$$

Таким чином, величина C визначає мінімально можливу кількість каналів в системі, тому її часто називають частотним параметром системи або коефіцієнтом повторного використання частот.

Базові станції, на яких допускається повторне використання виділеного набору частот, які віддалені одна відносно одної на відстань D , яка називається захисним інтервалом. В загальному випадку відстань D між центрами комірок пов'язана з кількістю комірок в кластері C співвідношенням:

$$D = R \sqrt{3C},$$

де R - радіус комірки.

Коефіцієнт C не залежить від кількості каналів в наборі і збільшується при зменшенні радіуса комірки. Таким чином, при використанні комірок менших розмірів є можливість збільшити повторюваність частот. Розміри комірки визначають кількість абонентів, які одночасно можуть вести переговори на

даній території обслуговування. Отже, зменшення радіуса комірки не тільки дозволяє підвищити ефективність використання виділеної смуги частот і підвищити абонентську ємність системи, але і зменшити потужність передавачів і чутливість приймачів базових і мобільних станцій, що суттєво зменшує рівень завад в системі.

8.1.4. Субкоміркові структури

Використання субкоміркових структур - це один з методів ефективного використання доступної смуги частот. Поділ на субкомірки полягає в розбитті звичайних комірок на підкомірки та надкомірки. Субкоміркова структура можлива лише при умові, коли комірка використовує не менше двох частот. Приклад субкоміркової структури представлено на рис. 8.4.

При субкомірковій структурі надкомірка є залежною від підкомірки, оскільки вона не може самостійно встановити виклик. Надкомірка немає несучої частоти BCCH і встановлення виклику здійснюється підкоміркою. Субкоміркова структура передбачає передачу виклику від підкомірки до надкомірки і в зворотному напрямку.

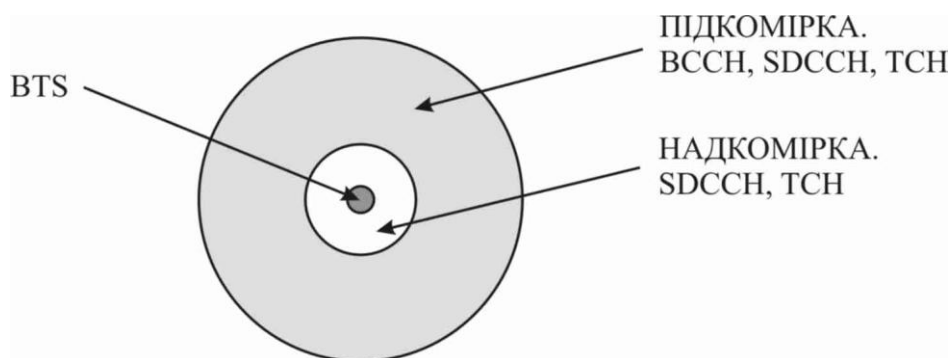


Рис.8.4 Субкоміркова структура

Перевагою використання субкоміркової структури є те, що над існуючим кластером можна встановити додатковий кластер надкомірок, наприклад новий кластер 3/9 надкомірок можна встановити над кластером 4/12 підкомірок (рис. 8.5). Це дозволить збільшити ємність мережі без додавання нового апаратного

забезпечення і додавання нових частот: деякі частоти будуть “вкрадені” з кластера підкомірок.

На рис. 8.5 зображено два кластери: кластер підкомірок 4/12: 4 базові станції (A, B, C і D) і 12 комірок ($A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3, D_1, D_2, D_3$) і кластер надкомірок 3/9 (3 базові станції і 9 комірок). Припустимо, що для кожної комірки кластера 4/12 початково було виділено по 4 частотні канали (всього 48 частотних каналів). Для введення кластера надкомірок (3/9) по одному частотному каналу взято з кластера підкомірок (4/12). В результаті в кластері 4/12 кожній комірці виділено по 3 частотні канали, а в кластері 3/9 - по одному частотному каналу. Крім того, залишається ще три вільні частотні канали, які можуть бути використані для інших комірок. Оскільки кластер надкомірок використовує лише 75% площі, яку займає кластер підкомірок (надкоміркі станції D належать іншому кластеру, тому можуть використовувати частоти надкомірок станції B), ємність мережі збільшується. Залежно від кількості частотних каналів, виділених надкоміркам з числа частотних каналів підкомірок, ємність мережі змінюється. В табл. 8.1 приведено залежність ємності мережі від співвідношення частотних каналів надкомірок і підкомірок для прикладу, представленою на рис. 8.5.

Раціональне повторне використання частот надкомірками не призводить до появи спільноканальних інтерференційних завад, оскільки потужність їх передавачів менша, ніж в підкомірках.

8.1.5. Нумерація в BSS

Поділ мережі на зони, кластери і комірки передбачає їх нумерацію. Нумерація в системі базової станції дозволяє однозначно визначити місцеположення мобільної станції в мережі, забезпечити її обслуговування і необхідну якість зв'язку.

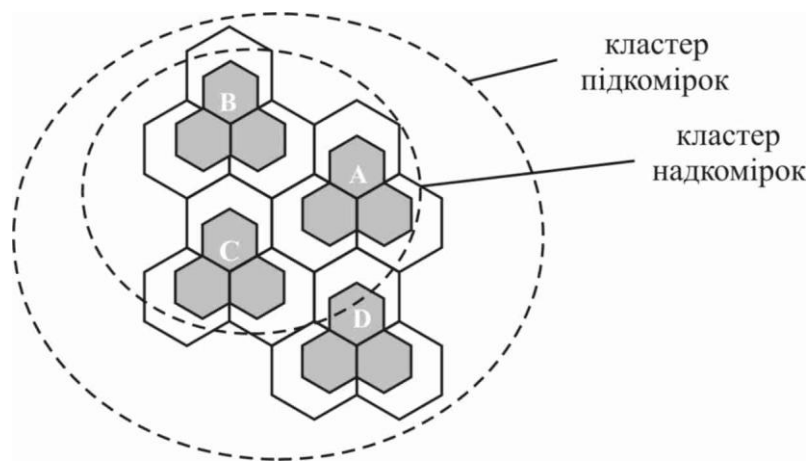


Рис.8.5 Побудова кластера 3/9 над існуючим кластером 4/12

Таблиця 8.1. Залежність ємності мережі від розподілу частотних каналів

Доступні частоти				
Підкомірки	48	36	24	12
Надкомірки	0	12	24	36
Ємність мережі	48	$36 + 12 \cdot (4/3) = 52$	$24 + 24 \cdot (4/3) - 56$	$12 + 36 \cdot (4/3) = 60$

- CGI (Cell Global Identity) - глобальний ідентифікаційний номер комірки має вигляд:

$$\text{CGI}=\text{MCC}-\text{NMC}-\text{LAC}-\text{CI},$$

де MCC (Mobile Country Code) - мобільний код країни, містить 3 цифри;

MNC (Mobile Network Code) - мобільний код мережі, містить 1-3 цифри;

LAC (Location Area Code) - код локальної території, містить до 16 біт;

CI (Cell Identification) - ідентифікаційний номер комірки, містить до 16 біт.

Глобальний ідентифікаційний номер комірки (CGI) ідентифікує комірку в мережі GSM. Це означає, що в мережі GSM не може бути дві комірки з однаковим номером CGI. Номер можна розділити на дві частини:

- комбінація MCC-NMC-LAC утворює так званий ідентифікаційний номер локальної території (Location Area Identity - LAI). Запис про цей номер міститься в MSC/VLR (мережевий компонент системи комутації). Для того, щоб розшукати мобільну станцію, не потрібно передавати пошуковий сигнал від всіх базових станцій мережі GSM. При переміщенні мобільної станції з однієї локальної території в іншу, вона надсилає до MSC/VLR запит на

оновлення інформації про місцезнаходження. Тому при пошуку мобільної станції пошукові сигнали будуть передаватись лише в межах однієї локальної території (LA).

- ідентифікаційний номер комірки (CI) призначається кожній комірці і є унікальним в межах локальної території (LA).
- BSIC (Base Station Identity Code) - ідентифікаційний код базової станції складається з двох частин:

$$\mathbf{BSIC=NCC+BCC,}$$

де NCC (National Colour Code) - національний кольоровий код, нумерується від 0 до 7;

BCC (Base Station Colour Code) - кольоровий код базової станції, нумерується від 0 до 7.

Ідентифікаційний код базової станції (BSIC) використовується для того, щоб розрізнити комірки, які працюють на однаковій частоті і належать різним кластерам. Крім того, цей номер може використовуватись для того, щоб розрізнити комірки, що належать різним операторам і перебувають на кордоні двох країн.

Для того, щоб розрізнити операторів в суміжних PLMN (рис. 8.6), кожному оператору в країні присвоюється певне значення NCC.

Коміркам, які перебувають поблизу державних кордонів, присвоюються різні значення NCC. Припустимо, мобільна станція перебуває в активному режимі і використовує розмовний канал на несучій частоті f_4 в країні В. Мобільна станція вимірює сусідні частоти, в даному випадку частоти f_1 , f_{12} і f_{14} . В країні С частота f_1 використовується в комірці, яка розміщена занадто близько до комірки з тією ж частотою в країні В. Як наслідок, при спробі мобільної станції виміряти частоту f_1 , вона може прийняти неправильний сигнал. Проте вона виявить, що NCC є неправильний і результат вимірювання буде забракований. В даному випадку MS не буде встановлювати виклик в іншій країні, а отже не будуть займатись додаткові сигналізаційні канали, що вигідно для оператора, і абонент збереже свої гроші. Цей метод також може

використовуватись і всередині країни, щоб запобігти сигналізації і перемиканням між різними MSC. Дозвіл встановлення виклику в сусідніх країнах визначається оператором для кожної комірки індивідуально шляхом введення відповідної команди в BSC.

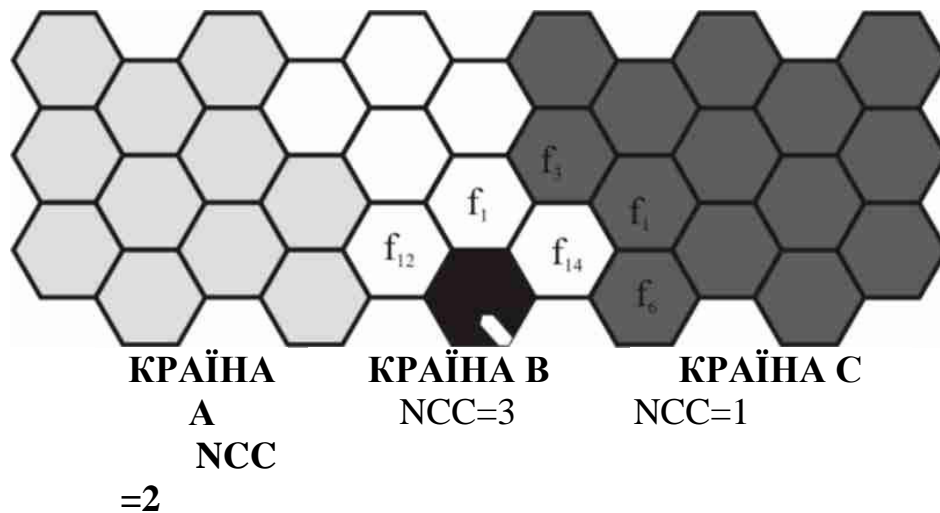


Рис.8.6 Кольоровий код PLMN (NCC)

Кольоровий код базової станції (BCC) використовується як захист від спільноканальних інтерференційних завад. З цією метою однаковий BCC присвоюється всім коміркам в заданому кластері. Таким чином забезпечується максимальне рознесення BCC.

Припустимо мобільна станція працює на частоті f_6 (рис. 8.7) і проводить вимірювання в сусідніх комірках. Проте частота f_{15x} , присвоєна комірці з іншого кластера, яка занадто близько розміщена до сусідньої комірки з частотою f_{15y} . В деяких звітах про результати вимірювань мобільна станція включить вимірювання f_{15x} замість f_{15y} . Єдиною різницею буде лише те, що для f_{15y} номер BCC=2, а для f_{15x} BCC=3. Найкращий з сигналів, незалежно від BCC буде пересилатись до контролера базових станцій, і лише там алгоритм локалізації відфільтрує комірки з неправильним BCC. В даному випадку f_{15x} з BCC=3 буде виключена з подальшого розгляду.

8.1.6. Мережеві компоненти системи базової станції та зв'язок між ними

Система базової станції BSS виконує всі функції, пов'язані з радіозв'язком. Вона керує розподілом радіоканалів, контролює з'єднання, регулює їх чергування, забезпечує режим роботи з стрибками по частоті, модуляцію і демодуляцію сигналів, кодування і декодування повідомлень, кодування мовлення, адаптацію швидкості передачі для розмовної інформації, даних і виклику і т.д.

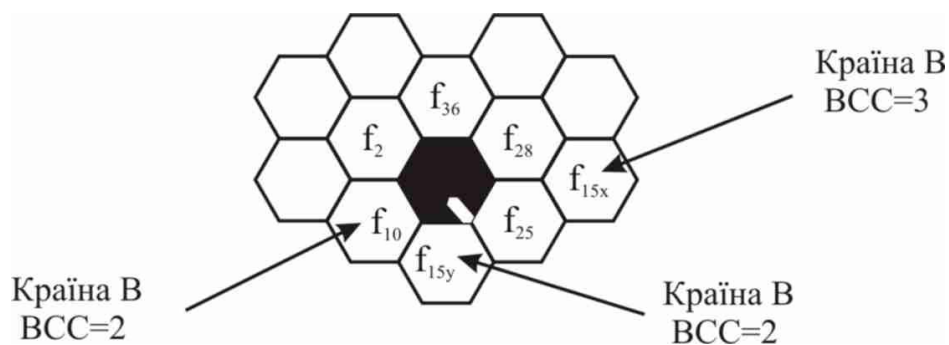


Рис.8.7 Кольоровий код базової станції

Всі функції системи базової станції розподілені між її мережевими компонентами.

Основними мережевими компонентами системи базової станції є:

- Контролер базових станцій BSC (англ. Base Station Controller);
- Транскодер/блок адаптації швидкості TRAU (англ. Transcoder Rate Adaptation Unit);
- Базова приймально-передавальна станція BTS (англ. Base Transceiver Station).

Контролер базової станції - це основний елемент системи базової станції, який відповідає за розподіл радіоресурсів і керування зв'язком. BSC взаємодіє з транскодером, з однієї сторони, і з базовими станціями - з іншої через стандартизовані інтерфейси: A-ter і A-bis відповідно.

Модуль TRAU може реалізовуватись як у вигляді окремого блоку, так і бути інтегрованим в BSC, розміщуватись поблизу центру комутації MSC. Проте

незалежно від фізичного розташування він завжди належить до системи базової станції. Зв'язок системи базової станції з системою комутації відбувається через A-інтерфейс.

Існує два основні способи під'єднання базових станцій до BSC (рис. 8.9):

- Деревоподібне під'єднання;
- Сіткоподібне під'єднання.

При деревоподібному під'єднанні вихід з ладу хоча б однієї з ділянок може призвести до одночасної втрати зв'язку з кількома станціями, проте такий спосіб є більш вигідний з економічної точки зору. Сіткоподібне під'єднання характеризується високою надійністю, проте вимагає великих економічних затрат.

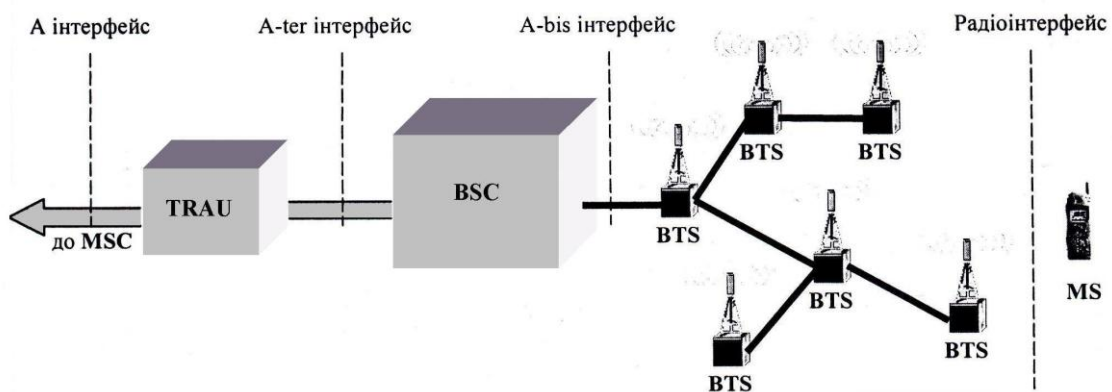


Рис.8.8 Мережеві компоненти і інтерфейси системи базової станції

Тому на практиці переважно використовується комбінація цих двох способів під'єднання: деревоподібне з'єднання базових станцій з петлею.

На практиці для зв'язку між контролером і базовими станціями найчастіше використовуються орендовані стаціонарні лінії зв'язку. Проте ці лінії не завжди доступні в потрібній кількості, а тому оператор часто вимушений організувати потоки власними засобами. Прокладання власних стаціонарних ліній, особливо в умовах міста, в більшості випадків нерациональне і

економічно не вигідне. Найкращим способом вирішення цієї проблеми є організація власної радіорелейної мережі. Одним з прикладів радіорелейного обладнання, призначеного для коміркових мереж, є обладнання фірми Ericsson Mini Link. Система радіорелейного зв'язку Ericsson Mini Link призначена для передачі на невеликі відстані (максимальна відстань - декілька десятків кілометрів), що ідеально підходить для з'єднання базових станцій між собою і з контролером. Легка радіорелейна система характеризується невеликими габаритними розмірами, що полегшує вимоги щодо її встановлення. Останній варіант (Mini Link E) виконаний у вигляді переносного блоку.

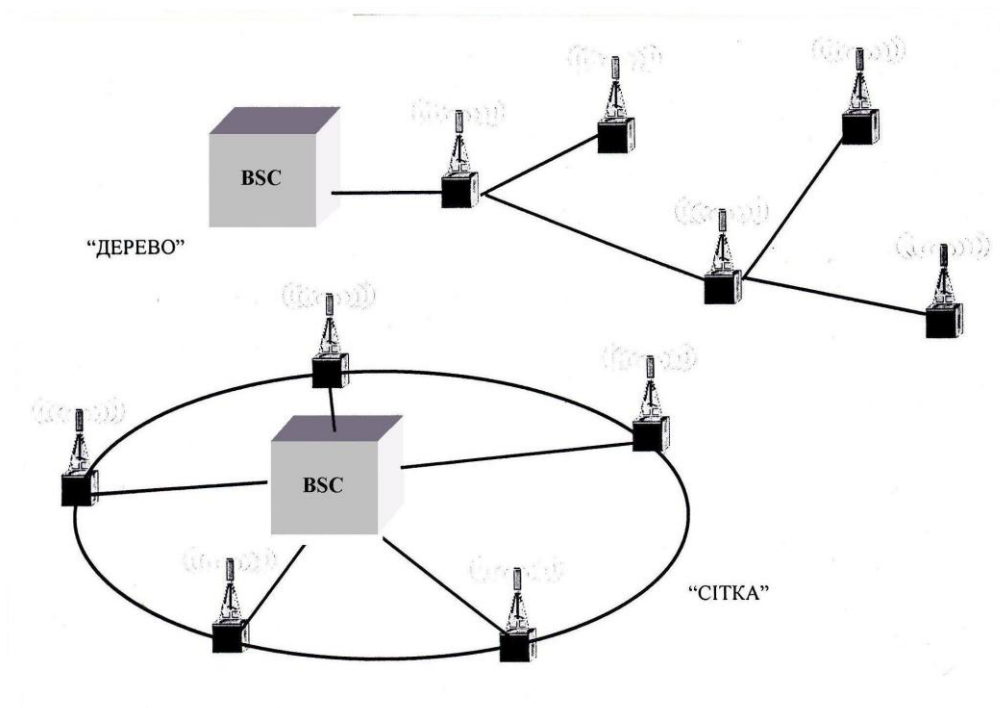


Рис.8.9 Основні способи під'єднання базових станцій до BSC

Ericsson Mini Link складається з антенного радіомодуля, звичайно параболічного дзеркала (виносна підсистема), і модуля доступу (підсистема, що розміщується в приміщенні). Підсистеми зв'язані між собою коаксіальним кабелем. Радіомодуль можна розмістити на будь-якому високому будинку чи мачті: потрібно лише забезпечити пряму видимість між антенами. Модуль доступу є незалежним від частотної смуги і включає модем,

комутатор/мультиплексор і сервісний блок, який дозволяє стежити за станом зв'язку всієї радіорелейної мережі.

Mini Link C працює в частотних діапазонах 15, 23, 26 або 38 ГГц. Mini Link E (розширений варіант Mini Link C) працює в наступних діапазонах:

- Mini Link 7-E - 7.1-7.7 ГГц;
- Mini Link 15-E - 14.4-15.35 ГГц;
- Mini Link 18-E - 17.7-19.7 ГГц;
- Mini Link 23-E - 21.6-23.6 ГГц;
- Mini Link 26-E - 24.8-26.5 ГГц;
- Mini Link 38-E - 37.1-39.4 ГГц.

Mini Link E включає:

- Канал передачі аварійних сигналів (передані аварійні сигнали централізовано контролюються в ОМС OSS).
- Моніторинг робочих характеристик.
- Кільцева перевірка на ближньому і дальньому кінці.
- Програмне встановлювані маршрутизація і трафік.
- Програмне регульована вихідна потужність.

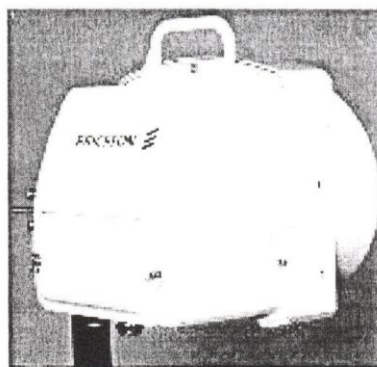
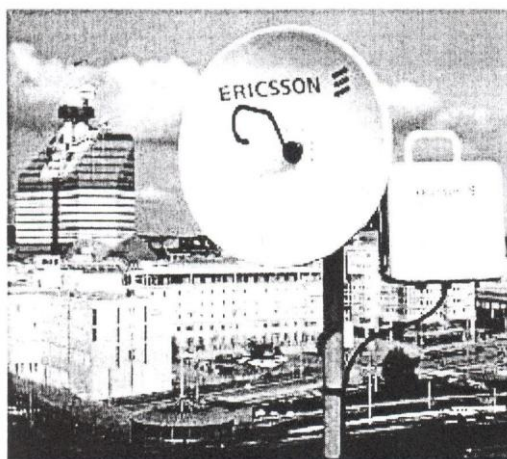


Рис.8.10 Обладнання Mini Link Ericsson

Використання власних радіорелейних ліній зв'язку вирішує проблеми

з'єднання з новими базовими станціями, дозволяє забезпечувати необхідні обхідні шляхи та резервування.

В будь-якій комірковій мережі для зв'язку між базовими станціями, а також для їх під'єднання до контролера базових станцій організується власна транспортна мережа. Таке рішення дозволяє ефективно використовувати наявні лінії зв'язку і забезпечує гнучке керування інформаційними потоками. Ericsson DXX - це мережевий варіант для побудови досконалої транспортної мережі. Мережа Ericsson DXX може забезпечувати єдиний ресурс передачі для всіх потреб оператора. DXX пропонує керування каналами з конкретними смугами частот. Це означає, що поряд з наданням транспортної гнучкої мережі Ericsson DXX може відповідати додатковим вимогам організації мережі, таким чином забезпечуючи економію витрат на інфраструктуру. Гнучкість системи Ericsson DXX дозволяє застосовувати її в різних мережевих конфігураціях, найбільш поширеними з яких є зіркоподібна і кільцева. Зіркоподібна і кільцева конфігурації дають можливість застосування ускладнених методів відновлення мережі і альтернативної маршрутизації трафіка зі сторони базової станції. Основними перевагами застосування DXX є:

- Оптимальне використання смуги частот і зменшення вартості ліній завдяки гнучкій мережі крос-з'єднань.
- Гнучкість адаптації до змін в стратегіях росту і вдосконалення технологій.
- Оптимальна якість передачі завдяки резервуванню і маршрутизації.
- Сумісне використання мережі (наприклад, аналоговими і цифровими комірковими мережами, PSTN і мережами передачі даних).
- Передача на швидкостях 8, 16, 32 і 64 кбіт/с і вище для заповнення стандартних каналів 2 Мбіт/с і можливість розширення мережі.
- Централізоване управління і вдосконалені функції виявлення і локалізації збоїв, що зменшує вартість експлуатації і технічного обслуговування та дозволяє оптимально використовувати персонал.
- Функції автоматичного та ручного відновлення для покращення працездатності каналів.

- Неперервний контроль за якістю передачі і з'єднувальними лініями.
- Вузли з високою пропускною здатністю.

8.2. Радіоінтерфейс

8.2.1. Частотний план стандарту GSM

Стандарт GSM розроблений для створення коміркових мереж мобільного зв'язку в наступних діапазонах частот: 890-915 МГц - для передачі мобільними станціями (канал “вверх”); 935-960 МГц - для передачі базовими станціями (канал “вниз”). Кожна з частотних смуг, виділених для мереж GSM, розділяється на частотні канали, рознесення яких складає 200 кГц. Це дозволяє організувати 124 частотні канали (теоретично можна організувати 125 частотних каналів, проте на практиці по краях діапазонів організовуються захисні смуги по 100 кГц). Частоти, виділені для передачі повідомлень від мобільної станції на базову і в зворотному напрямку, групуються парами, організовуючи дуплексний канал з рознесенням 45 МГц. Кожна комірка системи базової станції характеризується фіксованим присвоєнням визначеної кількості пар частот. Ці пари частот зберігаються і при стрибках по частоті.

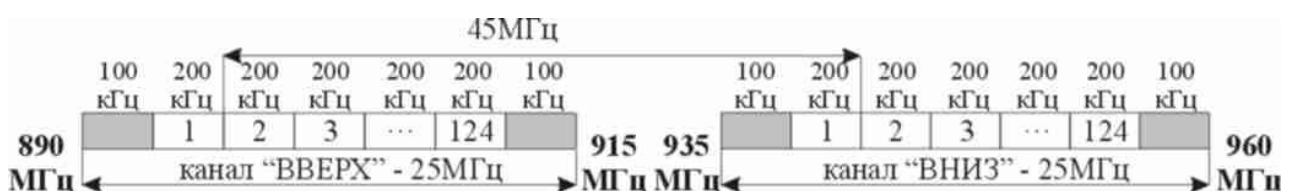
Частоти каналів “вверх” і “вниз” визначаються за формулами:

$$F(n)=890.2+0.2(n-1), \text{ МГц};$$

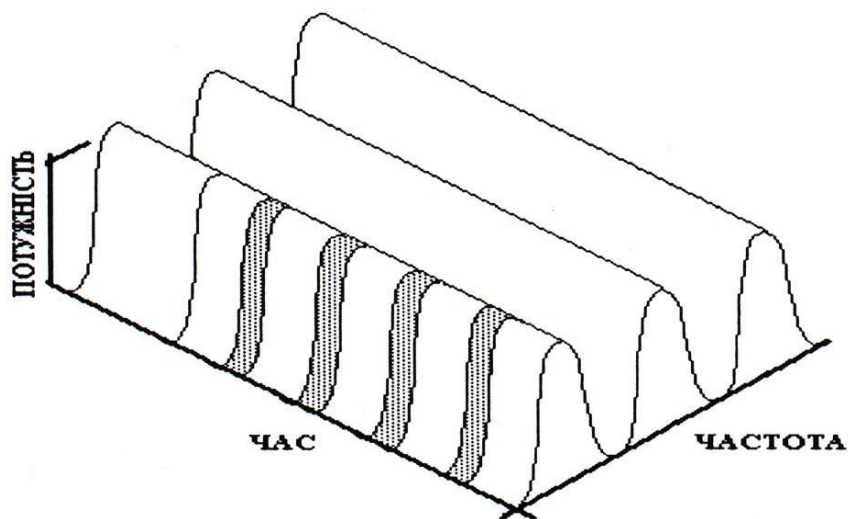
$$F(n)=890.2+0.2(n-1)+45, \text{ МГц},$$

де $n = 1..124$ - номер частотного каналу.

В табл.8.2. приведені номінали частот каналі для прийому (RX) і передачі (TX) базовими станціями і відповідні їм номери каналів.



а)



b)

Рис.8.11 Частотні канали в GSM

Таблиця 8.2. Частотні канали GSM 900

Канал		Частота прийому	Частота передачі	Канал		Частота прийому	Частота передачі
Dec	Hex	МГц	МГц	Dec	Hex	МГц	МГц
1	2	3	4	5	6	7	8
1	01	890.20	935.20	63	3F	902.60	947.60
2	02	890.40	935.40	64	40	902.80	947.80
3	03	890.60	935.60	65	41	903.00	948.00
4	04	890.80	935.80	66	42	903.20	948.20
5	05	891.00	936.00	67	43	903.40	948.40
6	06	891.20	936.20	68	44	903.60	948.60
7	07	891.40	936.40	69	45	903.80	948.80
8	08	891.60	936.60	70	46	904.00	949.00
9	09	891.80	936.80	71	47	904.20	949.20
10	0A	892.00	937.00	72	48	904.40	949.40
11	0B	892.20	937.20	73	49	904.60	949.60
12	0C	892.40	937.40	74	4A	904.80	949.80

13	0D	892.60	937.60	75	4B	905.00	950.00
14	0E	892.80	937.80	76	4C	905.20	950.20
15	0F	893.00	938.00	77	4D	905.40	950.40
16	10	893.20	938.20	78	4E	905.60	950.60
17	11	893.40	938.40	79	4F	905.80	950.80
18	12	893.60	938.60	80	50	906.00	951.00
19	13	893.80	938.80	81	51	906.20	951.20
20	14	894.00	939.00	82	52	906.40	951.40
21	15	894.20	939.20	83	53	906.60	951.60
22	16	894.40	939.40	84	54	906.80	951.80
23	17	894.60	939.60	85	55	907.00	952.00
24	18	894.80	939.80	86	56	907.20	952.20
25	19	895.00	940.00	87	57	907.40	952.40
26	1A	895.20	940.20	88	58	907.60	952.60
27	1B	895.40	940.40	89	59	907.80	952.80
28	1C	895.60	940.60	90	5A	908.00	953.00
29	1D	895.80	940.80	91	5B	908.20	953.20
30	1E	896.00	941.00	92	5C	908.40	953.40
31	1F	896.20	941.20	93	5D	908.60	953.60
32	20	896.40	941.40	94	5E	908.80	953.80
33	21	896.60	941.60	95	5F	909.00	954.00
34	22	896.80	941.80	96	60	909.20	954.20
35	23	897.00	942.00	97	61	909.40	954.40
36	24	897.20	942.20	98	62	909.60	954.60
37	25	897.40	942.40	99	63	909.80	954.80
38	26	897.60	942.60	100	64	910.00	955.00
39	27	897.80	942.80	101	65	910.20	955.20
40	28	898.00	943.00	102	66	910.40	955.40
41	29	898.20	943.20	103	67	910.60	955.60

42	2A	898.40	943.40	104	68	910.80	955.80
43	2B	898.60	943.60	105	69	911.00	956.00
44	2C	898.80	943.80	106	6A	911.20	956.20
45	2D	899.00	944.00	107	6B	911.40	956.40
46	2E	899.20	944.20	108	6C	911.60	956.60
47	2F	899.40	944.40	109	6D	911.80	956.80
48	30	899.60	944.60	110	6E	912.00	957.00
49	31	899.80	944.80	111	6F	912.20	957.20
50	32	900.00	945.00	112	70	912.40	957.40
51	33	900.20	945.20	113	71	912.60	957.60
52	34	900.40	945.40	114	72	912.80	957.80
53	35	900.60	945.60	115	73	913.00	958.00
54	36	900.80	945.80	116	74	913.20	958.20
55	37	901.00	946.00	117	75	913.40	958.40
56	38	901.20	946.20	118	76	913.60	958.60
57	39	901.40	946.40	119	77	913.80	958.80
58	3A	901.60	946.60	120	78	914.00	959.00
59	3B	901.80	946.80	121	79	914.20	959.20
60	3C	902.00	947.00	122	7A	914.40	959.40
61	3D	902.20	947.20	123	7B	914.60	959.60
62	3E	902.40	947.40	124	7C	914.80	959.80

Виділення окремих частотних каналів для передачі і прийому – це частотне розділення каналів. В стандарті GSM поряд з частотним розділенням каналів використовується також множинний доступ з часовим розділенням каналів. Це досягається шляхом розбиття кожного частотного каналу на вісім часових інтервалів (тайм-слотів, фізичних каналів) тривалістю 576.9 мкс кожен. Таким чином відбувається часове ущільнення каналів, що дозволяє підвищити ємність мережі і є однією з основних переваг цифрових коміркових мереж над аналоговими.

8.2.2. Типи каналів в GSM

В системі GSM розрізняють фізичні і логічні канали. Канал, що використовується для перенесення інформації між мобільною і базовою станцією, називається фізичним каналом. Різні види інформації, що переносяться по фізичному каналу класифікуються як логічні канали. Логічні канали поділяються на дві категорії: канали управління і канали інформаційних потоків (рис. 8.12).

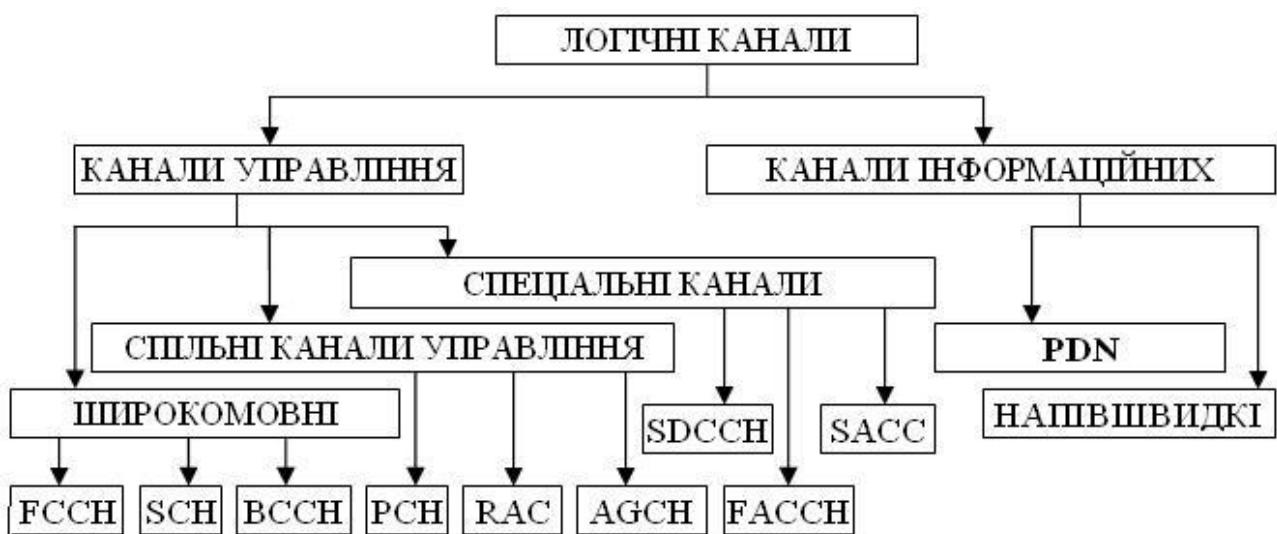


Рис.8.12 Канали радіоінтерфейсу

8.2.2.1. Канали управління

Канали управління містять сигналізаційну інформацію, що використовується мобільною станцією для виявлення базової станції, синхронізації її з базовою станцією, прийому інформації, яка необхідна для встановлення зв'язку. Є три категорії каналів управління: ширококомовні канали, спільні канали управління і спеціальні канали управління.

- Широкомовні канали. Всі ширококомовні канали передаються по каналу "вниз". Вони містять інформацію, яка потрібна мобільним станціям в фазі встановлення з'єднання.

- *Канал частотної корекції FCCN* (англ. Frequency Correction CHannel) містить інформацію, яка використовується мобільною станцією для корекції частоти.
- *Синхронізаційний канал SCH* (англ. Synchronization Channel) містить ідентифікаційний код базової станції (BSIC), який використовується для правильного дешифрування інформації, і номер циклу TDMA для синхронізації по часу мобільної станції з цикловою структурою нової базової станції.
- *Широкомовний канал управління BCCH* (англ. Broadcast Control CHannel) використовується для передачі до мобільних станцій ідентифікаційної інформації: код зони викликів LAC, ідентифікатор оператора MNC, номери радіоканалів сусідніх комірок та інші параметри, які необхідні мобільним станціям для доступу до системи.
- Спільні канали управління. Всі спільні канали управління передаються по принципу точка-точка.
- *Пошуковий канал PCN* (англ. Paging CHannel) використовується для пошуку шляху встановлення зв'язку з мобільною станцією. Базова станція передає інформацію про мобільну станцію, яку розшукує система з метою встановлення з'єднання.
- *Канал випадкового доступу RACH* (англ. Random Access CHannel) використовується мобільною станцією для запиту доступу до системи. По цьому каналу MS вимагає призначення їй виділеного сигналізаційного каналу.
- *Канал надання доступу AGCH* (англ. Access Grant CHannel) використовується для передачі мобільній станції інформації про те, який виділений сигналізаційний канал їй призначений.
- Спеціальні канали управління. Всі спеціальні канали управління передаються по принципу точка-точка і є двонапрямленими. По цих каналах передається сигналізаційна інформація, необхідна для ідентифікації абонента, встановлення з'єднання і звітування.

- *Окремий виділений спеціальний канал управління SDCCH* (англ. Stand-alone Dedicated Control CHannel) переносить сигналізаційну інформацію під час встановлення виклику, тобто з моменту встановлення з'єднання до моменту виділення мобільній станції розмовного каналу.
- *Повільний виділений спеціальний канал управління SACCH* (англ. Slow Associated Control CHannel) виділяється разом з розмовним або окремим виділеним спеціальним каналом управління і містить результати вимірювання, які виконує мобільна станція. На основі цих звітів контролер базових станцій приймає рішення про зміну потужності, перемикання, визначає відстань між мобільною і базовою станцією, якість зв'язку.
- *Швидкий виділений спеціальний канал управління FACCH* (англ. Fast Associated Control CHannel) завжди зв'язаний з розмовним каналом і містить термінову сигналізаційну інформацію. Така інформація використовується, наприклад, при перемиканні між комірками і передається в звичайних пакетах, в яких біти-прапорці (SF) вказують на передачу сигналізаційної інформації.

8.2.2.2. Канали інформаційних потоків (розмовні канали)

Канали інформаційних потоків призначені для перенесення мовлення і даних. Вони можуть розміщуватись в довільному часовому інтервалі на будь-якій частоті за винятком нульового часового інтервалу BCCH-несучої.

- *Повношвидкісні* (англ. Full-rate) розмовні канали містять закодовану розмовну інформацію і дані. Інформація передається з швидкістю 33.8 кбіт/с.
- *Напівшвидкісні* (англ. Half-rate) розмовні канали використовуються для збільшення пропускної здатності. При роботі з напівшвидкісними каналами мобільна станція буде використовувати не кожен часовий інтервал, а через один. В результаті дві мобільні станції зможуть використовувати один і той фізичний канал, що призведе до подвоєння його пропускної здатності.

8.2.3. Структура радіоінтерфейсу

В стандарті GSM передача інформації по радіоінтерфейсу організується циклами (кадрами) TDMA, тривалість яких становить 4.615 ms. Кожен цикл складається з восьми часових інтервалів по 577 мкс, і кожен часовий інтервал відповідає своєму розмовному або сигналізаційному каналу.

Для ефективного розташування логічних каналів в фізичних, а також для процедури шифрування радіопередачі стандартом передбачено організацію циклів вищого рівня.

Наступним після TDMA циклу рівнем в ієрархічній структурі радіоінтерфейсу є мультицикл (англ. multiframe). Для організації каналів інформаційних потоків і каналів управління використовується два види мультициклів:

- Мультицикл каналів інформаційних потоків (тривалістю 120 ms) складається з 26 циклів TDMA. При цьому в 24 циклах передається розмовна інформація - це цикли 1-12 і 14-25, в циклі 13 передається інформація каналу SACCH, а цикл 26 залишається порожнім (зарезервований для передачі другого сегменту інформації каналу SACCH при напівшвидкісному кодуванні).
- Мультицикл каналів управління (тривалістю 235 ms) складається з 51 циклу TDMA.

Наступним рівнем організації циклів є т. зв. суперцикл (англ. superframe), тривалість якого становить 1326 циклів TDMA. Суперцикл містить або 26 циклів каналів управління, або 51 цикл каналів інформаційних потоків.

2048 суперциклів утворюють один гіперцикл, який має тривалість 3 години 28 хвилин 53 760 ms, або 2715648 циклів. Номер циклу в межах гіперциклу використовується в процесі шифрування інформації, що передається по радіоінтерфейсу.

8.2.4. Сигналізація на радіоінтерфейсі

Сигналізація між мобільною станцією і системою відноситься до завдань третього (мережевого) рівня. Завдання включають скерування кожного сигналізаційного повідомлення до відповідного елемента системи GSM:

домашнього реєстру, гостьового реєстру, центру комутації чи контролера базових станцій.

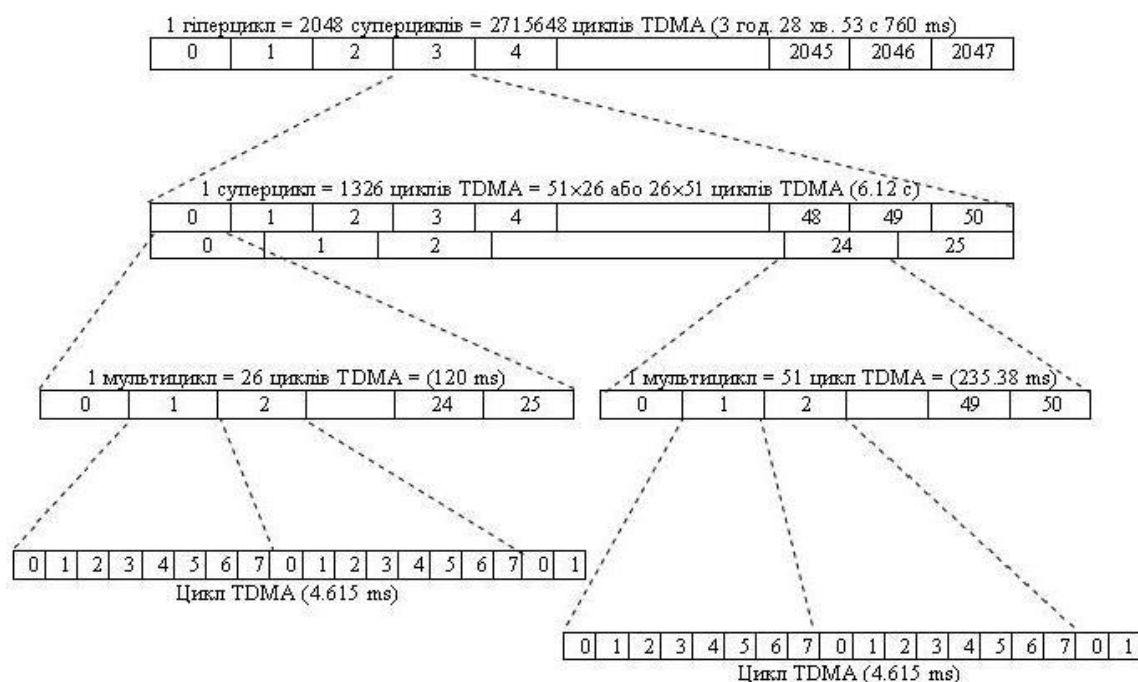


Рис.8.13 Циклова структура в стандарті GSM

Оскільки об'єм сигналізаційної інформації між мобільною станцією і системою великий, функції мережевого рівня розділені між трьома протоколами:

- Керування Радіоресурсами RR (англ. Radio Resource management);
- Керування Мобільністю MM (англ. Mobility Management);
- Керування З'єднанням CM(англ. Connection Management);

Протокол RR виконує завдання, пов'язані з встановленням, обслуговуванням та звільненням з'єднань по виділених каналах управління.

Функції, які виконуються протоколом RR, включають:

- Зміну виділеного каналу під час перебування в одній комірці, наприклад з SDCCN на TCH;
- Перемикання з однієї комірки в іншу;
- Перевизначення частот (використовується при стрибкоподібній перенастроючі частоти).

Повідомлення протоколу RR зі сторони системи генеруються в контролері базових станцій і прозоро пересилаються через базову станцію до MS.

Протокол ММ виконує завдання, пов'язані з обробкою переміщення мобільного абонента:

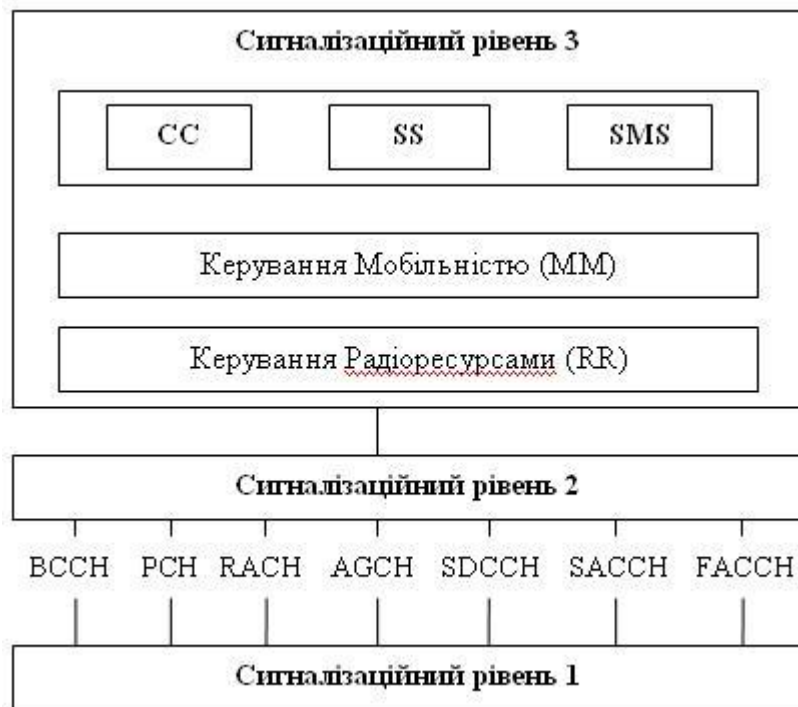


Рис.8.14 Сигналізаційний рівень 3 на радіоінтерфейсі

- Аутентифікація;
- Перевизначення тимчасового номера мобільного абонента TMSI;
- Ідентифікація мобільної станції шляхом запиту IMSI або IMEI;
- Реєстрація в зоні викликів (location registration);
- “Приєднання” і “Від'єднання” IMSI.

Процедура “Від'єднання” IMSI виконується мобільною станцією, щоб вказати, що вона є недоступна (наприклад, при вимкненні живлення мобільної станції). Таким чином вхідні виклики можуть відправлятися (т.зв. переадресація виклику) або блокуватися системою без пошуку мобільної станції.

Протокол СМ розділений на три частини:

- Керування викликом CC (англ. Call Control) - забезпечує функції встановлення, контроль та звільнення з'єднань. CC також забезпечує такі додаткові послуги, як сигналізація між користувачами (user-to-user signalling), чергування розмовної інформації і даних під час одного виклику.
- Керування Додатковими послугами SS (англ. Supplementary Services) - підтримка ряду додаткових послуг, які не пов'язані з звичайним викликом, наприклад, очікування виклику (під час розмови абонент може прийняти новий виклик).
- Керування Послугами Коротких Повідомлень SMS (англ. Short Message Service) підтримка протоколів вищих рівнів для передачі коротких повідомлень між системою і мобільною станцією.

Сигналізаційні повідомлення до і від рівня CM передаються прозоро через MM-рівень. CM на передавальній стороні робить запит на встановлення MM-з'єднання, а MM, в свою чергу, запитує встановлення RR-з'єднання.

8.3. Базова станція

8.3.1. Багатопроменеве поширення радіохвиль та методи боротьби з ним

В системі GSM використовуються смуги частот дециметрового діапазону, а отже мають наступні характеристики:

- поширюються в основному в межах прямої видимості;
- дифракція на цих частотах виражається слабо, а молекулярного поглинання і поглинання в гідрометеорах (сніг, дощ) практично немає;
- наявність відбиття від землі і перешкод, особливо в умовах міста, призводить до появи відбитих сигналів, які інтерферують між собою і з сигналом, що пройшов по прямому шляху. Це явище називається багатопроменевим поширенням сигналів.

Відбиття від землі (або іншої поверхні) при певних умовах призводить до того, що потужність сигналу, що приймається, зменшується пропорційно не другій степені відстані між приймачем і передавачем, як при поширенні в

вільному просторі, а пропорційно четвертій степені цієї відстані. Інтерференція декількох сигналів, які пройшли різними шляхами, викликає явище завмирання результуючого сигналу, при якому інтенсивність сигналу, що приймається, змінюється в значних межах при переміщенні рухомої станції. Крім того, виникають спотворення, які є наслідком накладання декількох співрозмірних сигналів, зміщених один відносно іншого в часі, які можуть призводити до помилок в інформації, що приймається. Нарешті складність картини багатопроменевого поширення суттєво ускладнює розрахунок інтенсивності сигналу при віддалені від базової станції, а такий розрахунок необхідний для коректного проектування системи.

Приклад багатопроменевого поширення зображено на рис. 8.15. Фактична область суттєвих відбиттів обмежується звичайно порівняно невеликою ділянкою навколо мобільної станції - порядку декілька сотень довжин хвиль, тобто порядку декілька десятків метрів. При переміщенні мобільної станції ця область переміщується разом з нею таким чином, що мобільна станція весь час перебуває поблизу центру цієї області.

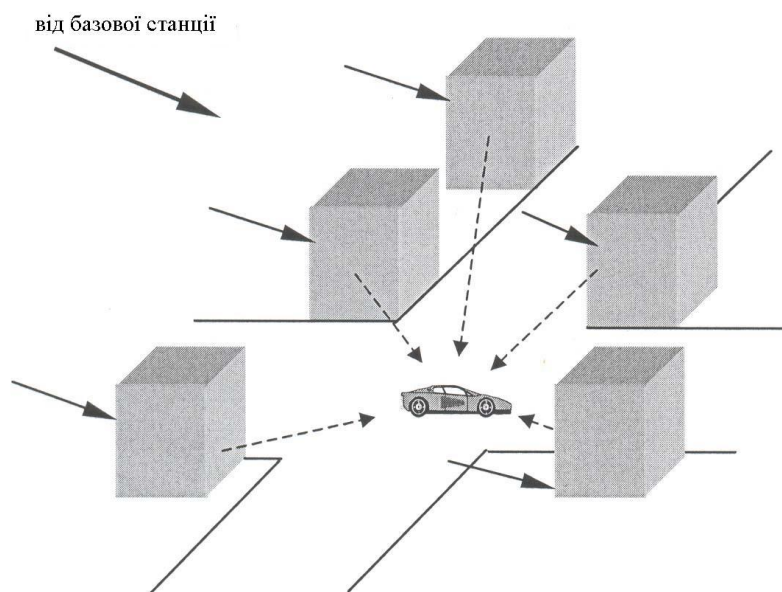


Рис.8.15 Приклад багатопроменевого поширення

При накладанні декількох сигналів, які пройшли по різних шляхах і які в точці прийому мають різні фази, результуючий сигнал може бути як вище

середнього рівня, так і значно нижче, причому провали (завмирання) сигналу, які виникають за рахунок взаємної компенсації сигналів внаслідок несприятливого поєднання їх фаз та амплітуд, можуть бути достатньо глибокими. Спотворення результуючого сигналу або міжсимвольна інтерференція мають місце в тому випадку, коли більш-менш синфазні складові сигнали з співрозмірними амплітудами настільки відрізняються по різниці ходу, що символи одного сигналу “перекриваються” з сусідніми символами другого.

Коливання рівня (завмирання) сигналу на приймальній стороні практично завжди мають дві складові: швидку і повільну. Швидкі завмирання, які є безпосереднім наслідком багатопроменевого поширення, описуються релеєвським законом поширення і тому називаються релеєвськими завмираннями. Повільні завмирання зумовлені зміною умов затінення при переміщенні рухомої станції. Фактично повільні завмирання являють собою зміну середнього рівня сигналу при переміщенні мобільної станції. Основні проблеми виникають внаслідок швидких завмирань, оскільки вони бувають достатньо глибокими і при цьому співвідношення сигнал/шум падає настільки сильно, що корисна інформація може суттєво спотворюватись шумами, що може призвести до повної її втрати.

Приведені вище особливості поширення радіохвиль вимагають додаткових заходів по обробці радіосигналів. Для боротьби з швидкими завмираннями використовується два методи: рознесений прийом, тобто одночасне використання однієї або кількох приймальних антен, а також робота з розширенням спектру, тобто використання стрибків по частоті. Для боротьби з міжсимвольною інтерференцією використовуються еквалайзери (вирівнювачі). В системі GSM використовується вирівнювач Вітербі. Нарешті, для боротьби з наслідками багатопроменевого поширення, а саме для усунення помилок, зумовлених як завмираннями сигналів, так і міжсимвольною інтерференцією, використовується завадостійке каналне кодування: блокове і згорткове кодування, а також перемішування.

8.3.2. Функції базової станції

Базова станція BS (англ. Base Station) - це обладнання, призначене для обслуговування однієї або декількох комірок мережі. Вона не просто забезпечує доступ до мережі рухливим станціям, а виконує складну обробку радіосигналів з метою забезпечення високої якості і надійної передачі. Структурна схема радіотракту приведена на рис. 8.16.

Функції, які виконує базова станція можна розділити на дві групи. До першої групи відносяться такі функції як:

- каналне кодування;
- перемішування;
- шифрування радіопередачі;
- пакетне форматування;
- модуляція;
- вирівнювання.

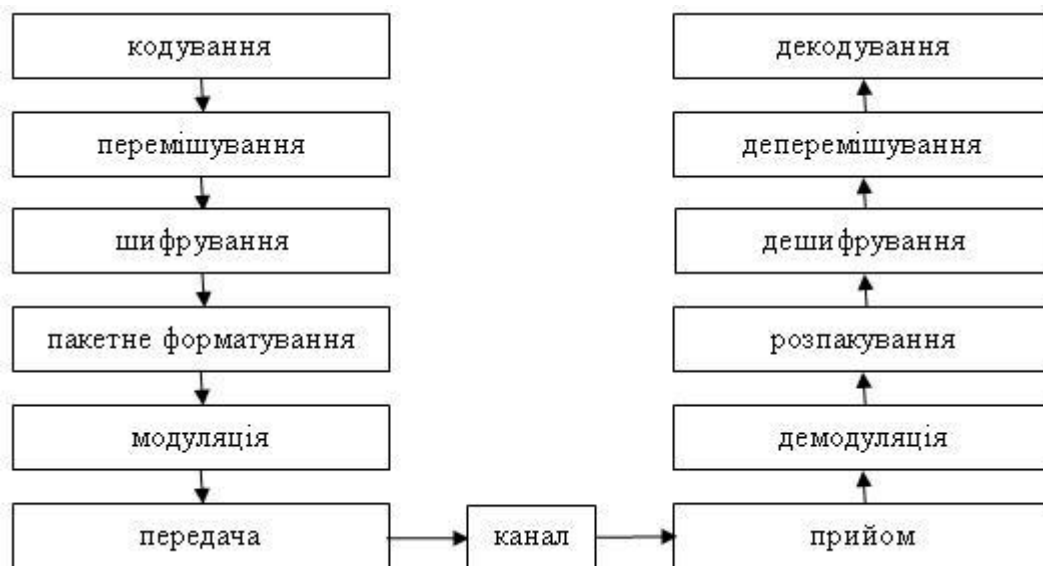


Рис.8.16 Спрощена структурна схема радіотракту

Ці функції є обов'язковими і необхідні для забезпечення надійної передачі і достовірного прийому. Друга група – це функції, які призначені для покращення якості передачі, для підвищення ефективності використання

частотного спектру.

Вони включають:

- рознесений прийом;
- стрибкоподібну перенастройку частоти;
- обробку часового випередження;
- перервну передачу;
- звітування контролеру базових станцій.

8.3.2.1. Канальне кодування та перемішування

Кодування в радіоканалі використовується для виявлення і виправлення помилок, які виникають при передачі інформації по радіоінтерфейсу. В системі GSM використовується два види канального кодування: блокове і згорткове. Згорткове кодування є потужним засобом боротьби з одиночними помилками, а блокове кодування в основному використовується для виявлення не виправлених помилок.

При блоковому кодуванні вхідна інформація розділяється на блоки, що містять по k символів, і які по визначеному закону перетворюються блоковим кодером в n символні блоки, причому $n > k$. Відношення $R = k/n$ називається швидкістю кодування і є мірою надлишковості, яка вноситься кодером. При правильній побудові коду збільшення надлишковості призводить до підвищення завадостійкості.

При згортковому кодуванні K послідовних символів вхідної інформаційної послідовності, по k біт в кожному символі, приймають участь в утворенні n -бітових символів вихідної послідовності, $n > k$, причому на кожен символ вхідної послідовності припадає по одному символу вихідної. В стандарті GSM використовуються символи з $k=1$, тобто символи однобітові, а згортковий кодер - двійковий. Параметр K визначає довжину зсувного регістру (в символах), вміст якого приймає участь в формуванні одного вихідного символу, і називається довжиною обмеження. Оскільки складність декодування згорткового коду по алгоритму Вітербі (даний алгоритм є найбільш вигідний з

точки зору реалізації) зростає за експоненційним законом із збільшенням довжини кодового обмеження, то на практиці використовуються значення K в межах від 3 до 10.

В стандарті GSM основні властивості розмовних каналів і каналів управління значно відрізняються один від одного. Для розмовних каналів необхідний зв'язок в реальному масштабі часу з короткими затримками при порівняно низьких вимогах до ймовірності помилок в каналі. Для каналів управління вимагається абсолютна цілісність даних і виявлення помилок, але допускається більш тривалий час передачі і затримки. Як наслідок кодування в каналах управління і розмовних каналах має свої особливості.

Розглянемо процес кодування мовної інформації в повношвидкісному розмовному каналі.

Кодер мовлення поставляє на схему каналного кодування 20-мілісекундні блоки довжиною по 260 біт з швидкістю 13 кбіт/с. Кожен блок довжиною 260 біт розбивається на три частини:

- 50 біт класу 1A;
- 132 біти класу 1B;
- 78 біт класу 2.

Біти класу 1A захищаються за допомогою слабого блокового кодування для виявлення помилок в приймачі. В результаті блокового кодування до 50 біт класу 1A додається 3 біти перевірки на парність. Блоковий код являє собою вкорочений систематичний код з формуючим поліномом виду:

$$g(D)=D^3 + D + 1.$$

На даній стадії виконується перший крок перемішування. Перемішування - це така зміна порядку слідування символів інформаційної послідовності, тобто перестановка символів, при якій символи, що були розміщені поряд, стають розділеними декількома іншими символами.

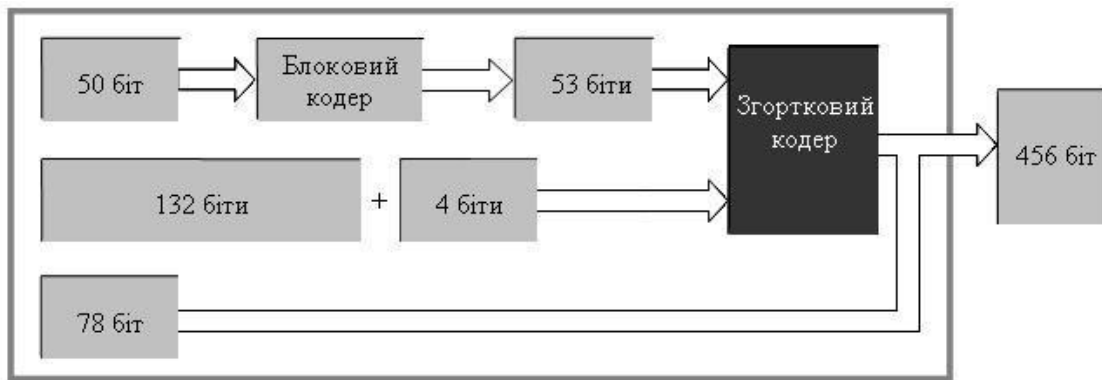


Рис.8.17 Схема каналного кодування в розмовному каналі GSM

Перемішування здійснюється з метою перетворення пакетів помилок в одиночні, з якими легше боротись за допомогою блокового і згорткового кодування. Отже, на першій стадії перемішування біти з парними індексами збираються в першій частині інформаційного слова, за ними слідує три біти перевірки на парність. Після цього біти з непарними індексами запам'ятовуються в буферній пам'яті і переставляються так, як це показано на рис. 8.18б. Далі слідує чотири нульових біти, які необхідні для роботи кодера, що формує код для виправлення випадкових помилок в радіоканалі.

Наступним кроком є згорткове кодування 189 біт класу 1 кодом (2, 1, 5) з швидкістю $\gamma=1/2$. Як показано на рис.8.18в, після згорткового кодування загальна довжина кадру складає $2 \times 189 + 78 = 456$ біт.

Після цього отриманий кадр з 456 біт поділяється на вісім 57-бітових блоків (рис. 8.18г), які зазнають блоково-діагонального перемішування.

При діагональному перемішуванні вхідна інформація поділяється на блоки, а блоки - на субблоки, і в вихідній послідовності субблоки чергуються між собою. Така схема перемішування вносить малу затримку, але розставляє сусідні субблоки лише через один, тобто розсосередження помилкових символів групи є невеликим.

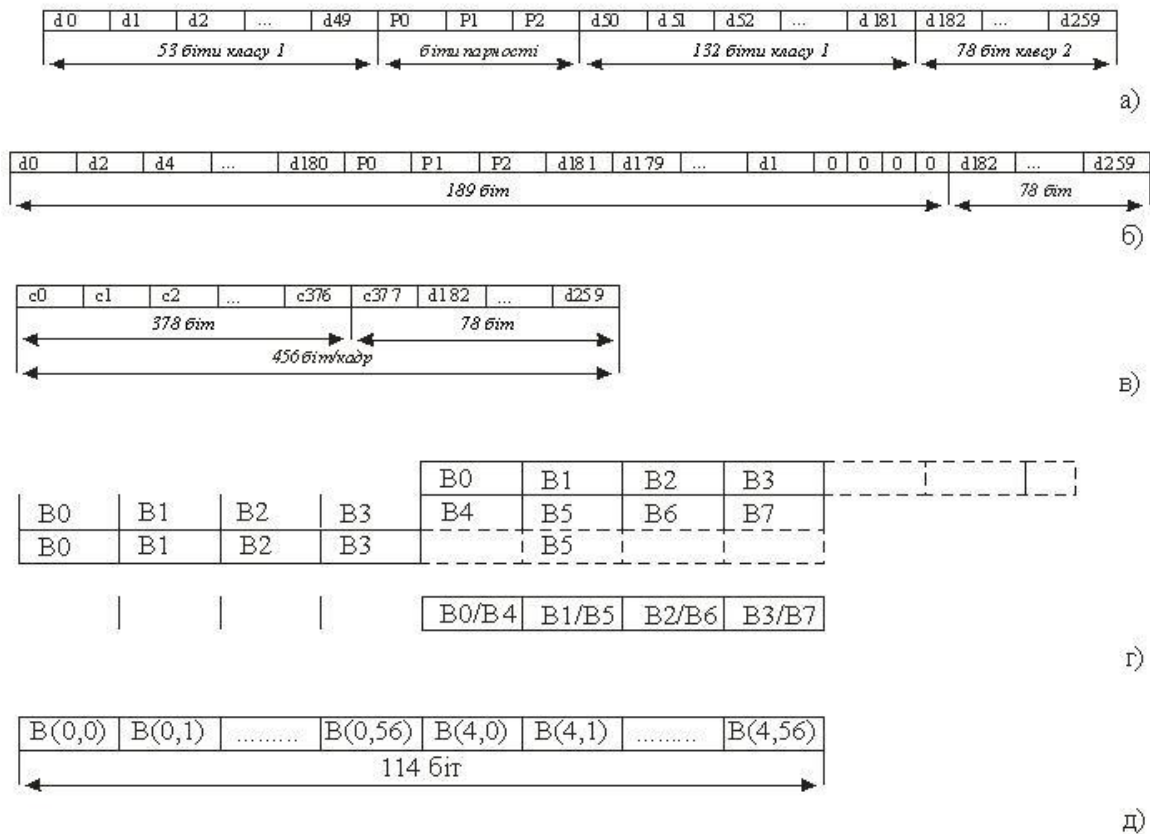


Рис.8.18 Канальне кодування і перемішування в розмовному каналі:

- а) інформаційна послідовність на виході схеми блокового кодування;
- б) перший етап перемішування; в) інформаційна послідовність на виході схеми загорткового кодування; г) блоково-діагональне перемішування;
- д) розбиття на пакети

При блочному перемішуванні вхідна інформація також поділяється на блоки по n субблоків в кожному, але в вихідній послідовності чергуються субблоки k послідовних блоків. Роботу цієї схеми можна представити у вигляді запису вхідної послідовності у стрічки матриці (k,n) , зчитування інформації з якої здійснюється по стовпцях. Дана схема вносить велику затримку, але значно краще розсосереджує символи пакетів помилок.

На рис. 8.18г біти $B0$ і $B4$ субблоків попарно перемішуються, утворюючи процес блокового перемішування.

В звичайному пакеті, який переносить розмовну інформацію, є простір для двох 57-бітових блоків інформації. Тому на наступному етапі перемішування

вісім 57-розрядних блоків, призначених для передачі, розміщуються в вісім різних інформаційних пакетів. Кожен інформаційний пакет буде містити блоки інформації з різними вибірками мовлення.

В результаті перемішування кожен інформаційний пакет буде містити два 57-розрядні блоки інформації з різними вибірками мовлення. Перевагою перемішування пакетів є те, що воно дозволяє загубити цілий пакет. Оскільки втрата одного пакета впливає тільки на 12.5% біт з кожного циклу розмови, процес кодування каналу дає можливість зробити відповідні виправлення.

8.3.2.2. Шифрування

Радіоінтерфейс - це найбільш зручна для несанкціонованого доступу ланка системи базової станції. Результатом несанкціонованого доступу може бути не тільки прослуховування розмов абонентів, але і безкоштовне користування послугами мобільного зв'язку. Щоб запобігти цьому в стандарті GSM використовується шифрування повідомлень, що передаються по радіоінтерфейсу, а також введено процедуру аутентифікації, тобто підтвердження достовірності абонента. Режими секретності в стандарті GSM визначаються Рекомендаціями, які приведені в табл.8.3.

Таблиця 8.3. Аспекти безпеки в стандарті GSM

Рекомендації	Назва	Опис
GSM 02.09	Аспекти секретності	Визначають характеристики безпеки, які застосовуються в мережах GSM. Регламентується їх використання в рухомих станціях і мережах.
GSM 03.20	Секретність, пов'язана з функціями мережі	Визначає функції мережі, необхідні для забезпечення характеристик безпеки, які розглядаються в рекомендаціях GSM 02.09
GSM 03.21	Алгоритми	Визначає криптографічні алгоритми в

	секретності	системі зв'язку
GSM 02.17	Модуль достовірності абонента (SIM)	Визначає основні характеристики модуля SIM

Для захисту сигналів управління і даних користувача, які передаються по радіоканалу, базова станція використовує дані, які містяться в центрі аутентифікації (AUC) - мережевому елементі системи комутації. Розгляд центру аутентифікації, як і розгляд абонентського модуля SIM, хоч і виходить за межі системи базової станції, проте є необхідний для розуміння процедури шифрування на радіоінтерфейсі.

Захист в GSM реалізовано в трьох елементах системи:

- центрі аутентифікації;
- абонентському модулі SIM;
- мобільній станції.

В центрі аутентифікації зберігаються бази даних з інформацією про аутентифікацію і ідентифікацію абонентів, а саме: міжнародний номер мобільного абонента (IMSI), тимчасовий номер мобільного абонента (TMSI), номер зони викликів (LAI) та індивідуальний ключ шифрування для кожного абонента.

Модуль SIM містить номер IMSI, індивідуальний ключ шифрування абонента (K_i), алгоритм генерування ключа шифрування (A8), алгоритм шифрування (A3) і персональний ідентифікаційний номер абонента (PIN).

Мобільна станція містить алгоритм шифрування розмовної інформації і даних (A5). Захист інформації при передачі по радіоінтерфейсу зводиться до виконання трьох процедур:

- ідентифікації;
- шифрування;
- визначення і перевизначення тимчасового номера абонента (TMSI).

Функцією базової станції є шифрування повідомлень, що передаються

мобільній станції, і дешифрування повідомлень, прийнятих від MS. На відміну від мобільної станції BTS не розраховує ключі шифрування, а отримує їх від центру аутентифікації. При ідентифікації абонента і присвоєнні тимчасового номера базова станція лише передає інформацію від і до системи комутації, в якій AUC виконує необхідні розрахунки і на основі записів в базах даних приймаються рішення.

В стандарті GSM ідентифікація абонента відбувається за допомогою механізму “запит-відповідь”. Для цього 128-бітове випадкове число (RAND) посилається мобільній станції. Мобільна станція розраховує 32 бітовий відклик (SRES), який базується на шифруванні числа RAND за допомогою алгоритму шифрування A3 при використанні ключа шифрування k_i . При отриманні відклику система повторює розрахунок, і якщо результат не збігається з отриманим SRES, мобільна станція отримує відмову в доступі до системи. Слід відмітити, що ключ шифрування k_i ніколи не передається по радіоканалу: він зберігається в SIM модулі і центрі аутентифікації.

У випадку успішного завершення процедури ідентифікації мобільна і базова станції будуть виконувати процедуру шифрування розмовної інформації і даних, які передаються по радіоінтерфейсу. Мобільна станція починає шифрування/дешифрування інформації по команді системи. Для цього модуль SIM містить алгоритм генерування ключа шифрування (A8), який використовується для генерування 64-бітового ключа шифрування k_c . Цей ключ обчислюється на основі того ж випадкового числа RAND, яке використовується при ідентифікації абонента, за допомогою алгоритму A8 і ключа k_i . В мобільній станції ключ розраховується в SIM-модулі, а базова станція отримує ключ k_c від центру аутентифікації. Шифрування розмовної інформації і даних відбувається за допомогою алгоритму A5 і ключа шифрування k_c . Для підвищення захисту від несанкціонованого доступу в стандарті GSM передбачено зміну ключа шифрування в часі: ця зміна відбувається періодично на основі номера циклу TDMA.

Для забезпечення конфіденційності ідентифікації абонента

використовується тимчасовий номер мобільного абонента (TMSI). TMSI посилається мобільній станції після виконання процедур ідентифікації та шифрування і служить для виключення можливості визначення (ідентифікації) абонента шляхом перехоплення повідомлень, що передаються по радіоканалу. Мобільна станція підтверджує прийом TMSI. Тимчасовий номер дійсний лише в межах території викликів (location area), в якій він був виданий. Для комунікації ззовні території викликів використовується код зони викликів (LAI) і TMSI.

Технічні деталі алгоритмів шифрування, що використовуються в GSM, тримаються в секреті. Алгоритми були розроблені в Великобританії, і виробники обладнання для коміркових мереж, які бажають реалізувати в своїй продукції технологію шифрування, повинні отримати ліцензію від уряду Великобританії. Агентства Великобританії, США, Франції, Нідерландів та деяких інших країн контролюють експорт ліцензій, оскільки вільне поширення технології шифрування ускладнить боротьбу з терористичними організаціями та організованою злочинністю. Розузгодження між виробниками обладнання для коміркових мереж та урядом Великобританії щодо поширення дозволів на експорт ліцензій призвели до виникнення двох версій алгоритмів шифрування: A5/1 та A5/2. Західно-Європейські країни і деякі інші країни, такі як Гонг-Конг, отримують дозвіл на використання алгоритму A5/1. Дещо слабша версія алгоритму (A5/2) експортується в більшість інших країн. Країни, які на даний час не мають технології криптографії, в майбутньому зможуть отримати алгоритм A5/2.

В стандарті GSM використовуються симетричні алгоритми шифрування, тобто алгоритми, в яких для шифрування і дешифрування використовується один ключ. Наприклад, якщо інформаційне повідомлення позначити змінною P , зашифрований текст - C , шифрування ключем x функцією $E_x()$, а дешифрування ключем x функцією $D_x()$, тоді симетричний алгоритм характеризується наступним чином:

$$\begin{cases} C = E_x(P); \\ P = D_x(Q); \\ P = D_x(E_x(P)). \end{cases}$$

Симетричні алгоритми шифрування надалі можуть поділятися на блочні і стрічкові алгоритми. Блочні шифри шифрують і дешифрують блоки (групи) бітів. Найбільш відомим прикладом блочного шифру є алгоритм DES, який використовує 56-бітовий ключ для шифрування 64-бітового блоку даних, причому 64 бітам вихідного повідомлення відповідає 64 біт зашифрованого тексту.

Стрічкові алгоритми працюють на рівні бітів, тобто кожному зашифрованому біту відповідає один біт вихідного повідомлення. Стрічкові алгоритми реалізовані за допомогою операції виключаюче “АБО” (англ. exclusive-or - XOR) стрічки даних з ключем. Захист стрічкового шифру визначається властивостями ключа шифрування. Випадковий ключ забезпечує надзвичайно надійне одноразове шифрування, а визначений ключ з малим періодом практично не захищає повідомлення від несанкціонованого доступу. Ключовим елементом більшості стрічкових шифрів є Зсувні Регістри з Зворотнім Зв'язком LFSR (англ. Linear Feedback Shift Registers), в яких вакантний біт утворений зсувом є функцією попереднього стану. При правильному визначенні зворотного зв'язку LFSR можуть функціонувати як генератори псевдовипадкових чисел.

Інформація про алгоритми шифрування є конфіденційною і не розголошується, проте все-такі деякі відомості про алгоритм А5 існують:

1. Алгоритм А5 є стрічковим шифром, який складається з трьох LFSR, які мають розрядність 19, 22 і 23. Регістри керуються тактовими імпульсами.
2. Керування тактовими імпульсами є функцією середніх бітів кожного з трьох регістрів.
3. Сума розрядів трьох регістрів становить 64. Тому початковим вмістом регістрів є 64-бітовий ключ.

4. 22-бітовий номер циклу TDMA подається в зсувні регістри.
5. В кожному циклі TDMA утворюється дві 114-бітові ключові послідовності, які сумуються по модулю 2 з відповідними повідомленнями, що передаються по каналах інформаційних потоків “вверх” і “вниз”.
6. Існують припущення, що ефективна довжина ключа в алгоритмі A5 становить 40 біт (замість 64 біт).

В табл. 8.4 приведено підрахунки часу, необхідного для взлому ключів різної довжини.

Таблиця 8.4. Час взлому ключа при брутальній атаці

Довжина ключа в бітах	32	40	56	64	128
Час, необхідний для перебору ключів	1.19 год	12.7 днів	2.291 років	584.542 роки	$10.8 \cdot 10^{24}$ років

Враховуючи, що довжина ключа для алгоритму A5 може становити 40 біт, а “тактичний час життя” телефонної розмови, по загальних спостереженнях, вимірюється в тижнях, надійний захист інформації на короткий час забезпечується.

8.3.2.3. Форматування пакетів

Система GSM - це система з комутацією каналів (GSM 2-го покоління), проте інформація по радіоінтерфейсу передається у вигляді пакетів. Пакет - це блок бітів, який міститься в одному часовому інтервалі TDMA циклу на радіоінтерфейсі. Функцію розміщення інформації в потрібний пакетний формат виконує приймально-передавальний модуль базової станції

В системі GSM передбачено п'ять типів пакетів:

- звичайний пакет;
- пакет частотної корекції;

- синхронізаційний пакет;
- пакет доступу;
- замінний пакет.

Звичайний пакет.

Звичайний пакет використовується для перенесення інформації по каналах інформаційних потоків і каналах управління: BCCH, PCN, AGCH, SDCCH, SACCH і FACCH.

На початку і в кінці звичайного пакету розміщені 3-бітові блоки - кінцеві біти (TB). Ці біти завжди є нульовими (0,0,0) і призначені для вказання еквалайзеру стартових і стопових точок.



Основною частиною пакету є інформаційні біти - 2 блоки по 57 біт захищеної від помилок зашифрованої інформації, які відповідають сигналам мови або даних.

Оскільки при поширенні через радіоінтерфейс інформація може бути пошкоджена, в склад звичайного пакета включена т.зв. тренувальна послідовність - послідовність відомого зразка. На приймальному кінці на основі цієї послідовності еквалайзер створює математичну модель каналу в певний момент часу, що дозволяє йому відновити пошкоджену інформацію. В системі GSM є 8 різних зразків тренувальних послідовностей. По замовчуванню використовується тренувальна послідовність, яка є тотожною кольоровому

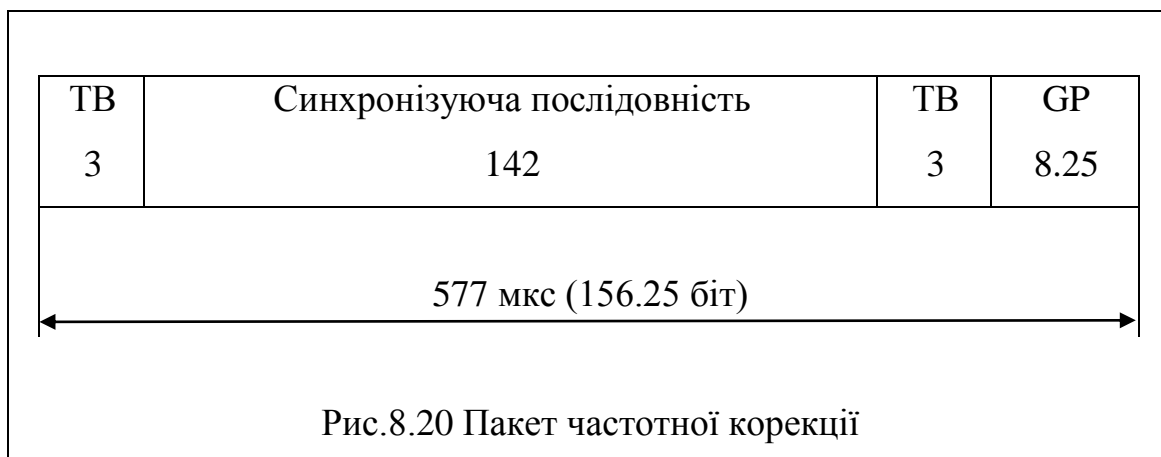
коду базової станції номера BSIC. Дві базові станції, які працюють на одній частоті і розміщені недалеко одна від одної, використовують різні тренувальні послідовності, що дозволяє еквалайзеру розрізнити їх пакети.

Тренувальна послідовність з двох боків відокремлюється від інформаційних блоків бітами-прапорцями (SF). Кожен біт-прапорець відповідає за свою інформаційну послідовність і вказує, чи в даному пакеті передається, наприклад, розмовна інформація, чи інформація сигналізації. Стан бітів-прапорців дозволяє правильно розшифрувати вміст пакетів.

В часовому інтервалі є простір для 156.25 біт, а звичайний пакет містить лише 148 біт. Решті 8.25 біт утворюють т.зв. захисний інтервал (GP). Захисний інтервал зменшує ймовірність перекривання сусідніх пакетів, яке може призвести до втрати інформації.

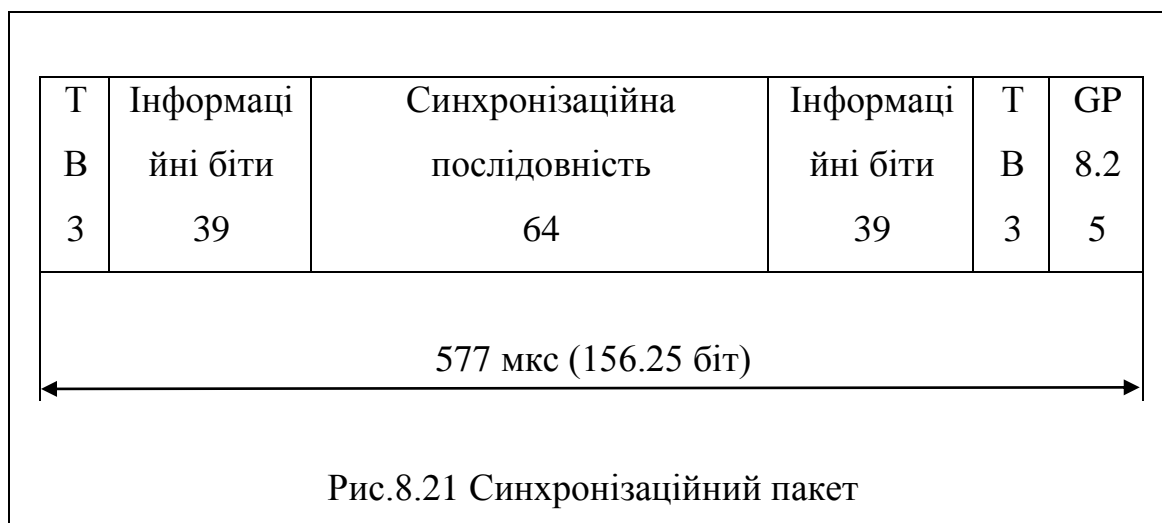
Пакет частотної корекції

Пакет частотної корекції використовується для синхронізації частоти мобільної і базової станції. Періодична синхронізація необхідна, щоб компенсувати похибки генератора і ефекти помноження частоти, які виникають внаслідок швидкості транспортних засобів. Тому базова станція через визначені проміжки часу посилає чистий синусоїдальний сигнал - немодульовану несучу. Для цього в склад пакета частотної корекції входить т.зв. синхронізуюча послідовність (142 нульові біти). Як і в звичайному пакеті, в пакеті частотної корекції містяться два блоки кінцевих бітів (TB) і захисний інтервал (GP).



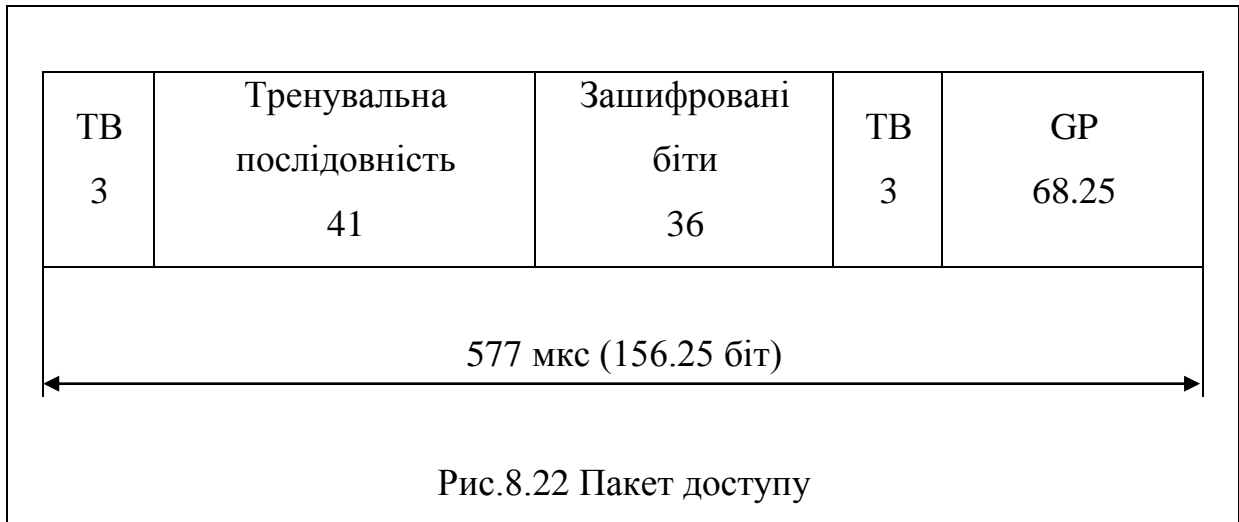
Синхронізаційний пакет

Після виконання процедури синхронізації по частоті, мобільна станція здійснює часову синхронізацію з точністю до біта. Для цього базова станція по широкомовному каналу передає синхронізаційні пакети. В склад синхронізаційного пакета входить 64-бітова синхронізаційна послідовність і два 39-бітові блоки інформаційних біт. Інформаційні біти містять номер циклу TDMA, який використовується для правильного дешифрування інформації, яка міститься в звичайних пакетах, і номер тренувальної послідовності (BSIC), який використовується еквалайзером. Лише після отримання синхронізаційного пакету мобільна станція може пробувати розкодувати інформацію, яку містить BCCH.

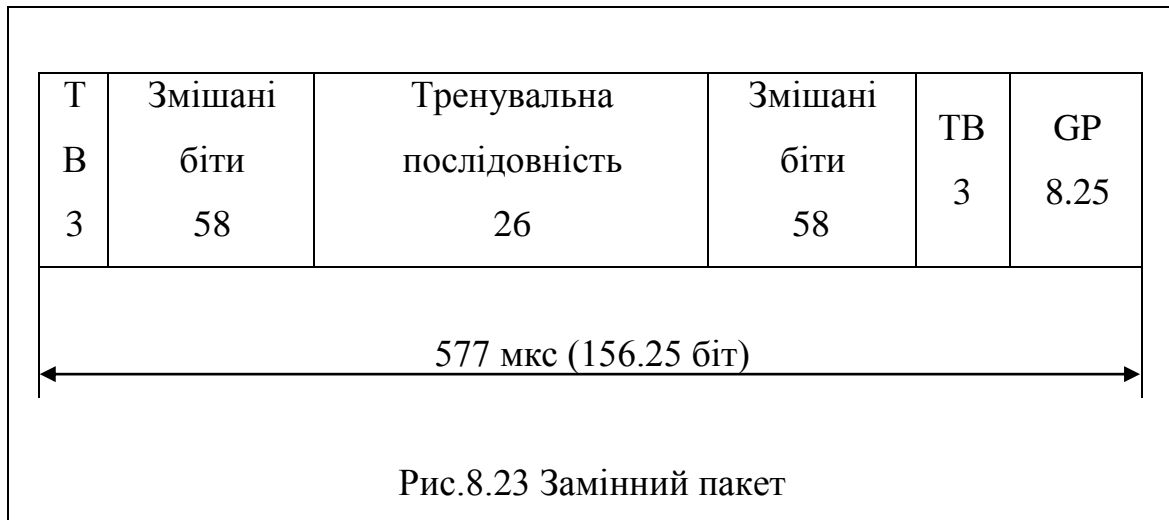


Пакет доступу

Пакет доступу використовується для передачі інформації по каналу довільного доступу RACH. За допомогою цього пакету мобільна станція вимагає доступу до системи. При першому доступі невідома відстань від мобільної до базової станції, тому невідоме запізнення, з яким надійде пакет. Як наслідок пакет має видовжений захисний інтервал (68.25 біт, що відповідає тривалості 252 мкс), який запобігає накладанню пакетів, навіть якщо мобільна станція перебуває на границі комірки ($252 \text{ мкс} \cdot 300000 \text{ км/с} = 2 \cdot 37.75 \text{ км}$).



Еквівалент пакета



8.3.2.4. Гаусівська маніпуляція з мінімальним зсувом

В стандарті GSM використовується гаусівська маніпуляція з мінімальним зсувом (Gaussian Minimum Shift Keying - GMSK). Цей метод являє собою частотну маніпуляцію, при якій несуча частота дискретно - через інтервали часу, кратні періоду T бітової модулюючої послідовності, - приймає значення:

$$f_H = f_0 - F/4$$

$$f_H = f_0 + F/4,$$

де f_0 - центральна частота частотного каналу, що використовується; $F=1/T$ - частота бітової послідовності.

Рознесення частот $\Delta f = f_B - f_H = F/2$ - мінімально можливе, при якому забезпечується ортогональність коливань частот f_B і f_H на інтервалі T тривалості одного біта. При цьому за час T між коливаннями частот f_B і f_H набігає різниця фаз рівна π . Таким чином термін “мінімальний зсув” в назві методу модуляції відноситься до зсуву частоти. Оскільки модулююча частота в цьому випадку рівна $F/2$, а девіація частоти $F/4$, індекс частотної модуляції складає:

$$(F/4)/(F/2)=0.5.$$

Термін “гаусівська” в назві метода модуляції відповідає додатковій фільтрації модулюючої бітової послідовності відносно вузькосмуговим гаусівським фільтром. Саме ця додаткова фільтрація відрізняє метод GMSK від метода MSK (Minimum Shift Keying - MSK - маніпуляція з мінімальним зсувом).

Метод MSK іноді розглядають як метод квадратурної фазової маніпуляції із зміщенням, але із заміною прямокутних модулюючих імпульсів тривалістю $2T$ напівхвильовими відрізками синусоїд та косинусоїд.

В методі MSK вхідна послідовність бітових імпульсів модулятора розбивається на дві послідовності, які складаються відповідно з парних і непарних імпульсів, і модульований сигнал (вихідний сигнал модулятора) протягом наступного n -го біта визначається виразом, який залежить від поточного n -го і попереднього $(n-1)$ -го біта:

$$S(t) = \pm \cos(\pi t/2T) \cos(\omega_0 t) \pm \sin(\pi t/2T) \sin(\omega_0 t) = \pm \cos(\omega_0 t \pm \pi t/2T), \quad (n-1)T \leq t \leq nT.$$

де, $\omega_0 = 2\pi f_0$ - центральна частота каналу, а вибір знаків “плюс” або “мінус” перед відповідними виразами визначаються алгоритмом:

Біти вхідної послідовності модулятора		Знаки в першому представленні		Знаки в другому представленні		Значення несучої частоти
Непарний біт	Парний біт	Знаки першого доданку (cos)	Знаки другого доданку (sin)	Загальний знак виразу (cos)	Знак початкової фази ($\pi/2T$)	
1	1	-	-	-	-	f_H
0	1	+	-	+	+	f_B
0	0	-	-	-	-	f_H
1	0	-	-	-	+	f_B

Слід відмітити, що два біти, які використовуються в якості аргументів закону модуляції, вибираються з врахуванням того, який біт є поточним: якщо поточний біт парний, то другим бітом пари є попередній до нього непарний; якщо поточний біт непарний, то другий біт пари - попередній до нього парний.

З приведенного вище виразу випливає, що поточна фаза модульованого сигналу:

$$\varphi(t) = \omega_0 t \pm \pi t / 2T,$$

тобто набіг фази на інтервалі T одного біта:

$$\Delta\varphi = \pm \pi/2,$$

а миттєва частота як похідна фази:

$$\omega(t) = d[\varphi(t)]/dt = \omega_0 \pm \pi/2T = 2\pi(f_0 \pm F/4),$$

тобто миттєва частота приймає одне з двох значень - f_B або f_H , постійне протягом біта.

Таким чином зміна знаку початкової фази в другій частині виразу означає перехід від f_B до f_H і навпаки. Зміна загального знаку виразу еквівалентна зміні початкової фази на π , що дозволяє зберегти неперервність фази при зміні частоти.

Більш зрозумілим і наочним є графічне пояснення методу MSK.

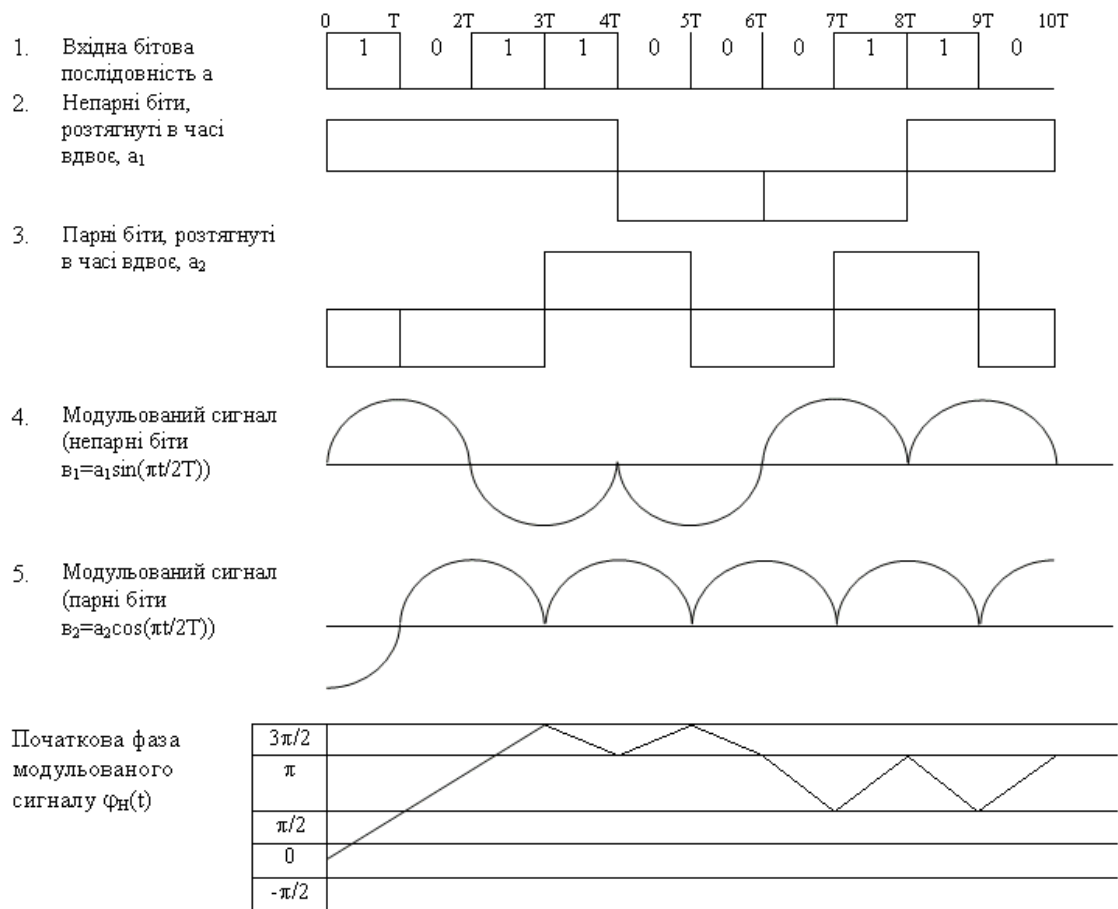


Рис.8.24 Графічне пояснення методу MSK

На першому графіку представлено приклад вхідної бітової послідовності модулятора.

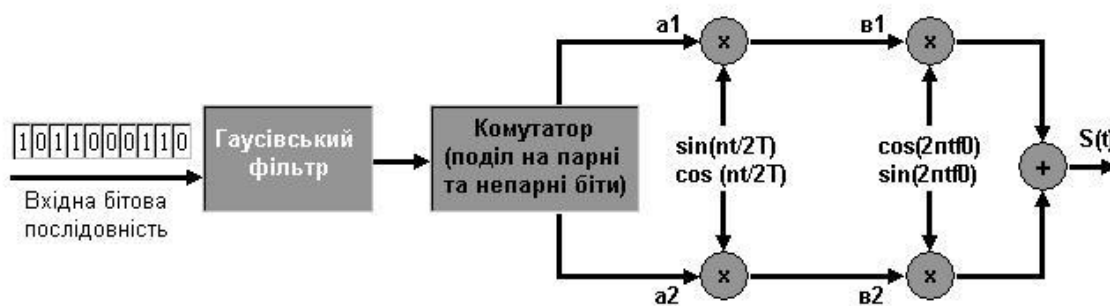
Другий і третій графіки дають відповідно послідовності непарних a_1 і парних a_2 бітів вхідної послідовності, причому тривалість кожного біта збільшена вдвічі в сторону запізнення, тобто кожен біт “розтягнутий” в часі до 2-бітового символу, і для зручності приймається, що послідовності a_1 і a_2 приймають значення +1 та -1 (значення -1 відповідає значенню 0 вхідної послідовності).

В результаті для кожного бітового інтервалу тривалістю T розміщені одне над одним значення a_1 і a_2 дають саме ту пару парного і непарного бітів, які є аргументами закону модуляції.

Четвертий і п'ятий графіки показують форму модулюючих сигналів двох

квадратурних каналів v_1 і v_2 , які отримуються як добуток функцій a_1 і a_2 відповідно на квадратурні низькочастотні сигнали $\sin(\pi t/2T)$ і $\cos(\pi t/2T)$. Слід звернути увагу на стрибкоподібну зміну фази цих сигналів на π ; в моменти зміни знаків a_1 і a_2 .

Кінцевий модульований сигнал згідно отримується як результат перемноження модулюючих сигналів квадратурних каналів з відповідними несучими $\sin(\omega_0 t)$ і $\cos(\omega_0 t)$ і сумування отриманих добутоків. Описаний принцип побудови модулятора MSK пояснюється блок-схемою (поки без врахування першого блоку - гаусівського фільтра G).



З приведених вище аналітичних виразів безпосередньо випливає, що початкова фаза φ_H модульованого сигналу в методі MSK описується лінійно-ламаною кривою, тобто залежність $\varphi_H(t)$ є неперервною, але не гладкою. Додавання гаусівського фільтра, тобто фільтра низьких частот з амплітудною характеристикою в формі гаусівської кривої, приводить до згладження кривої $\varphi_H(t)$ в точках зламу. Ширина смуги B фільтра по рівню 3 дБ вибирається рівною:

$$B = 0.3F,$$

тобто добуток

$$BT = 0.3.$$

Оскільки в стандарті GSM $F=270.833$ кГц, смуга гаусівського фільтра рівна $B=81.3$ кГц.

Введення гаусівського фільтра призводить до звуження головного пелюстка і зниження бокових пелюстків спектру на виході модулятора, чим забезпечується допустимий рівень завад по суміжних частотних каналах.

8.3.2.5. Рознесений прийом

Ідея рознесеного прийому (англійський термін *diversity*) як засобу боротьби з швидкими завмираннями полягає в одночасному використанні декількох сигналів, які відрізняються по певному параметру або координаті, причому рознесення повинно вибиратись таким чином, щоб ймовірність одночасних завмирань всіх сигналів, що використовуються, була набагато менша, ніж ймовірність завмирання одного з них. Іншими словами, ефективність рознесеного прийому тим більша, чим менша кореляція завмирань в складових сигналах. Крім того, важлива також технічна реалізація і простота методу, що використовується.

Можна виділити п'ять варіантів рознесеного прийому:

- з рознесенням в часі (*time diversity*). В цьому випадку використовуються сигнали, зсунуті в часі один відносно другого. Цей метод порівняно легко реалізувати в цифровій формі, проте покращення якості прийому відбувається за рахунок пропускної здатності каналу зв'язку;
- з рознесенням по частоті (*frequency diversity*). В цьому випадку використовуються сигнали, які передаються на декількох частотах, тобто цей метод вимагає розширення смуги частот;
- з рознесенням по напрямку (*direction diversity*). В цьому методі прийом відбувається на декілька антен з розузгодженими (без повного перекриття) діаграмами направленості. В цьому випадку сигнали з виходів різних антен корельовані тим слабше, чим менше перекриття діаграм направленості, проте при цьому одночасно падає і ефективність прийому (інтенсивність сигналу, що приймається), в крайньому випадку для всіх антен, крім однієї;
- з рознесенням по поляризації (*polarization diversity*). В цьому методі дві антени приймають сигнали двох взаємно ортогональних поляризацій.

Практичного значення цей варіант не має, оскільки в НВЧ діапазоні завмирання на різних поляризаціях сильно корельовані;

- з рознесенням в просторі (space diversity). В цьому методі прийом відбувається на декілька антен, рознесених в просторі. Це єдиний метод, який застосовується на практиці, і саме цей метод мається на увазі, коли говориться про рознесений прийом.

Для методу просторового рознесення, тобто для рознесеного прийому, необхідні щонайменше дві приймальні антени, встановлені з деяким зміщенням она відносно одної. З загальних міркувань очевидно, що виграш від рознесеного прийому тим більший, чим більша кількість антен, які використовуються при рознесеному прийомі. Проте із збільшенням кількості антен зростає складність технічної реалізації. Тому на практиці використовується проста схема з двома приймальними антенами на базовій станції. В рухомих станціях рознесений прийом в основному не використовується.

Суттєвими характеристиками системи рознесеного прийому є відстань між антенами і спосіб сумісного використання сигналів з виходів двох антен.

Із збільшенням відстані між антенами зменшується кореляція між флуктуаціями рівня сигналів, що приймаються. Отже, чим більше рознесення антен, тим більша ефективність рознесеного прийому. Проте при збільшенні рознесення зростає складність технічної реалізації, тому на практиці рознесення береться мінімально можливе, при якому рознесений прийом є достатньо ефективний. Реально з врахуванням як аналітичних оцінок, так і емпіричних даних рознесення звичайно складає біля десятка довжин хвиль, тобто порядку декількох метрів.

Що стосується об'єднання сигналів з виходів двох антен, то можна використати наступні способи:

- використання одного (сильнішого) з двох сигналів;
- додетекторне (когерентне) сумування двох сигналів;

- післядетекторне сумування із рівними ваговими коефіцієнтами або із зважуванням, яке забезпечує отримання максимального співвідношення сигнал/шум.

У випадку двох приймальних антен різниця в ефективності цих способів відносно невелика, і на практиці звичайно застосовується найбільш простий з них - вибір максимального з двох сигналів з комутацією виходу відповідного приймача на вхід тракту подальшої обробки.

8.3.2.6. Стрибки по частоті

Використання стрибків по частоті (frequency hopping) є одним з методів розширення спектру. Ідея методу стрибків по частоті полягає в тому, що несуча частота для кожного фізичного каналу періодично змінюється, тобто кожен фізичний канал періодично переводиться на новий частотний канал. Оскільки релеєвські завмирання є частотно-селективними, то, якщо при роботі на деякій частоті мало місце релеєвське завмирання, при зміні робочої частоти на 100...300 кГц завмирання з великою ймовірністю не буде. Як наслідок, при використанні стрибкоподібної перенастройки частоти суттєво зменшується ймовірність довготривалих завмирань, а також в поєднанні з перемішуванням зменшується ймовірність групових помилок, а з одиночними помилками можна успішно боротись за допомогою завадостійкого каналного кодування.

Розрізняють повільні і швидкі стрибки по частоті. При повільних стрибках період зміни частоти набагато більший тривалості символу повідомлення, що передається, а при швидких стрибках - набагато менше тривалості символу. В стандарті GSM використовуються повільні стрибки з перемиканням частоти в кожному наступному циклі.

Стрибки по частоті - це ефективний метод боротьби із спільноканальними інтерференційними завадами. Припустимо дві комірки, які розміщені близько одна від одної, працюють на однакових частотах: f_0 , f_1 , f_2 . В такому випадку вони постійно будуть створювати одна одній завади. При використанні стрибків по частоті ймовірність використання однієї частоти обома комірками

значно знизиться (рис. 8.25).

MS в комірці А	f_0	f_2	f_0	f_1	f_0	f_1	f_1	f_2	f_0	f_1	f_2	f_2
MS в комірці В	f_2	f_1	f_1	f_2	f_0	f_0	f_1	f_2	f_0	f_2	f_1	f_0
Інтерференція					×		×	×	×			

Рис.8.25 Пониження інтерференції при використанні стрибків по частоті.

Зміна частоти в межах доступного діапазону може бути як регулярною (циклічною), так і псевдовипадковою, причому є 63 зразки псевдовипадкових алгоритмів. Слід відмітити, що режим роботи із стрибками по частоті не є обов'язковим. Цей режим доцільно використовувати у випадку, коли комірці виділено три і більше частот: чим більше частот, тим ефективніша боротьба з спільноканальними інтерференційними завадами. У випадку циклічного алгоритму і трьох частот в комірці період повторення послідовності частот рівний трьом стрибкам; при використанні псевдовипадкового алгоритму період повторення становить приблизно 6 хвилин.

Існує два відмінні типи стрибкоподібної перенастроювання частоти: синтезаторна і смуги частот. При синтезаторній стрибкоподібній перенастроюванні частоти вихідна частота передавача настроюється на визначений канал, відбувається посилка пакету інформації, після чого передавач настроюється на інший канал. При стрибкоподібній перенастроюванні смуги частот є декілька передавачів, які настроєні на свої частоти. Кожен наступний пакет, який потрібно передати, скеровується до нового передавача.

8.3.2.7. Обробка часового випередження

В системі GSM поряд з частотним розділенням каналів використовується множинний доступ з часовим розділенням каналів. Це дозволяє одночасне використання однієї частоти декількома мобільними станціями. Проте мобільна

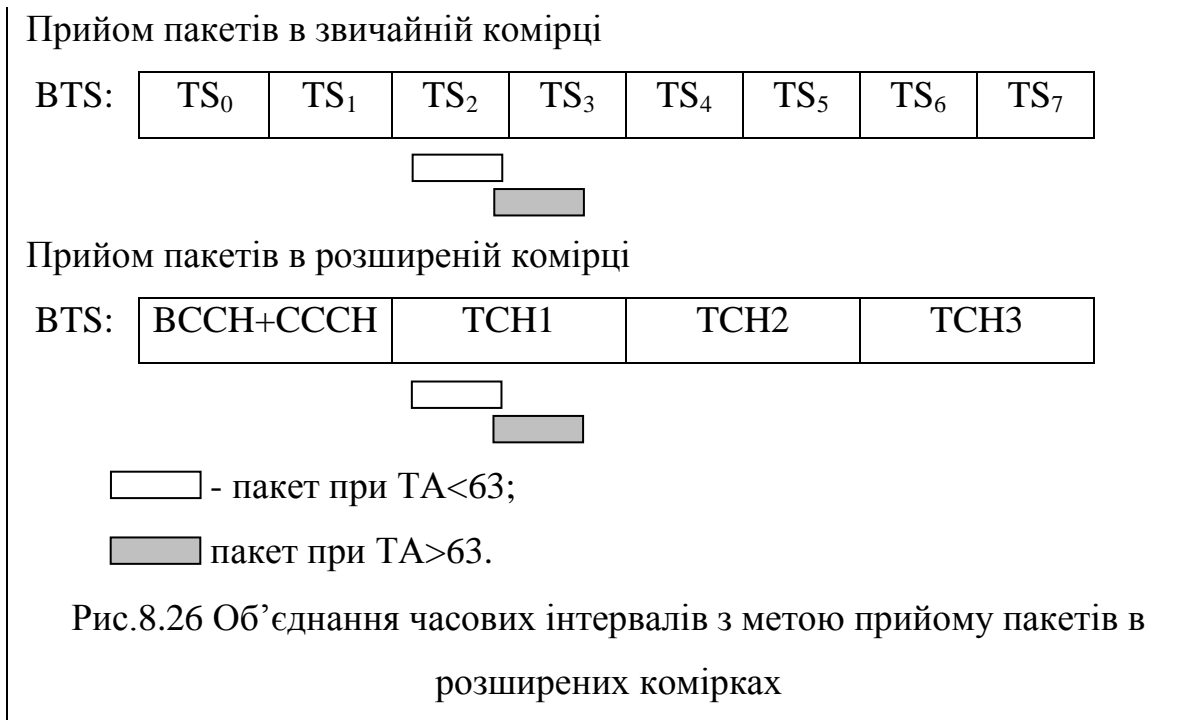
станція може передавати лише протягом чітко визначеного часового інтервалу. З іншої сторони базова станція в кожен інший часовий інтервал отримує пакет від іншої мобільної станції. Проблема виникає, коли мобільна станція перебуває на значній відстані від BS. В такому випадку час поширення пакета стає співрозмірний з тривалістю часового інтервалу, і як наслідок пакет прибуває на базову станцію з запізненням, що призводить до перекривання пакетів в сусідніх часових інтервалах, тобто до втрати інформації. Щоб запобігти накладанню пакетів в сусідніх часових інтервалах використовується часове випередження (англ. Timing Advance) - визначається час, на який мобільна станція повинна раніше почати передачу, щоб пакет дійшов до базової станції в потрібний часовий інтервал. Розрахунок часового випередження здійснює базова станція. При першому доступі мобільна станція передає пакет доступу по каналу RACH. Базова станція визначає запізнення пакету і передає значення часового випередження до MS по сигналізаційному каналу SACCH. Надалі базова станція буде посилати до MS числові значення в межах від 0 до 63, вказуючи мобільній станції кількість тактових синхроімпульсів (3.69 мкс), яка повинна бути перед часовим інтервалом, який виділений MS для передачі. Часове випередження може коливатись в межах від 0 до 233 мкс, що є достатнім для комірок, радіус яких не перевищує 35 км.

В деяких випадках є необхідність в розширенні меж покриття, наприклад для покриття трас, малозаселених районів і т.д. Стандарт GSM передбачає можливість подвоєння радіусу комірки, тобто часове випередження розширеної комірки буде становити 126 бітових інтервалів.

Мобільна станція може компенсувати часове випередження лише в 63 бітові інтервали. Щоб запобігти перекриванню пакетів в розширених комірках використовується об'єднання двох фізичних часових інтервалів в один SSCN або TSN канал (рис. 8.26).

Об'єднання часових інтервалів запобігає перекриванню пакетів, які надходять з запізненням, проте зменшує ємність мережі, оскільки об'єднання призводить до зменшення кількості розмовних каналів, тобто до зменшення

кількості одночасних розмов.



8.3.2.8. Перервна передача

Обробка розмовної інформації в стандарті GSM здійснюється в рамках прийнятої системи перервної передачі розмови DTX, яка забезпечує вмикання передавача тільки тоді, коли абонент починає розмову і відключає його в паузах і в кінці розмови. Структурна схема обробки розмовної інформації приведена на рис. 8.27.

Перервна передача може використовуватись як по каналу “вверх”, так і по каналу “вниз”. При використанні по каналу “вверх”, тобто в мобільній станції, дана функція дозволяє суттєво понизити споживання енергії від акумуляторних батарей. При використанні на базовій станції, тобто по каналу “вниз”, перервна передача дозволяє понизити інтерференційні завади, за рахунок переключення вільних каналів в пасивний режим (тобто відсутнє випромінювання).

Для спрощення надалі розглядається реалізація перервної передачі в мобільній станції.

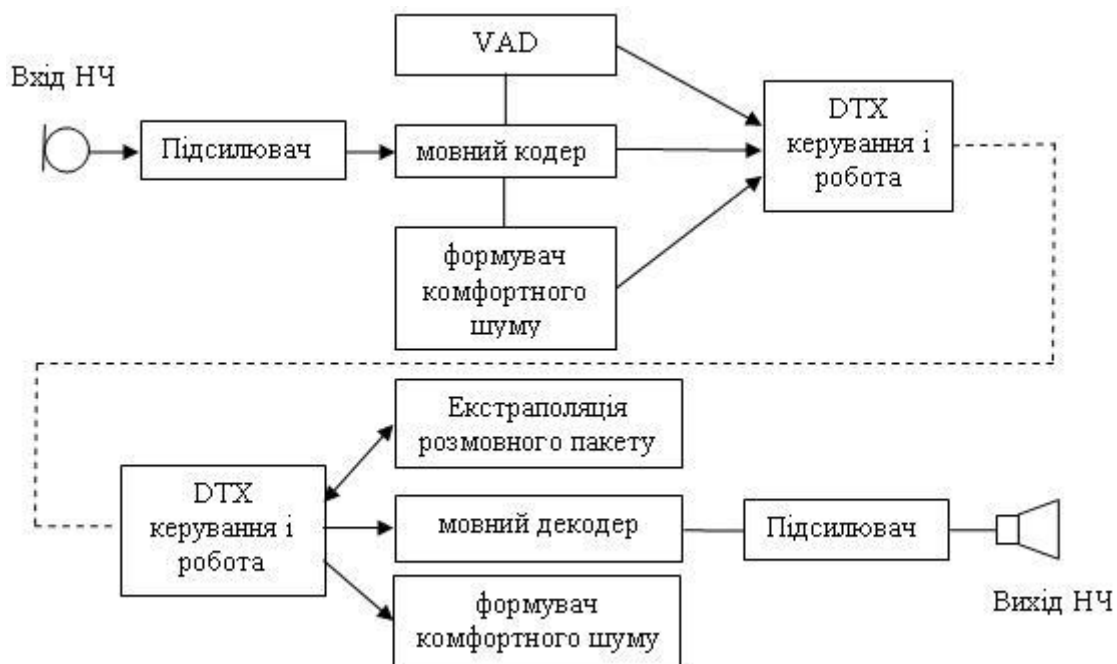


Рис.8.27 Структурна схема процесу обробки розмовної інформації

Основним пристроєм при реалізації перервної передачі є детектор активності розмови (VAD). Головна задача при проектуванні VAD - забезпечити надійну відмінність між умовою активного і пасивного каналів. Якщо канал вільний протягом певного часу, його можна заблокувати. Оскільки середня активність розмови абонента нижча 50% це може призвести до суттєвої економії енергії акумуляторної батареї.

До пристроїв VAD ставляться наступні основні вимоги:

- мінімальна ймовірність тривоги при дії лише шуму з високим рівнем;
- висока ймовірність правильного виявлення розмови низького рівня;
- висока швидкість розпізнавання розмови;
- мінімальний час затримки вмикання.

В стандарті GSM прийнята схема VAD з обробкою в частотній області. Структурна схема приведена на рис. 8.28.

Робота VAD базується на розрізненні спектральних характеристик розмови і шуму. Вважається, що фоновий шум є стаціонарний протягом відносно великого проміжку часу, його спектр також мало змінюється в часі. VAD визначає спектральні відхилення вхідного сигналу від спектру фонового шуму.

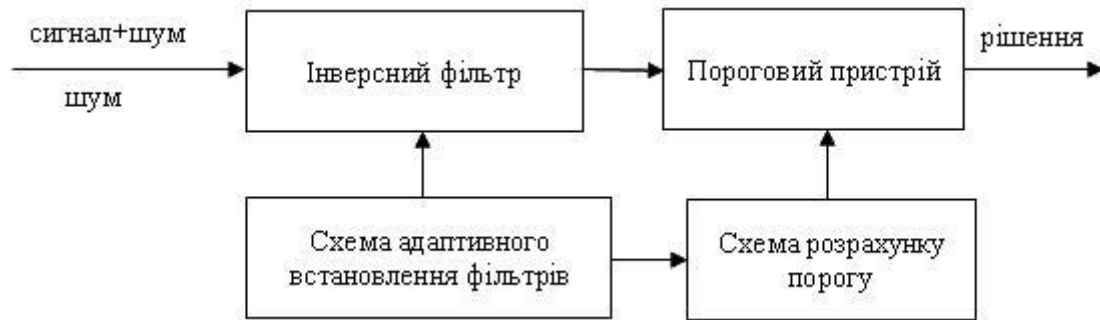


Рис.8.28 Структурна схема VAD

Ця операція здійснюється інверсним фільтром, коефіцієнти якого встановлюються відносно впливу на вході тільки фонового шуму. При наявності на вході розмови і шуму інверсний фільтр здійснює подавлення компонентів шуму і знижує його інтенсивність. Енергія суміші сигнал/шум на виході інверсного фільтра порівнюється з порогом, який встановлюється в період дії на вході лише шуму. Цей поріг перебуває вище рівня енергії шуму. Перевищення порогового рівня приймається за наявність на вході суміші (сигнал+шум). Коефіцієнти інверсного фільтра і рівень порогу змінюються в часі залежно від поточного значення рівня шуму при дії на вході лише шумового сигналу. Оскільки ці параметри (коефіцієнти і поріг) використовуються детектором VAD для виявлення розмови, сам VAD не може на цій же основі приймати рішення, коли їх змінювати. Це рішення приймається вторинним VAD на основі порівняння огинаючих спектрів в послідовні моменти часу. Якщо вони аналогічні протягом відносно тривалого проміжку часу, припускається, що має місце шум, і коефіцієнти фільтра та шумовий поріг можна змінити, тобто адаптувати під поточний рівень і спектральні характеристики вхідного шуму. VAD з обробкою в спектральній області вдало поєднується з мовним кодеком PRE/LPT-LPC, оскільки в процесі LPC аналізу вже визначається огинаюча спектру вхідного впливу, необхідна для роботи вторинного VAD.

В паузах під час розмови відбувається формування т.зв. комфортного шуму. Коли детектор активності мови в передавачі виявляє, що розмова

відсутня, передавач залишається ввімкнутим ще протягом наступних п'яти розмовних кадрів. Під час перших чотирьох з них характеристики фонового шуму оцінюються шляхом усереднення коефіцієнтів підсилення і коефіцієнтів фільтра LPC аналізу. Ці усереднені значення передаються в наступному п'ятому кадрі, в якому міститься інформація про комфортний шум (SID кадр). В мовному декодері комфортний шум генерується на основі LPC аналізу SID кадра. Щоб виключити дратуючий вплив модуляції шуму, комфортний шум повинен відповідати по амплітуді і спектру реальному фоновому шуму в місці передачі. В умовах коміркового зв'язку фоновий шум може постійно змінюватись. Це означає, що характеристики шуму повинні передаватись не тільки в кінці кожного розмовного інтервалу, але і в паузах при розмові так, щоб між реальним і фоновим шумом в наступних кадрах не було б різких розузгоджень. Тому SID кадри посилаються кожні 480 ms під час пауз при розмові. Динамічна зміна характеристик комфортного шуму забезпечує натуральність відтворення розмовного повідомлення при використанні системи перервної обробки розмови.

Система перервної обробки розмовної інформації передбачає відновлення розмовної інформації, яка була з певних причин втрачена. Встановлено, що втрата одного розмовного кадру може бути значно компенсована шляхом повторення попереднього фрагменту. При значних по тривалості перервах в зв'язку попередній фрагмент більше не повторюється, і сигнал на виході розмовного декодера поступово заглушується, щоб вказати абоненту на розрив каналу. Це саме відбувається і з SID кадром. Якщо SID кадр втрачений під час розмовної паузи, то формується комфортний шум з параметрами попереднього SID кадру. Якщо втрачається ще один SID кадр, то комфортний шум поступово заглушується.

8.3.2.9. Вирівнювання

Вирівнювання - це метод, який використовується в вузькосмугових TDMA-системах коміркового зв'язку для компенсації міжсимвольних

спотворень. У випадку, коли передані сигнали, які відбиваються об'єктами далеко від приймальної антени, досягають антени пізніше, ніж вихідний сигнал, має місце часова дисперсія. Сигнали стають розсіяними в часі, і символи суміжних каналів накладаються один на одного. Вирівнювання - це процес, призначений для подолання часової дисперсії. Термін вирівнювання походить з англійської мови (equalizing - буквально вирівнювання), і в даному випадку під цим терміном розуміють компенсацію тієї різниці ходу між складовими променями при багатопроменевому поширенні, яка призводить до міжсимвольної інтерференції. Еквалайзер по своїй суті - це адаптивний фільтр, який настраюється таким чином, щоб сигнал на його виході був максимально очищений від міжсимвольних спотворень, які містяться в вхідному сигналі.

Блок вирівнювача (еквалайзера) входить в склад приймального тракту, але він не впливає на склад і форму представлення інформації, що передається по радіоінтерфейсу. Тому схема і характеристики не тільки не регламентуються ніякими стандартами, зокрема стандартом GSM, але і взагалі блок еквалайзера може не включатись в склад приймального тракту апаратури коміркового зв'язку. Іншими словами, як включення еквалайзера в склад апаратури, так і вибір його схеми є виключно справою компанії-виробника.

В системі GSM як правило використовується вирівнювач Вітербі, робота якого складається з двох етапів (рис. 8.29).

На першому етапі еквалайзер створює модель каналу. Необхідні для цього дані містяться в звичайних пакетах: всередині пакета є тренувальна послідовність відомого зразка з хорошими автокореляційними характеристиками. Саме на основі цієї послідовності еквалайзер створює модель каналу. Тренувальна послідовність відома в приймачі. При проходженні через канал зв'язку деякі біти можуть бути пошкоджені. На основі порівняння прийнятих і відомих тренувальних послідовностей еквалайзер обчислює модель каналу в різні моменти часу.

На другому етапі, після того, як модель каналу обчислена, пристрій порівняння визначає різницю між прийнятими і відомими інформаційними

блоками (враховуючи модель каналу). Далі пристрій Вітербі шляхом перебору всіх відомих комбінацій інформаційних бітів вибирає пакет, який найбільше відповідає прийнятій послідовності, тобто пакет, для якого різниця на виході пристрою порівняння є мінімальна. Оскільки перебір всіх комбінацій (2^{114} степені) на практиці не можна використовувати через обмежений час обробки прийнятого пакету, то використовується алгоритм Вітербі, який дозволяє обмежити кількість комбінацій, що перевіряються. Використання еквайзера Вітербі дає змогу в приймачі одночасно виконувати і демодуляцію, і декодування.

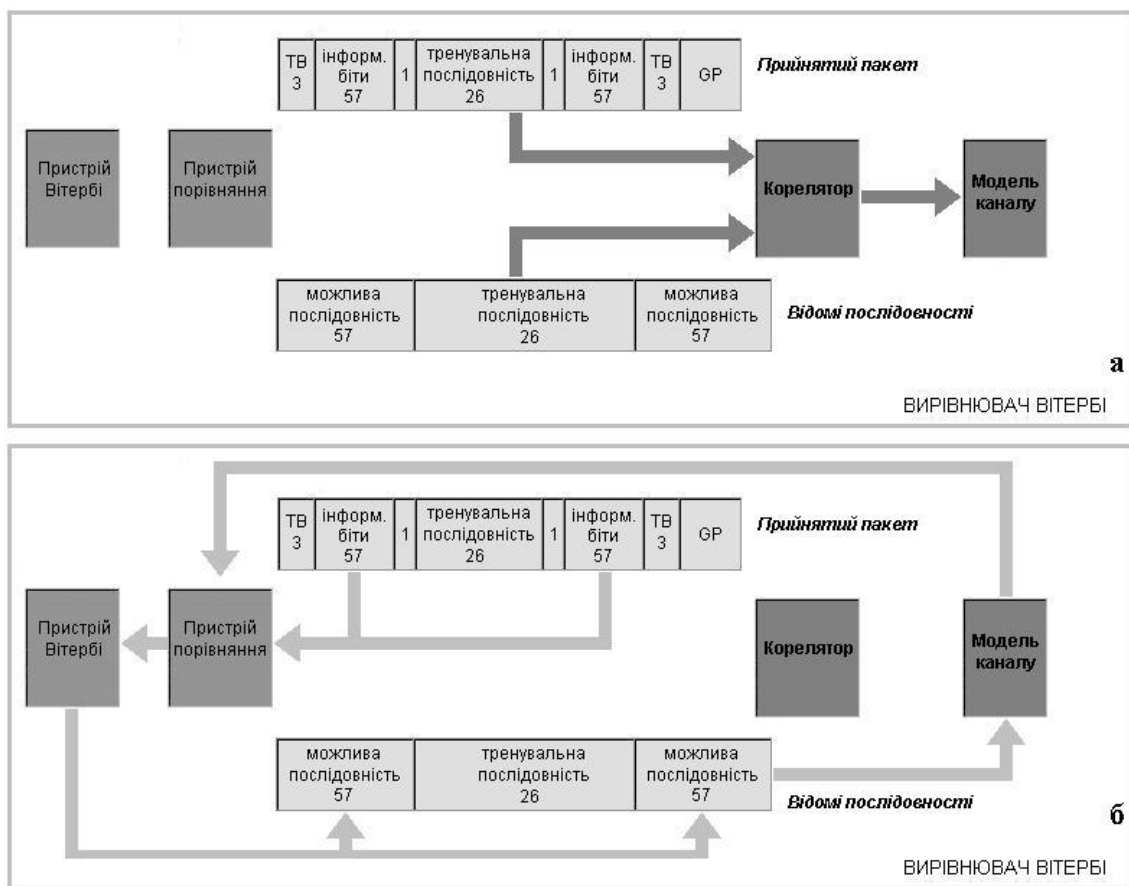


Рис.8.29 Принцип роботи вирівнювача Вітербі:

а) створення моделі каналу; б) вибір послідовності

8.3.2.10. Звітування контролеру базових станцій

Контролер базових станцій керує радіомережею на основі звітів про вимірювання на радіоінтерфейсі, які йому передає базова станція. Є два типи

звітів: звіти, які містять результати вимірювань мобільної станції; звіти, які містять результати вимірювань базової станції.

Мобільна станція проводить вимірювання в одному з двох режимів: холостому або активному.

Холостий режим має місце тоді, коли мобільна станція не перебуває в режимі виклику, але її живлення ввімкнуте. В цьому режимі MS вимірює всі радіочастоти в системі і зберігає рівень сигналу для кожної з них. Мобільна станція настроюється на частоту з найбільшим рівнем сигналу і визначає чи це ВССН-несуча. Якщо це не так, то MS настроюється на наступну частоту і знову перевіряє чи це ВССН несуча. При виявленні такої частоти мобільна станція виконує процедури частотної і циклової синхронізації. Мобільна станція постійно оновлює звіт про вимірювання, який містить середні значення рівня сигналу сусідніх комірок, а також рівень сигналу і коефіцієнт помилок в обслуговуючій комірці.

Активний режим має місце тоді, коли мобільна станція зв'язується з мережею. В цьому режимі MS виконує вимірювання потужності і якості сигналу обслуговуючої базової станції, а також потужності прийнятих сигналів від сусідніх базових станцій. В мобільній станції всі вимірювання зберігаються протягом 480 ms, і для всіх змінних визначається середнє значення за цей проміжок часу. Далі розрахунки передаються базовій станції у вигляді звіту.

На рис. 8.30 показано принцип вимірювання мобільною станцією на радіоінтерфейсі.

1. Мобільна станція приймає і вимірює рівень сигналу від обслуговуючої базової станції в часовому інтервалі 2.
2. Мобільна станція передає.
3. Мобільна станція вимірює рівень сигналу хоча б однієї з сусідніх комірок.
4. Мобільна станція зчитує код BSIC на каналі SCH (часовий інтервал 0) для однієї з сусідніх комірок.

Результати вимірювань про шість сусідніх комірок з найвищим середнім значенням рівня сигналу і допустимими BSIC передаються до базової станції по

каналу SACCH. Поки мобільна станція не засинхронізована з сусідніми комірками, вона не знає коли буде нульовий часовий інтервал на BCCH несучій. Тому вона проводить вимірювання протягом розширеного проміжку часу. Це виконується протягом холостого циклу.

Звіт про вимірювання посилається по каналу SACCH кожні 480 ms і включає наступні дані:

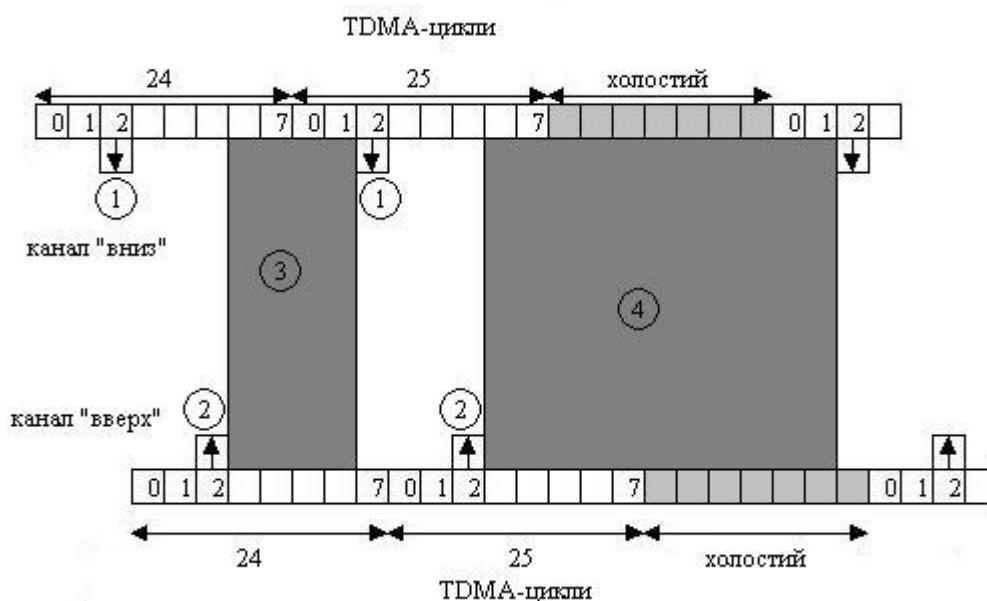


Рис.8.30 Принцип вимірювання мобільною станцією

- рівень сигналу в обслуговуючій комірці;
- потужність, яка споживається мобільною станцією;
- фазовий зсув синхросигналу;
- інформацію про використання/невикористання перервної передачі;
- якість в обслуговуючій комірці;
- рівні сигналів від сусідніх комірок;
- кількість сусідніх комірок, про які надсилається звіт;
- BCCH частоти сусідніх комірок;
- BSIC сусідніх комірок.

8.3.3. Архітектура базової станції

Базові станції RBS 2000 - це друге покоління базових станцій Ericsson. Вони характеризуються низькими загальними витратами протягом періоду експлуатації, зручністю експлуатації, простотою інсталяції, швидким розгортанням; гнучка конструкція передбачає можливість багатьох конфігурацій і розширень; RBS 2000 можуть встановлюватись як всередині, так і зовні приміщень; передбачають підтримку ієрархічних структур до трьох рівнів: макрокомірки — для зони, мікрокомірки — на рівні вулиць, пікокомірки — для закритих приміщень. Апаратне забезпечення базової станції складається з ряду замінних модулів і шин (рис. 8.31).

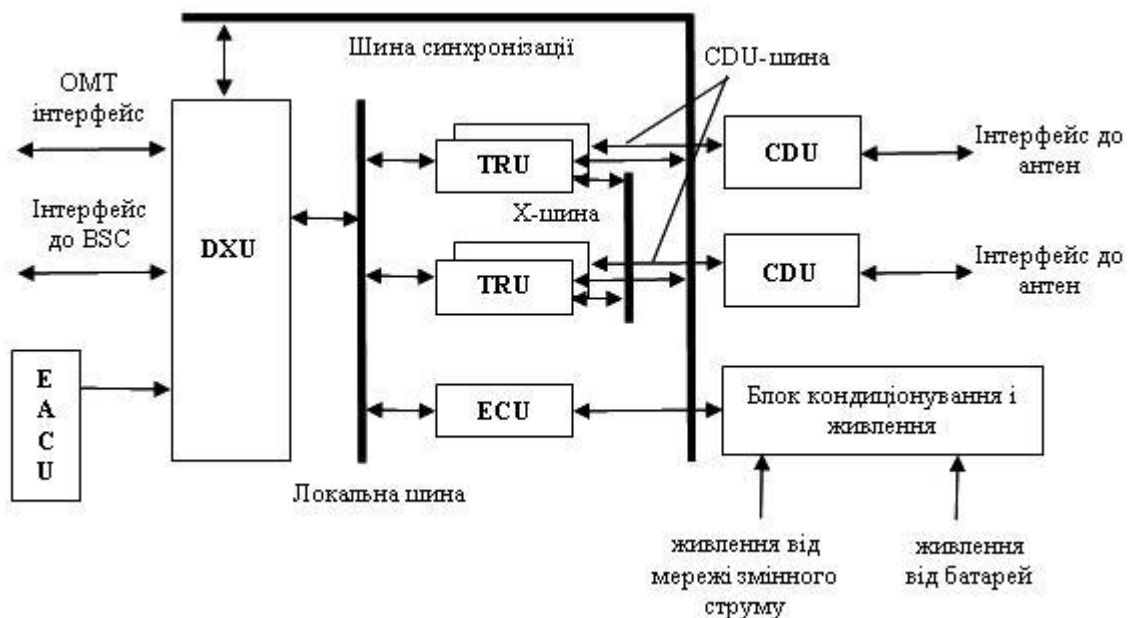


Рис.8.31 Замінні модулі і шини базової станції RBS 2000

Розподільчий комутатор.

Розподільчий комутатор (DXU) - це центральний блок управління базової станції. Основними функціями DXU є:

- крос-комутація часових інтервалів потоків 2 Мбіт/с з відповідними прийомо-передавачами;
- інтерфейс до контролера базових станцій (2 Мбіт/с);
- синхронізація інших приймально-передавальних модулів базової станції;
- обробка до 16 зовнішніх аварійних сигналів (пожежа, сигналізація і т.д.);

- дистанційне управління процесом передачі;
- інтерфейс ОМТ через RS 232;
- концентрація керуючих зв'язків (LAPD сигналізація) в напрямку BSC;
- зберігання інсталяційної бази даних, яка містить інформацію про конфігурацію стійки.

Розподільчий комутатор складається з чотирьох частин:

- ІКМ-частина;
- центральний процесор (CPU);
- центральний синхронізуючий пристрій (CTU);
- HDLC-концентратор.

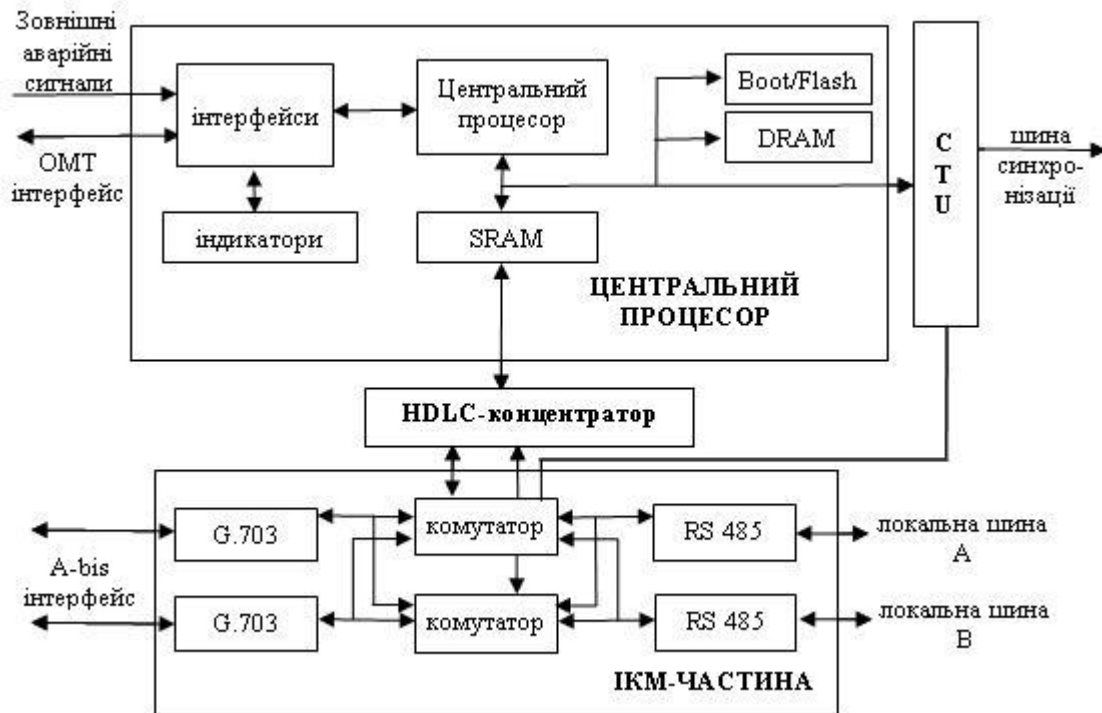


Рис.8.32 Блок-схема DXU

ІКМ-частина призначена для “витягування” часових інтервалів з ІКМ-лінії A-bis інтерфейсу і передавання їх через локальну шину приймально-передавальному блоку базової станції. До DXU можна під'єднувати дві ІКМ-лінії, що дозволяє підвищити пропускну здатність або дає можливість резервування ліній передачі. Крім того, ІКМ-частина виділяє часові інтервали,

що не використовуються базовою станцією, для інших BTS (по ІКМ-лінії з контролером базових станцій може з'єднуватись до 5 базових станцій).

Центральний процесор відповідає за управління ресурсами в межах базової станції. Його основними функціями є:

- завантаження і зберігання програмного забезпечення замічних модулів;
- інтерфейс з ОМТ;
- внутрішня і зонішня системи індикації аварії;
- “витягування” з ІКМ-потоків інформації LAPD сигналізації.

Центральний синхронізуючий пристрій генерує стабільні опорні імпульси для приймально-передавального модуля базової станції.

HDLC-концентратор забезпечує на А-bis інтерфейсі LAPD-концентрацію і LAPD-мультиплексування, які дозволяють більш ефективно використовувати А-bis інтерфейс.

Блок підключення зовнішньої системи індикації аварії

Блок підключення зовнішньої системи індикації аварії (EACU) - це модуль, до якого надходять двійкові сигнали від зовнішніх пристроїв (пожежні датчики, датчики руху, температури і ін.). Ці сигнали розрізняються ОМТ і передаються до контролера базових станцій через LAPD-сигналізацію по А-bis інтерфейсу. EACU дає можливість оператору наглядати за всіма базовими станціями з одного пункту і виключає необхідність постійного відвідування базових станцій.

Приймально-передавальний модуль

Приймально-передавальний модуль (TRU) включає в себе приймач (RX), передавач (TX) і цифровий блок прийомо-передавача (TRUD). Кожен приймально-передавальний модуль може обслуговувати одночасно декілька мобільних станцій (максимум 7), оскільки TRU працює в системі мультиплексування з часовим ущільненням каналів.

Приймально-передавальний модуль виконує наступні функції:

- радіопередача;
- радіоприйом;
- обробка сигналів радіоінтерфейсу;
- управління прийомом і передачею.

Блок-схема приймально-передавального модуля представлена на рис. 8.33. Цифровий блок прийомо-передавача (TRUD) виконує роль контролера прийому і передачі. Він взаємодіє з іншими компонентами RBS через локальну шину, CDU-шину, шину синхронізації і X-шину. TRUD виконує обробку сигналів: кодування, шифрування, пакетне форматування і вирівнювання Вітербі.

Передавальний блок (TX) виконує модуляцію і підсилення сигналу, що надійшов по каналу “вниз”.

Приймальний блок виконує демодуляцію сигналу, що надійшов по каналу “вверх” і направляє демодульований сигнал в TRUD.

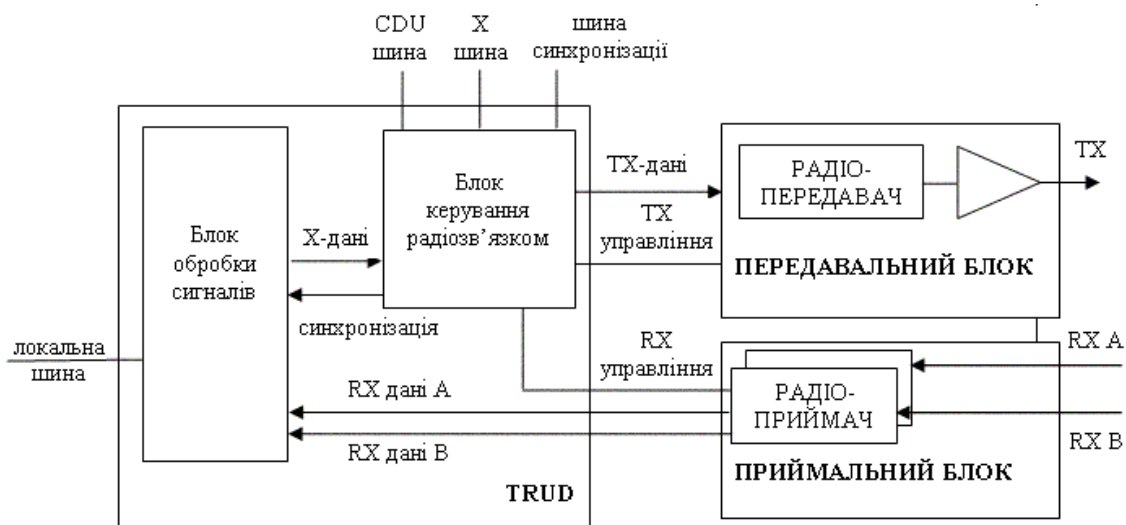


Рис.8.33 Спрощена блок-схема TRU

Блок об'єднання і розподілення

Блок об'єднання і розподілення (CDU) - це інтерфейс між приймально-передавальним модулем і системою антен. Він дозволяє сумісне використання антен декількома TRU.

CDU об'єднує сигнали, передані від різних передавачів, і розподіляє

прийняті сигнали між всіма приймачами. Всі сигнали фільтруються перед передачею і після прийому за допомогою смугопропускаючих фільтрів. Основними функціями апаратних засобів CDU є:

- TX-об'єднання;
- RX-підсилення;
- дистанційне управління системою антен;
- фільтрація радіочастот;
- захист TRU від відбитої енергії.

Об'єднувач (англ. combiner) - це пристрій, який дозволяє під'єднати до однієї антени декілька передавачів. Це забезпечується шляхом передачі енергії радіочастот кожного з передавачів при блокуванні енергії радіочастот всіх інших передавачів, що використовують спільну антену.

Існує два типи об'єднувачів: гібридні і фільтерні.

Гібридний об'єднувач - це широкосмуговий фільтр, що дозволяє передачу всіх частот в передавальній смузі в прямому напрямку. Кожен гібридний об'єднувач може об'єднувати два вхідні сигнали передавача в один вихідний сигнал. Такий об'єднувач має 3 дБ вносимих втрат.

Фільтерний об'єднувач - це вузькосмуговий пристрій, який дозволяє передачу тільки однієї вибраної частоти. Такий об'єднувач має постійні вносимі втрати (понад 4 дБ) незалежно від кількості передавачів в системі. Для налаштування фільтерного об'єднувача на вибрану частоту використовується "ступінчастий" двигун. Таке налаштування займає приблизно 5-7 секунд.

Незалежно від того, який тип CDU використовується, базові станції RBS 2000 для передачі і прийому використовують одні і ті ж антени. Це можливо лише завдяки дуплексним фільтрам.

Дуплексний фільтр складається з двох смугопропускаючих фільтрів, які використовуються відповідно для каналу "вверх" і "вниз". Це дозволяє під'єднати канали приймальної і передавальної антен до звичайної антени, оскільки сигнал з передавача не може пройти через приймальний смугопропускаючий фільтр, а сигнал з передавача - через передавальний

фільтр.

Блок керування енергією

Блок керування енергією ECU (англ. Energy Control Unit) це модуль, який дистанційно регулює стан навколишнього середовища всередині стійки і контролює енергетичне обладнання. ECU керує блоком живлення, запобіжниками, вентиляторами, охолоджувачами, нагрівачами.

Системні шини

Взаємозв'язок між замінними модулями базової станції RBS 2000 здійснюється по чотирьох системних шинах:

- *Локальна шина* забезпечує внутрішній зв'язок між DXU, TRU і ECU. По ній передається TRX-сигналізація, розмовна інформація і дані.
- *Шина синхронізації* містить синхронізаційну інформацію, яка необхідна для передачі по радіоінтерфейсу. Ця інформація поступає від центрального синхронізуючого пристрою розподільчого комутатора до приймально-передавального модуля.
- *X-шина* містить розмовну інформацію і дані, які передаються у вигляді пакетів до приймально-передавальних модулів. Вона використовується при стрибкоподібній перенастрої частоти, коли в кожному наступному циклі на одному і тому ж часовому інтервалі використовується інша несуча частота (передавач).
- *CDU-шина* з'єднує блок об'єднання і розподілу з приймально-передавальними модулями. По ній передаються аварійні сигнали і особлива інформація, яка використовується при взаємодії CDU і TRU.

8.4. Контролер базових станцій

8.4.1. Архітектура контролера базових станцій

Контролер базових станцій (BSC) - це основний мережевий елемент системи базової станції. Він керує всіма діями системи, що пов'язані з

радіозв'язком. BSC постійно підтримує контакт з кожним абонентом, керує радіозв'язком, блокує пошкоджені лінії до базових станцій, здійснює комутацію інформаційних потоків.

В склад контролера базових станцій входять наступні функціональні модулі (рис. 8.34):

- централізований блок управління;
- комутатор;
- блок сигналізації;
- інтерфейсні модулі.

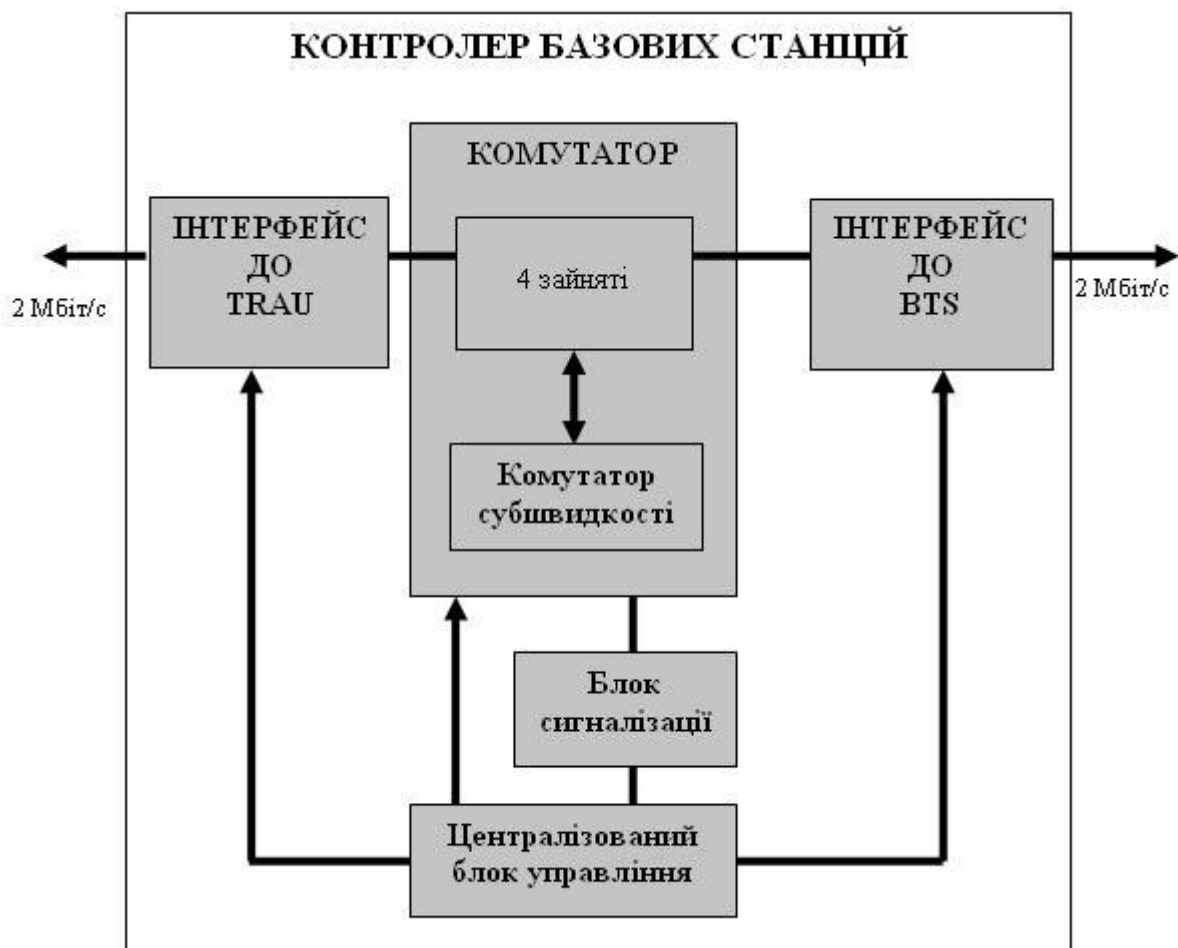


Рис.8.34 Основні функціональні модулі контролера базових станцій

Централізований блок управління

Адміністративні функції BSC реалізовані в централізованому блоці управління, який керує всіма функціональними модулями BSC і наглядає за

встановленням з'єднань та роз'єднаннями в комутаційному полі.

Основним елементом системи управління є центральний процесор (CP), який здійснює обробку даних, відповідає за запуск, збереження і виконання програм. Крім того, він керує великою кількістю регіональних процесорів (RP), які виконують початкову обробку даних, що надходять від інших пристроїв BSC і розвантажують таким чином CP. Центральний процесор є дубльований: в звичайному режимі роботи керування здійснює сторона А, а сторона В перебуває в “гарячому” резерві. Фактично обидві сторони виконують одну і ту ж роботу. Різниця полягає лише в тому, що RP ігнорують сигнали від резервної сторони. Результати роботи обох сторін неперервно порівнюються, тому будь-яка помилка виявляється відразу. У випадку виявлення помилки робоча сторона зупиняється і керування передається резервній стороні.

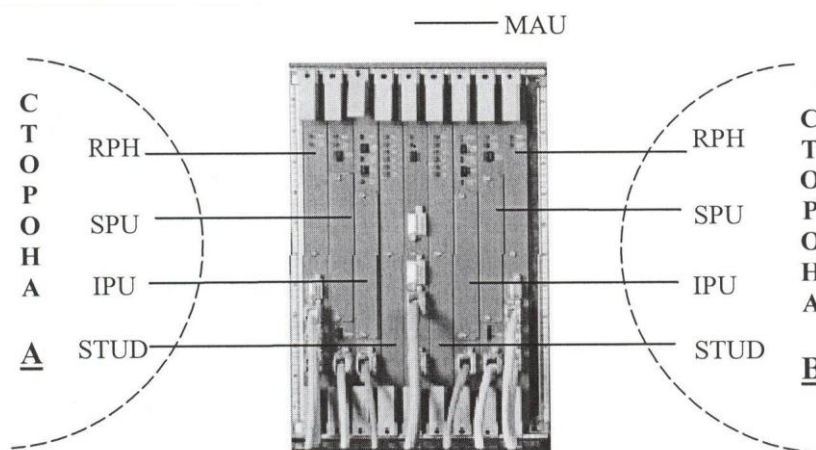


Рис.8.35 Центральний процесор системи AXE-10 (продукція APZ 212 25)

На рис. 8.35 представлено приклад центрального процесора, який використовується в комутаційній системі AXE-10 фірми Ericsson. Плата RPH (Regional Processor Handler) обробляє сигналізацію до і від регіональних процесорів. STUD (Storage data units) - це пам'ять, в якій зберігаються програми і дані по конфігурації станційного обладнання. SPU (Signal Processor Unit) - сигнальний процесор, який виконує адміністративні функції. IPU (Instruction Processor Unit) відповідає за запуск програм. Блок MAU (Maintenance Unit)

порівнює результати обробки даних обох сторін і у випадку помилки ініціює передачу керування від робочої сторони до резервної.

Комутатор

Перенесення частини комутаційних функцій з системи комутації в BSC дозволило розвантажити центри комутації, зменшити їх кількість, а також понизити вартість передачі (контролер базових станцій концентрує навантаження до MSC). Комутаційне поле в BSC і MSC однакове і реалізоване за принципом Час-Простір-Час, що дозволяє використовувати ідентичні групові комутатори. Різниця полягає лише в ємності комутатора. В Європі і, зокрема, в Україні значного поширення набули групові комутатори AXE-10 фірми Ericsson, до яких можна під'єднати до 65536 каналів 2 Мбіт/с (ємність групового комутатора 64 К). В даний час проводяться роботи по розширенню ємності групового комутатора до 128 К.

В комутаційній системі AXE-10 груповий комутатор спроектований у вигляді модулів часової комутації (TSM) і модулів просторової комутації (SPM). До одного TSM можна під'єднати до 16 ІКМ-ліній, тобто модуль часової комутації має $16 \times 32 = 512$ входів/каналів. На рис. 8.36 приведено спрощений опис з'єднання вхідного каналу з вихідним за допомогою групового комутатора.

Долі мовлення, які надходять від абонентів, поступають в груповий комутатор і зберігаються тут в інформаційній пам'яті (ІП). Кожен канал ІКМ лінії, яка під'єднана до TSM, має власну комірку в інформаційній пам'яті, тобто інформаційна пам'ять містить 512 комірок (16×32). Зв'язок між каналами і комірками пам'яті є фіксований.

Для того, щоб скомутувати долі мовлення до абонента В, використовуються модулі просторової комутації (SPM), які комутують долі мовлення в іншу інформаційну пам'ять (ІП В). Груповий комутатор є повнодоступний, тобто кожна позиція на вході групового комутатора може бути з'єднана з будь-якою позицією на його виході. Тому SPM використовуються навіть у випадку, коли А- і В-частина відноситься до одного

TSM, тобто комутації в межах одного модуля TSM немає.

До одного модуля просторової комутації можна під'єднати до 32 модулів TSM, що дає 16384 точок комутації. Якщо виникає необхідність під'єднати більшу кількість TSM, в груповому комутаторі передбачено розширення. В такому випадку будується матриця модулів просторової комутації, яка забезпечує можливість з'єднання між будь-якою парою модулів часової комутації.

Перенесення даних (долей мовлення) з однієї інформаційної пам'яті (ІП А) в іншу (ІП В) здійснюється під контролем керуючої пам'яті SPM (КП SPM). Керуюча пам'ять SPM являє собою реєстри, в які програмне забезпечення групового комутатора записує інформацію про шлях, який потрібно встановити. Для кожного модуля часової комутації виділена окрема керуюча пам'ять SPM ємністю 512 комірок. Кожна комірка всередині керуючої пам'яті SPM містить адресу з'єднувальної точки матриці SPM, яка є робоча в даний момент часу. Іншими словами, комірка КП SPM містить номер TSM, з якого надійшли долі мовлення.

Груповий комутатор містить також керуючу пам'ять (КП АВ), яка вказує на адресу комірки інформаційної пам'яті, що містить долі мовлення.

В одну з комірок керуючої пам'яті КП АВ записується адреса комірки інформаційної пам'яті ІП А, яка містить долі мовлення. В даному прикладі це адреса дванадцятої комірки ІП А (TSM-0). Долі мовлення будуть скомутовані до модуля часової комутації абонента В, тобто до TSM-1. Для того, щоб передати дані від ІП А до ІП В, визначається з'єднувальна точка в матриці SPM. З цією метою в одну з комірок керуючої пам'яті КП SPM, яка розміщена в TSM-1, записується номер TSM абонента А, тобто TSM-0. Далі долі мовлення записуються в інформаційну пам'ять ІП В, і інформація про це вноситься в керуючу пам'ять КП АВ (TSM-1). В момент потрібного вихідного каналу мовні дані будуть зчитані і передані до абонента В.

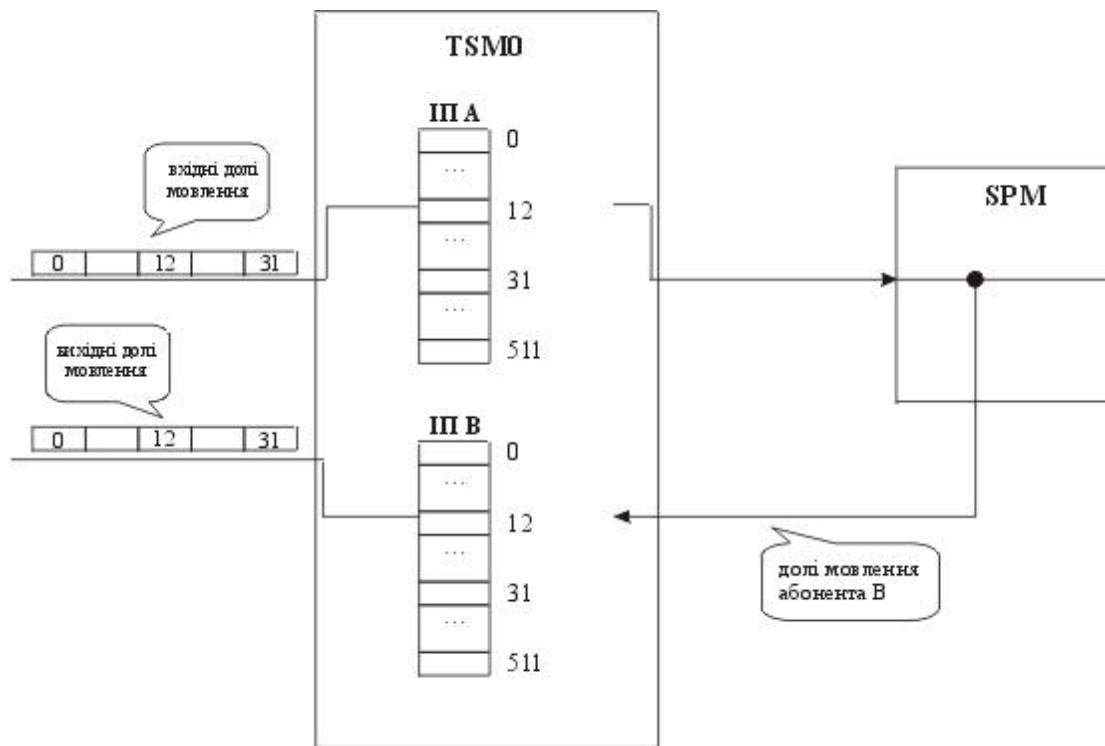


Рис.8.36 Приклад з'єднання в груповому комутаторі

В комутаційній системі АХЕ-10 груповий комутатор забезпечує синхронізацію для даних, що передаються по вихідних ІКМ-лініях. Для того, щоб надавати груповому комутатору надійну синхронізаційну інформацію, використовуються три джерела синхронізації: одне основне (master clock module) і два додаткові, які синхронізуються від основного. Кожне джерело містить керований температурою і напругою кристалічний осцилятор (ОСВСХО), робоча частота якого становить 8.192 МГц, і мікропроцесор, який керує осцилятором. Регулювання осцилятора відбувається на основі результатів, отриманих внаслідок вимірювання фази від власних і інших синхронізаційних пристроїв. Кожне джерело синхронізації генерує три сигнали. По одному сигналу 4.096 МГц (CLK) і одному сигналу 8 кГц (SYNC) від всіх трьох джерел через модуль просторової комутації подається в груповий комутатор. Третій сигнал 8 кГц (CLSY) призначений для обміну між джерелами. Як тільки SPM отримує синхронізуючі частоти, він генерує сигнал 48 МГц, який разом з сигналом 8 Гц (SYNC) подається на TSM. Далі TSM поділяє 48 МГц на частоти, що використовуються всередині комутатора.

Прикладом таких частот є частоти зчитування долей мовлення з ІІ А і запис їх в ІІ В.

В результаті виходу з ладу одного модуля часової комутації втрачається 512 викликів. Щоб запобігти цьому в груповому комутаторі одночасно працює дві ідентичні сторони, які містять ідентичне обладнання і є незалежні між собою. Всі зовнішні пристрої, які під'єднуються до групового комутатора, під'єднуються одночасно до двох сторін. Доли мовлення надходять до обох сторін, проте вибираються з однієї, як правило сторони А. В такому випадку лише вихід з ладу одночасно двох одноіменних TSM призведе до втрати викликів.

Інтерфейси

Необхідність стандартизації інтерфейсів викликана потребою забезпечення сумісності апаратури різних фірм-виробників. Стики контролера базових станцій з іншими мережевими компонентами системи базової станції також стандартизовано, і вони повністю відповідають вимогам протоколу G.703. В контролері базових станцій є два види інтерфейсів:

A-bis інтерфейс - призначений для зв'язку контролера базових станцій з базовими приймально-передавальними станціями;

A-ter інтерфейс - призначений для зв'язку з транскодером або іншим контролером базових станцій.

A-BIS ІНТЕРФЕЙС

Передача інформації по A-bis інтерфейсу відбувається по цифрових каналах E1 (2 Мбіт/с), які поділяються на 32 часові інтервали, кожен з яких може переносити інформацію з швидкістю 64 кбіт/с.

Кожному передавачу базової відповідають чітко визначені 2 часові інтервали на A-bis інтерфейсі для передачі розмови і один виділений канал для передачі LAPD-сигналізації, тобто в одному часовому інтервалі на A-bis інтерфейсі можна розмістити інформацію чотирьох субмультиплексованих (16 кбіт/с) каналів інформаційних потоків радіоінтерфейсу (рис. 8.37).

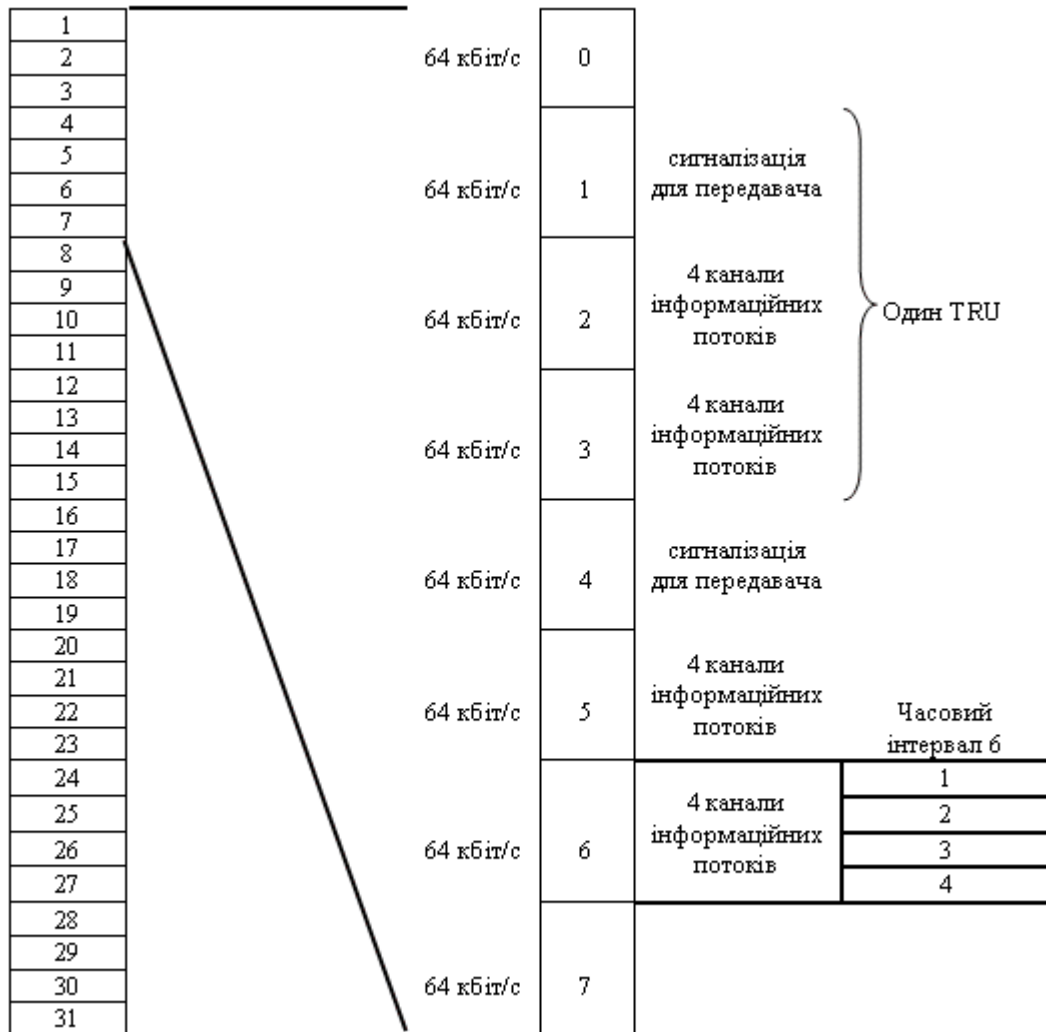


Рис.8.37 А-bis інтерфейс для RBS 2000 (E1)

Для більш ефективного використання А-bis інтерфейсу використовуються LAPD-концентрація і LAPD-мультиплексування.

LAPD-концентрація рекомендується для всіх комірок, а особливо для тих, що мають 3 або більше передавачів TRU. При LAPD-концентрації кожен передавач вимагає 2.25 часові інтервали. Як наслідок, можна забезпечити до 13 TRU на одну лінію 2 Мбіт/с (E1) (без використання LAPD-концентрації забезпечується лише 10 TRU).

LAPD-мультиплексування рекомендується для всіх малих комірок з 1-2 TRU. При LAPD-мультиплексуванні кожен передавач вимагає лише 2 часові інтервали. Як наслідок, можна забезпечити до 15 передавачів на одну лінію

2 Мбіт/с (E1), без використання LAPD-мультиплексування забезпечується лише 10 TRU). У випадку двох TRU в комірці, для інформаційних потоків звичайно використовується лише 14 з доступних каналів радіоінтерфейсу, а решта 2 часові інтервали радіоінтерфейсу призначені для BCCH- і SDCCH-сигналізації. Як наслідок, є потреба в передачі приблизно 14 каналів по 16 кбіт/с, тобто в 3.5 часових інтервалах. Решта часових інтервалів використовуються для LAPD-сигналізації до двох TRU. В результаті, для двох TRU використовується 4 часові інтервали.

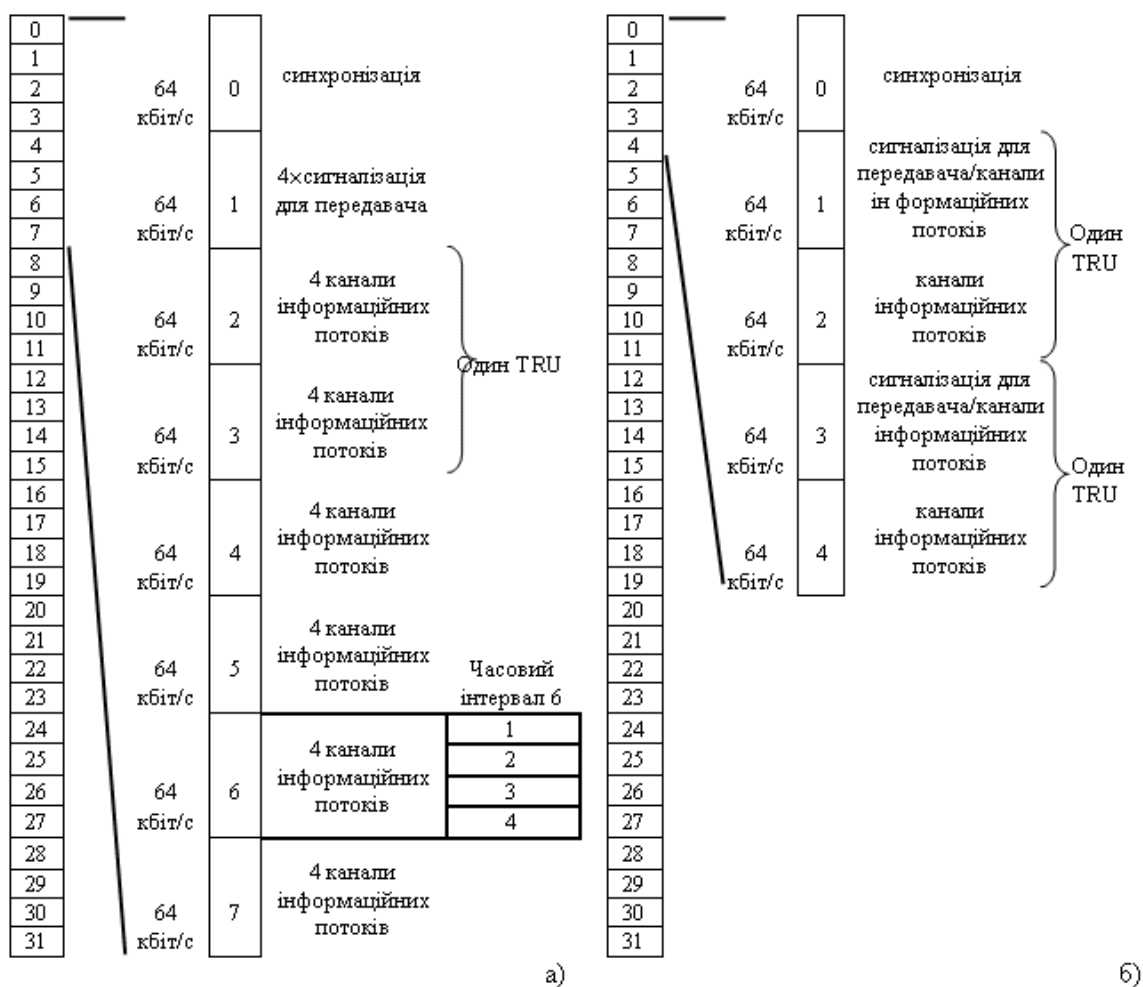


Рис.8.38 LAPD-концентрація (а) і LAPD-мультиплексування для RBS 2000 (E1)

A-TER ІНТЕРФЕЙС

Інформація по А-ter інтерфейсу, як і по А-bis інтерфейсу, передається по цифрових каналах 2 Мбіт/с (E1), причому швидкість передачі інформації

становить 16 кбіт/с.

На практиці можлива реалізація транскодера як у контролері базових станцій, так і у вигляді окремого блоку (рис. 8.39), в результаті чого інтерфейс А-ter має свої особливості.

У випадку передачі інформації між двома контролерами базових станцій (у склад одного з них входить транскодер TRC) окремий BSC за допомогою свого комутатора субшвидкості розміщує 16 кбіт/с канали у 64 кбіт/с часові інтервали. Це дозволяє більш ефективно використовувати пропускну здатність каналів. На відміну від А-інтерфейсу, де один часовий інтервал 64 кбіт/с містить розмовну інформацію одного абонента, на А-ter інтерфейсі у випадку з'єднання BSC-BSC/TRC канал може містити інформацію різних абонентів.

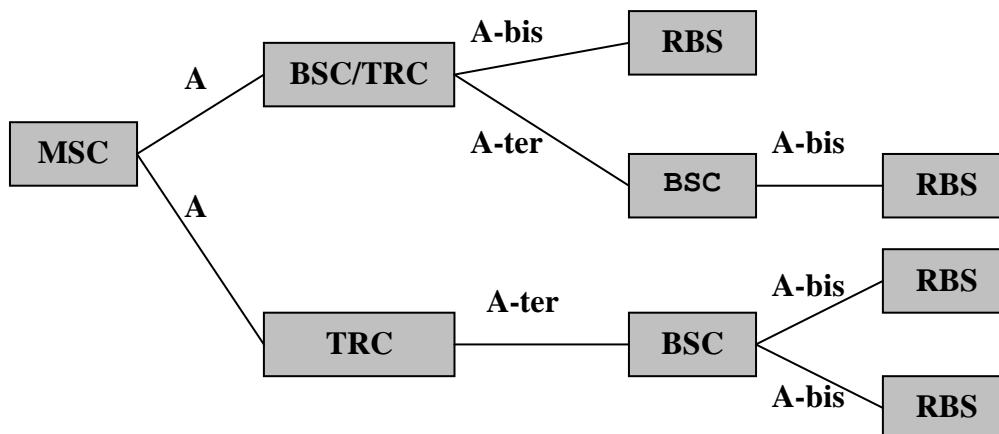


Рис.8.39 Інтерфейси системи базової станції

Особливу увагу слід звернути на використання інтегрованого BSC/TRC модуля. В цьому випадку 24 канали використовуються для передачі інформації в форматі GSM (16 кбіт/с), а 6 каналів - для передачі інформації в форматі ІКМ (64 кбіт/с). Залежно від напрямку передачі (до чи від транскодера) інформація розміщується у відповідних часових інтервалах.

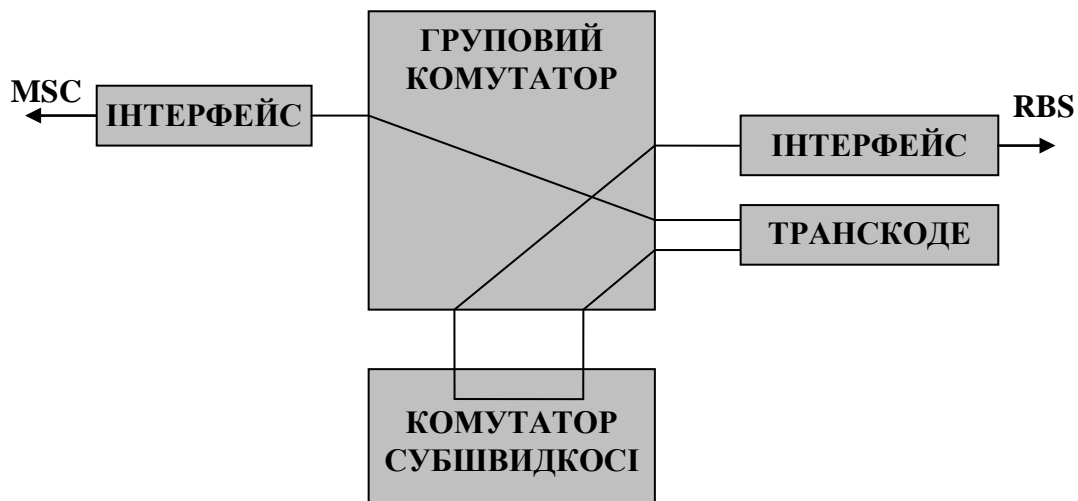


Рис.8.40 Передача інформації всередині BSC/TRC

Блок сигналізації

Блок сигналізації відповідає за виконання сигналізаційних протоколів на А-, А-ter та А-bis інтерфейсах і містить два типи пристроїв: сигналізаційні термінали, призначені для обробки повідомлень системи сигналізації №7, і обробники прийомо-передавачів, які дозволяють ефективніше використовувати А-bis інтерфейс через LAPD-сигналізацію. Використання в системі GSM двох систем сигналізації зумовлене тим, що для організації міжстанційної сигналізації електронних АТС стаціонарних ТМЗК вже значний час використовується система сигналізації №7, і вона прийнята для забезпечення сигналізації в цифрових мережах ISDN. Крім того, в мережі GSM необхідно здійснювати сигналізацію в конфігурації “точка-мультиточка”, а протокол LAPD спеціально створений для цих цілей, і він широко використовується в мережі ISDN. Таким чином, використання двох систем сигналізації робить GSM сумісною з ТМЗК і ISDN.

В блоці сигналізації сигналізаційне повідомлення перетворюється в формат, придатний для опрацювання контролером базових станцій і форматове повідомлення передається в блок керування BSC для подальшої обробки.

На А- і А-ter інтерфейсах використовується система сигналізації №7, а

саме протоколи BSSAP/DTAP і MTP/SCCP.

Протокол BSSAP (Base Station System Application Part) складається з трьох частин:

- BSSMAP (Base Station System Management Application Part), який включає команди пошуку мобільної станції, команди використання режиму шифрування і інші дані, які відносяться до мобільної станції і передаються між MSC BSC;
- DTAP (Direct Transfer Application Part), який містить команди запиту і відхилення аутентифікації, інформацію про оновлення місцезнаходження мобільної станції (location update). Повідомлення DTAP прозоро комутуються через BSC і базові станції і надходять до конкретної мобільної станції;
- роздільча функція, яка розрізняє повідомлення BSSMAP і DTAP.

BSSMAP повідомлення передаються прозоро через транскодер, використовуючи протоколи MTP і SCCP.

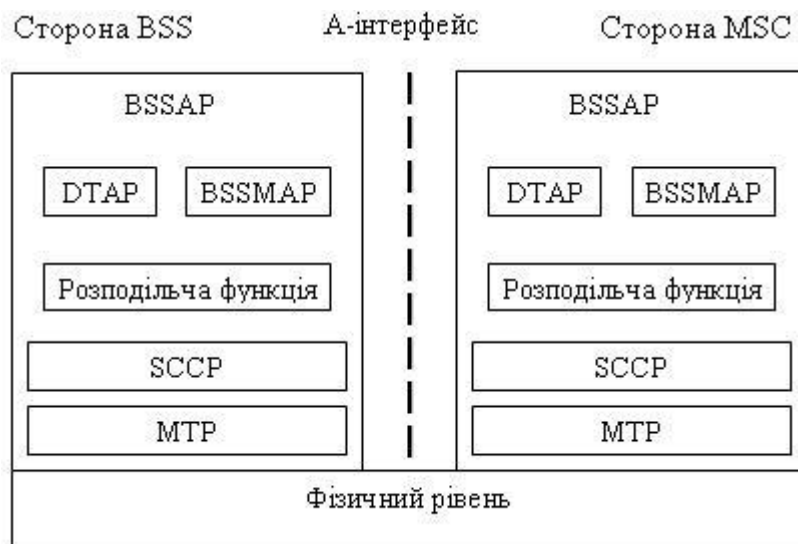


Рис.8.41 Структура протоколу BSSAP

Протокол MTP (Message Transfer Part) складається з трьох рівнів:

- Рівень 1 забезпечує однонаправленість сигнального з'єднання;

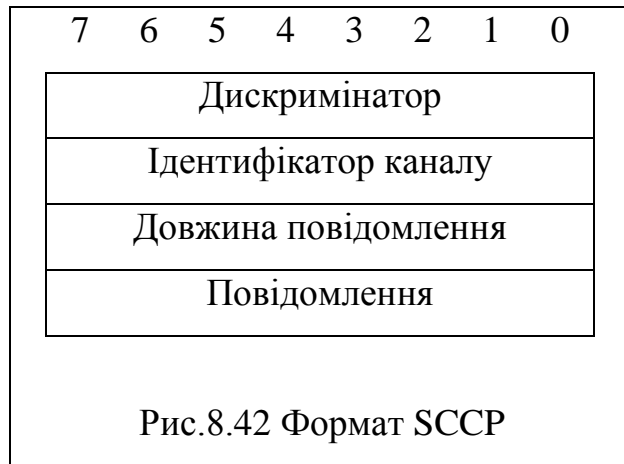
- Рівень 2 перевіряє дані і виправляє будь-які помилки, що трапились під час передачі;
- Рівень 3 встановлює, обробляє і розриває з'єднання, а також обробляє адресацію і маршрутизацію.

Протокол SCCP забезпечує два відмінні принципи сигналізації:

- Орієнтований на з'єднання (connection oriented) - при якому спочатку встановлюється з'єднання, а всі наступні сигналізаційні повідомлення використовують це з'єднання. Всі повідомлення відсилаються і прибувають в строгій послідовності;
- Безз'єднувальний (connectionless) - при якому сигналізаційні повідомлення маршрутизуються через мережу незалежно.

BSSMAP і DTAP повідомлення включаються в формат SCCP як поле даних, структура якого приведена на рис. 8.42. При цьому 7-й біт дискримінатора вказує на прозорість з'єднання ("1" - так, "0" - ні), тобто якій частині протоколу BSSAP адресується з'єднання; 6-й та 7-й біти ідентифікатора каналу використовуються тільки прикладною частиною для прозорості передачі DTAP для визначення типу логічного каналу управління між BTS і MS ("00" - виділений сигналізаційний канал або швидкий канал управління, "01" - повільний канал управління); біти 0, 1, 2 ідентифікатора каналу визначають ідентифікатор доступу до послуг SAPI, який вказує чи дані є сигналізаційним повідомленням, повідомленням техобслуговування або даними, які адресовані протоколу LAPD.

Для сигналізації між транскодером і контролером базових станцій (A-ter інтерфейс) використовується протокол VCAP. VCAP-повідомлення, які стосуються інформаційних потоків, передаються в режимі орієнтації на з'єднання, а всі інші - в безз'єднувальному режимі.



На ділянці BSC-BTS використовуються стандартні цифрові канали з швидкістю передачі 64 кбіт/с. Для транспортування сигнальної інформації по стандартному цифровому каналу використовується протокол LAPD. При цьому використовується два режими доставки інформації: з підтвердженням і без підтвердження. Обмін інформацією на каналному (другому) рівні протоколу LAPD здійснюється у вигляді кадрів, формат яких приведено на рис. 8.43.



Будь-який кадр ідентифікується стартовим і кінцевим прапорцем F (01111110). З метою забезпечення прозорості цифрового потоку каналу для інформації, що міститься між прапорцями, використовується процедура біт-стафінгу. Контроль за достовірністю реалізується за допомогою контрольних бітів FCS. Адресне поле містить: ідентифікатор точки підключення - TAI; ідентифікатор доступу до послуг - SAPI; ідентифікатор команди ("0") або відповіді ("1") - C/R (Command/Response); індикатор розширення адресного

поля по байтах - EA ("0" - так, "1" - ні). Використання полів SAPI та TEI в процесі доставки інформації на ділянці BSC-BTS показано на рис. 8.44.

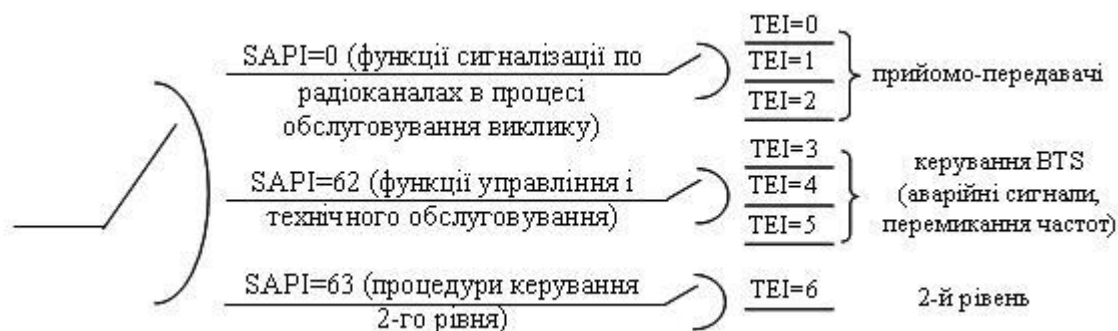


Рис.8.44 Використання полів SAPI та TEI

Поле керування визначає тип формату кадру і містить інформацію, яка необхідна для управління обміном кадрами: номер переданого і очікуваного кадру, а також відповідну біт-індикацію.

В загальному випадку розрізняють три типи форматів: I - інформаційний кадр; S -керуючий кадр; U - нумерований кадр. Формат кадру типу S не містить інформаційного поля і використовується для підтвердження про прийом кадру (RR), оповіщення про зайнятість (RNR), перезапиту кадрів (REJ) і т.д. Кадри формату U можуть містити інформаційне поле, але не містять порядкових номерів. Вони використовуються для встановлення двостороннього логічного каналу і роз'єднання, для відмовлення при переповненні буфера.

8.4.2. Функції контролера базових станцій

8.4.2.1. Визначення каналу

При визначенні нового каналу враховується ряд умов. Який канал в новій комірці в кінцевому результаті буде призначений і зарезервований, залежить від причини призначення нового каналу тобто варіанту трафіку. Термін варіант трафіку включає різні типи естафетної передачі (перемикання каналів): перемикання всередині комірки, зміна субкомірки або негайне призначення каналу. Другим критерієм є режим передачі, тобто передача розмовної

інформації або даних чи передача сигналізаційної інформації. Третій критерій враховує, чи оператор хоче призначити канали в субкомірковій структурі (т.зв. надкомірки і підкомірки). Комбінація варіанту трафіку, потрібного каналу (мовлення чи дані) і індикатора використання субкоміркової структури утворює т.зв. тип вибору каналу (ST).

При визначенні нового каналу комбінація каналів і субкомірок розглядається як певний тип ресурсу (RT). Можливі типи ресурсів приведені в табл. 8.5.

Таблиця 8.5. Типи ресурсів

	Надкомірки	Підкомірки
TCH	RT=1	RT=2
SDCCH	RT=3	RT=4

Якщо нова комірка має достатньо ресурсів, щоб прийняти естафетну передачу, згідно профілю призначення каналів (CHAP) призначається новий канал. Профіль призначення каналів - це список, який пов'язує тип вибору каналу (ST) з списком пріоритетів типів ресурсів (RTPL). Слід відмітити, що кожен ST має власний список пріоритетів типів ресурсів (RTPL). Табл. 8.6 є прикладом профіля призначення каналів:

Таблиця 8.6. Профіль призначення каналів.

Тип вибору каналу	Список пріоритетів типів ресурсів
1	A
2	B

Список пріоритетів типів ресурсів - це таблиця, яка містить список ресурсів в порядку пріоритету. Система вибирає перший ресурс з RTPL. Якщо для першого вибору немає вільних ресурсів, система вибирає другий тип ресурсу в списку. Табл. 8.7 показує цей принцип.

Таблиця 8.7. Вибір ресурсу згідно пріоритету.

Тип вибору каналу (ST)	Список пріоритетів типів ресурсів (RTPL)
1	RT4
2	RT4
3	RT4
4	RT1: перший вибір RT2: другий вибір
5	RT2

У випадку перемикання внаслідок перевантаження система перевіряє тип вибору каналів, наприклад, перемикання на розмовному каналі, і вибирає RTPL, який призначений для цього варіанту трафіку. Наступним кроком системи є вибір першого вільного ресурсу в RTPL і його резервування.

8.4.2.2. Диференціальне визначення каналу

Диференціальне визначення каналу - це інструмент для керування доступом мобільної станції до системи залежно від інтенсивності трафіку. Диференціальне визначення каналу дає оператору можливість регулювати виділення радіоресурсів в межах комірки.

Доступ до розмовних і сигналізаційних каналів може контролюватись за рахунок резервування певної кількості каналів для пріоритетних з'єднань. Більш того, цей доступ залежить від пріоритету, визначеного для абонента в HLR (домашньому реєстрі).

Диференціальне визначення каналу може застосовуватись до різних типів ресурсів: SDCCH і TCH каналів як в надкомірках, так і в підкомірках (звичайна комірка розглядається як підкомірка) при використанні субкоміркової структури.

При спробі доступу мобільної станції до системи остання визначає кількість недоступних каналів (INAC), тобто каналів, які можуть бути зарезервовані для викликів з різними рівнями пріоритету. Якщо мобільна станція з певним рівнем пріоритету вимагає доступу до системи, система буде оцінювати співвідношення вільних, зайнятих і зарезервованих каналів і на

основі цих даних дасть позитивну або негативну відповідь на запит доступу:

Варіант 1. Система перевіряє, скільки каналів зарезервовано для інших рівнів пріоритету. Якщо кількість вільних каналів рівна або менша, ніж кількість зарезервованих каналів (INAC), доступ буде заборонений.

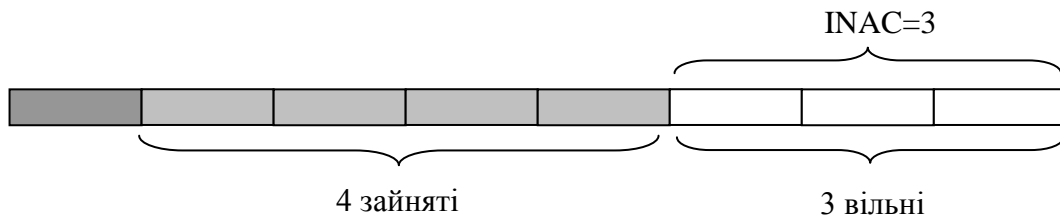


Рис.8.45 Доступ заборонений

Варіант 2. Якщо кількість вільних каналів перевищує значення INAC хоча б на 1 ($INAC+1$), тоді доступ мобільної станції з певним рівнем пріоритету до системи залежить від ймовірності невдалої спроби доступу. Ця ймовірність визначається оператором за допомогою спеціальної команди в BSC, точніше параметром PROBF. PROBF=0% означає, що мобільна станція обов'язково отримає дозвіл на доступ; PROBF=25% означає, що одна з чотирьох мобільних станцій (з тим самим рівнем пріоритету) отримає відмову.

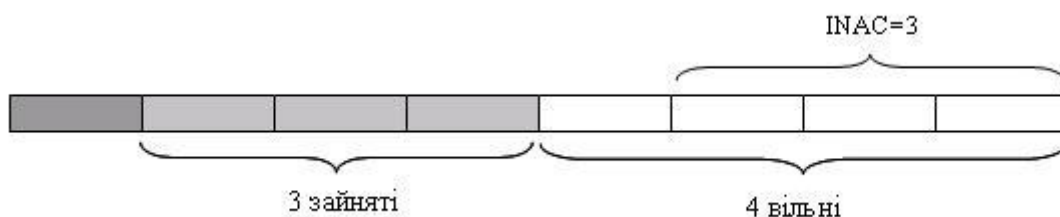


Рис.8.46 Доступ залежно від PROBF

Варіант 3. Якщо кількість вільних каналів рівна або більша, ніж ($INAC+2$), доступ буде дозволений в будь-якому випадку.

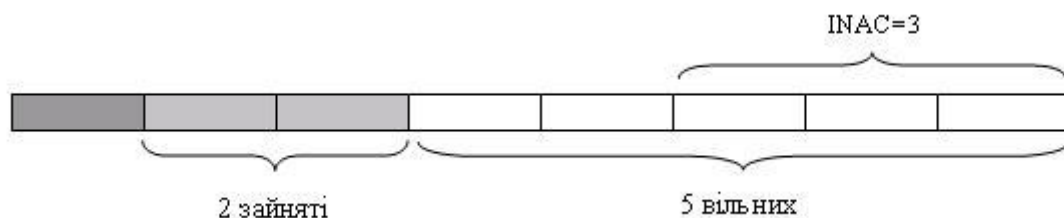


Рис.8.47 Повний доступ

Для визначення кількості зарезервованих каналів, а також для вказання ймовірності невдалої спроби доступу для кожного рівня пріоритету, використовується спеціальна таблиця - профіль пріоритету. Для комірок з однією несучою частотою профіль пріоритету може виглядати наступним чином:

Таблиця 8.8. Профіль пріоритету для комірок з однією несучою

Рівень пріоритету	INAC, %	PROBF, %
0	70	50
11	50	50
2	30	20
3	10	20
4	0	0

Як видно з табл. 8.8, мобільні станції з рівнем пріоритету 4 мають повний доступ до системи.

8.4.2.3. Динамічне керування потужністю мобільної станції

Динамічне керування потужністю мобільної станції використовується для обмеження спільноканальних інтерференційних завад, а також для зменшення споживання мобільною станцією енергії. Динамічне керування потужністю полягає в регулюванні вихідної потужності MS з метою підтримування постійного значення потужності сигналу на приймачах базової приймально-передавальної станції (BTS). Рішення про зміну вихідної потужності мобільної станції контролер приймає на основі звітів про результати вимірювань базової станції, які надходять кожні 480 ms і включають такі дані, як виміряна потужність сигналу, якість зв'язку по каналу “вверх”, індикатор використання

перервної передачі, поточний рівень потужності мобільної станції і ін.

Алгоритм динамічного керування потужністю мобільної станції представлено на рис.8.48.

Алгоритм може використовуватись в двох режимах регулювання потужності:

- стаціонарному режимі;
- початковому режимі.

Звичайним режимом алгоритму регулювання є стаціонарний режим. Початковий режим використовується лише на самому початковому етапі з'єднання. При новому з'єднанні мобільна станція використовує номінальну потужність, встановлену для комірки. Оскільки звичайно базова станція обслуговує одночасно декілька викликів, необхідно якнайшвидше зменшити потужність сигналу нового з'єднання. Це потрібно, щоб запобігти погіршенню якості інших викликів внаслідок високого рівня інтерференції. Основне завдання даного режиму полягає в швидкому зменшенні вихідної потужності мобільної станції, поки не будуть доступні стабільні вимірювання і потужність MS буде розраховуватись в стаціонарному режимі.

Алгоритм динамічного керування потужністю мобільної станції складається з наступних основних етапів:

1. Підготування результатів вимірювань. Перш за все має бути прийняте рішення відносно того, яка з множин вимірювань по каналу “вверх” буде використовуватись. Вибір ґрунтується на індикаторі використання перервної передачі, який передає мобільна станція. Якщо перервна передача по каналу “вверх” не використовується, система використовує неповну множину звітів до того часу, поки не отримається повна множина звітів. Оцінка же повної множини звітів буде проводитись лише після того, як всі звіти надійдуть до контролера. На даному етапі виконується також обробка втрачених звітів. При втраті інформації видається наказ підвищити вихідну потужність, щоб запобігти занадто малому значенню, яке може призвести до втрати виклику.

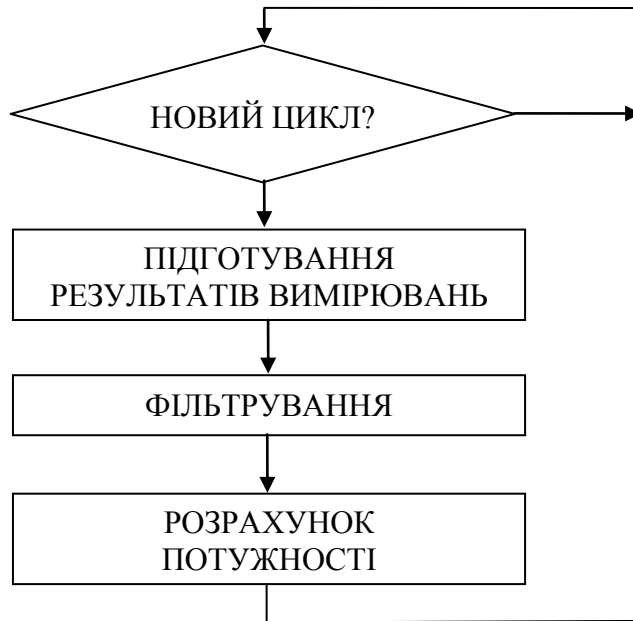


Рис.8.48 Алгоритм динамічного керування потужністю мобільної станції

2. Фільтрування. Фільтрування полягає у прийнятті рішення про те, чи потрібно змінювати потужність MS. Необхідність такого рішення зумовлена варіацією результатів вимірювань в часі. В стаціонарному режимі регулювання залежить як від показників якості, так і від втрат при поширенні сигналу, причому показники усереднюються за задану кількість періодів SACCH. Регулювання буде проводитись лише після того, як стаціонарний фільтр заповниться, тобто пройде задана кількість SACCH періодів. В початковому режимі регулювання залежить лише від втрат при поширенні (розглядається середнє значення протягом заданої кількості періодів SACCH). В початковому режимі можна лише понижувати потужність сигналу. Якщо початковий фільтр заповнений і отримане в результаті розрахунків значення вихідної потужності є більше, ніж бажане для початкового режиму, то приймається рішення понизити вихідну потужність MS. В іншому випадку регулювання вважається недоцільним і не проводиться. І для стаціонарного, і для початкового режиму важливе значення має довжина фільтра. Якщо фільтр короткий (задана невелика кількість періодів SACCH, протягом яких розглядаються звіти), то підвищується швидкість регулювання, але

зменшується точність. Слід відмітити, що стаціонарні регулювання завжди починаються лише після того, як стаціонарний фільтр заповнений, незалежно від того проводилось початкове регулювання чи ні.

3. Розрахунок потужності.

- Початкова фаза. Початкове значення вихідної потужності розраховується за формулою:

$$PWR_INI = MSTXPWR - \frac{(MSTXPWR - L_UL - SSDES) \cdot LCOMPUL}{100},$$

де MSTXPWR - поточне значення вихідної потужності мобільної станції;

SSDES - бажане значення потужності сигналу;

LCOMPUL - коефіцієнт компенсації по каналу “вверх”, значення в межах 0...100.

L_UL - втрати при передачі по каналу “вверх”.

$$L_UL = MSTXPWR - BTS_RXLEV,$$

де BTS_RXLEV - рівень сигналу, що приймається на BTS.

Нове значення потужності залежить лише від різниці прийнятого сигналу (BTS_RXLEV) і SSDES. В початковій фазі якість до уваги не приймається.

- Стаціонарна фаза. Як тільки проходить встановлена кількість періодів SACCH (480 ms) система переходить в стаціонарний режим. Потужність розраховується так, як і для початкової фази, але в стаціонарному режимі враховується ще і якість:

$$PWR_STAT = PWR_INI + \frac{(Q_UL - QDES) \cdot QCOMPUL}{100}$$

де QCOMPUL - коефіцієнт компенсації девіації якості по каналу “вверх”.

Якщо значення $(Q_UL - QDES) < 0$, то якість вважається доброю і потужність може бути понижена, в іншому випадку якість буде поганою і вихідна потужність мобільної станції повинна бути підвищена.

При регулюванні вихідної потужності мобільної станції використовуються наступні обмеження:

- Обмеження кроку зміни потужності. Оскільки мобільна станція може змінювати свій рівень по потужності протягом SACCH періоду лише на

16 дБ, це значення було прийняте як максимальна зміна потужності протягом одного циклу регулювання.

- Обмеження кроку пониження потужності. Дане обмеження дозволяє зменшувати вихідну потужність мобільної станції залежно від параметрів, які характеризують якість з'єднання протягом заданого часового інтервалу.
- Обмеження границь потужності MS. Максимальна і мінімальна вихідна потужність мобільної станції залежить від її класу і марки. Проте дозволені границі потужності визначаються контролером базових станцій. Це дозволяє оператору контролювати небажані випромінювання, які можуть призвести до погіршення якості інших з'єднань.
- Порогове значення потужності. Рівень потужності може збільшуватись на величину порогового значення потужності (0-20 дБ) в двох випадках:
 - при призначенні розмовного каналу. Мобільна станція отримує наказ почати передачу на новому каналі на вищій потужності, ніж вона використовувала на каналі SDCCCH.
 - при збої під час призначення каналу або під час естафетної передачі. Коли мобільна станція повертається на старий канал, алгоритм керування перезапускається і використовує вищий рівень потужності, ніж той, що використовувався до зміни каналу.

8.4.2.4.динамічне керування потужністю базової станції

Керування потужністю базової станції використовується для підсилення сигналу в випадку високого рівня завад і, навпаки, послаблення сигналу, якщо він створює завади для інших викликів. В загальному принцип керування потужністю базової станції дуже подібний до керування вихідною потужністю мобільної станції. Основна відмінність полягає в тому, що в BTS можна керувати як розмовними каналами, так і SDCCCH каналами. Це означає, що для кожного часового інтервалу можна задавати іншу потужність. Проте слід відмітити, що керування потужністю не розповсюджується на BCCH канали.

Динамічне керування потужністю базової станції полягає в регулюванні

вихідної потужності BTS з метою отримання постійної потужності сигналу на приймачі мобільної станції. Дана функція дозволяє зменшити спільноканальні інтерференційні завади і зменшити споживання енергії базовою станцією. Алгоритм динамічного керування потужністю базової станції складається з тих самих етапів, що і алгоритм керування для мобільної станції (рис. 8.48), проте функціонує лише в стаціонарному режимі регулювання (початковий режим в BTS не використовується).

Як і мобільна станція, при новому з'єднанні BTS починає передавати на номінальній потужності, а далі якнайшвидше зменшує потужність, щоб запобігти погіршенню якості зв'язку діючих з'єднань. Зміна потужності відбувається згідно алгоритму (рис. 8.48). Хоча алгоритм динамічного керування потужністю BTS складається з тих самих етапів, що і алгоритм керування потужністю MS, проте є ряд особливостей:

1. Підготування результатів вимірювань. Оскільки алгоритм керування потужністю BTS передбачає керування як розмовними каналами, так і SDCCN каналами, то вибір множини звітів (повна множина чи неповна), на основі якої відбувається керування, залежить не тільки від індикатора використання перервної передачі, але і від типу каналу: для SDCCN використовується лише повна множина звітів.
2. Фільтрування. Даний етап аналогічний фільтруванню при керуванні потужністю мобільної станції. Єдиною різницею є те, що тут не використовується початковий фільтр.
3. Розрахунок потужності. Потужність базової станції розраховується за формулою:

$PWR = BSTXPWR -$

$$\frac{(BSTXPWR - L_DL - SSDES DL) \cdot LCOMP DL}{100} + \frac{(QDES DL - RXQUAL_DL) \cdot QCOMP DL}{100},$$

де $BSTXPWR$ - номінальна потужність базової станції;

L_DL - втрати при поширенні по каналу “вниз”;

$SSDES DL$ - бажана потужність сигналу, що передається по каналу “вниз”;

QDESDL - бажана якість на каналі “вниз”;

RXQUAL_DL - наявна якість на каналі “вниз”;

LCOMPDL, QCOMPDL - коефіцієнти компенсації по каналу “вниз”;

Якщо розраховане значення потужності відрізняється від попереднього, контролер базових станцій надсилає відповідне повідомлення до BTS, і базова станція змінює потужність.

Базова станція буде змінювати потужність передачі при наближенні або віддаленні мобільної станції. Якщо мобільна станція перебуває далеко від BTS, остання передає на максимально дозволеній потужності. При наближенні MS базова станція зменшує потужність до мінімально допустимої. Зміна рівня потужності базової станції відбувається з кроком 2 дБ. Мінімальна ефективна потужність базової станції на 30 дБ нижча, ніж номінальний рівень.

8.4.2.5. Передача обслуговування (перемикання каналів)

Процес передачі обслуговування (handover) складається з двох основних процедур: процедури локалізації і процедури обробки виклику. На етапі процедури локалізації контролер базових станцій вибирає комірку, в якій забезпечується найкраще з'єднання між базовою приймально-передавальною станцією і мобільною станцією. На етапі процедури обробки виклику BSC спробує передати цій комірці виклик для подальшого обслуговування. На рис. 8.49 представлено основні етапи процедури локалізації і її взаємодію з процедурою обробки виклику.

Крок 1: Обробка результатів вимірювань

Контролер базових станцій приймає рішення про перемикання каналів (передачу обслуговування) на основі звітів, які передаються базовою і мобільною станціями і містять результати вимірювань параметрів з'єднання по каналу “вверх” і “вниз”.

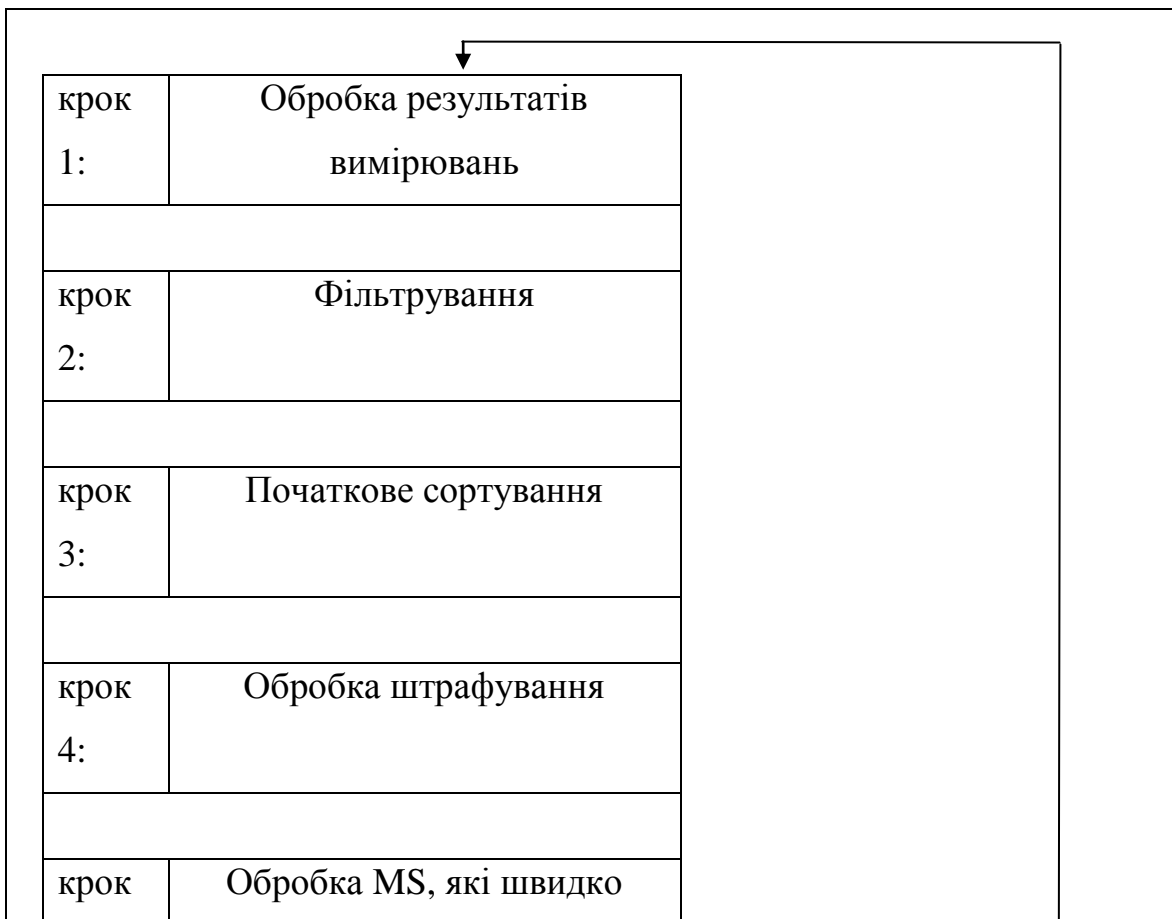
Звіт, який передається мобільною станцією містить параметри з'єднання по каналу “вниз”:

- рівень сигналу, що передається від базової станції;
- якість сигналу, що передається від базової станції, тобто коефіцієнт помилок;
- рівні сигналів на ВССН-несучих, що передаються від шести найсильніших базових станцій.

Звіт, який передається базовою станцією, містить параметри з'єднання по каналу “вверх”:

- рівень сигналу, що передається від мобільної станції;
- якість сигналу, що передається від мобільної станції, тобто коефіцієнт помилок;
- величину часового випередження.

Оскільки якість з'єднання змінюється в часі, виникає необхідність його періодичної перевірки. Передача звітів до контролера базових станцій відбувається кожні 480 ms. Саме кожні 480 ms контролер отримує повний звіт і розпочинає процедуру локалізації.





Крок 2: Фільтрування.

Кожна комірка має власний фільтр - множину параметрів, на основі яких здійснюється фільтрування:

SSEVALSD - оцінка потужності сигналу по розмовних каналах;

SSEVALSI - оцінка потужності сигналу по сигналізаційних каналах;

QEVALSD - оцінка якості передачі по розмовних каналах;

QEVALSI - оцінка якості передачі по сигналізаційних каналах;

Дані параметри визначають тип фільтра, який буде використовуватись для оцінки потужності/якості сигналу.

SSLENSD - довжина фільтра по потужності для розмовних каналів;

SSLENSI - довжина фільтра по потужності для сигналізаційних каналів;

SSRAMPSD - ***** для розмовних каналів;

SSRAMPSI - ***** для сигналізаційних каналів;

QLENSD - довжина фільтра якості передачі для розмовних каналів;

QLENSI - довжина фільтра якості передачі сигналізаційних каналів,

На даному етапі процедури локалізації система відкине з подальшого розгляду всі комірки, які потрапили в список можливих кандидатів випадковим чином. Прикладом таких комірок є комірки іншого оператора, перемикання з якими не дозволені (код NCC не внесений в список дозволених). Іншим прикладом можуть бути комірки з іншого кластера (інший код BCC), передача обслуговування яким з комірки, яка обслуговує виклик в даний момент, не передбачена.

Крок 3: Початкове сортування

На даному етапі процедури локалізації комірки сортуються в порядку забезпечення кращого з'єднання, тобто по потужності сигналу. Прикладами алгоритмів початкового сортування є алгоритми Ericsson1 і Ericsson3.

Алгоритм ERICSSON1

В алгоритмі Ericsson1 відбір кандидатів проходить згідно трьох критеріїв (рис. 8.50):

- М-критерій;
- К-критерій;
- L-критерій.

М-критерій

На першому кроці алгоритму система перевіряє, чи комірка задовольняє мінімальні умови. Для цього BSC для кожної комірки встановлює деяке порогове значення потужності, і кожна комірка, яка вважається потенційним кандидатом, повинна забезпечувати більшу потужність, ніж це значення. Для каналу “вниз” порогом є мінімально допустимий рівень потужності на

приймачі мобільної станції (MSRXMIN); для каналу “вверх” - мінімально допустимий рівень потужності на приймачі базової станції (BSRXMIN). Якщо хоча б для одного каналу реальна потужність є нижча, ніж порогове значення, комірka відкидається з подальшого розгляду алгоритму сортування. Комірki, які пройшли відбір, далі розглядаються K-алгоритмом.

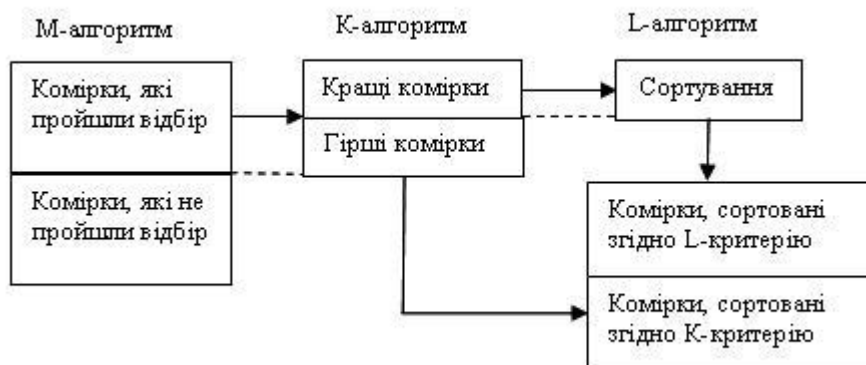


Рис.8.50 Алгоритм Ericsson1

K-критерій

На даному етапі встановлюється інше порогове значення - достатній рівень потужності. Для каналу “вниз” порогом є достатній рівень потужності на приймачі мобільної станції (MSRXSUFF); для каналу “вверх” - достатній рівень потужності на приймачі базової станції (BSRXSUFF). Якщо реальні рівні потужності по обох каналах перевищують відповідні порогові значення, комірka відноситься до класу L, якщо хоча б для одного каналу реальна потужність є менша, ніж порогове значення, комірka позначається як K-комірka. K-комірki сортуються в порядку спадання потужності. В кінці список K-комірок додається до списку L-комірок, причому K-комірki будуть займати нижчі позиції по відношенню до L-комірок.

L-критерій

На останньому етапі алгоритму L-комірki сортуються відповідно до втрат потужності при поширенні сигналу.

Втрати по каналу “вниз” визначаються наступним чином:

$$L = \text{BSPWR} - \text{MSRXLEV},$$

де BSPWR- ефективна потужність випромінювання базової станції;

MSRXLEV - рівень потужності на приймачі мобільної станції.

Втрати по каналу “вверх” визначаються як:

$$L = \text{MSTXPWR} - \text{BSRXLEV},$$

де MSTXPWR - вихідна потужність мобільної станції;

BSRXLEV - рівень потужності на приймачі базової станції.

Комірки сортуються в порядку спадання втрат потужності при поширенні. Таке сортування дозволяє змістити точку передачі обслуговування до географічного центру між комірками. Наступний приклад (рис. 8.51) дозволяє зрозуміти цей ефект. Велика за площею комірка А з великою вихідною потужністю і мала комірка В з малою вихідною потужністю є сусідами.

Мобільна станція перебуває в комірці А і рухається в напрямку комірки В. Для спрощення вважається, що умова відбору L-комірок виконується у всіх місцях і розглядається потужність лише по каналу “вниз”. Затінені території вказують території, де комірки вважаються L-комірками. На білих територіях вони вважаються K-комірками. Перемикання відбудеться відразу, як мобільна станція вийде за межі затіненої області комірки А.

Алгоритм Ericsson 3

Алгоритм Ericsson 1 неможливо оптимізувати. Тому на практиці замість Ericsson 1 може використовуватись алгоритм Ericsson 3, який зручніший в обробці, оскільки містить менше параметрів.

Основні характеристики Ericsson 3:

- виконується лише спрощене K-сортування;
- кандидати сортуються в порядку спадання абсолютної потужності сигналу;
- комірки поділяються на комірки з високим рівнем сигналу і комірки з низьким рівнем сигналу;

- для вибору правильного порогового значення використовуються потужності випромінювання як по каналу “вверх”, так і по каналу “вниз”;

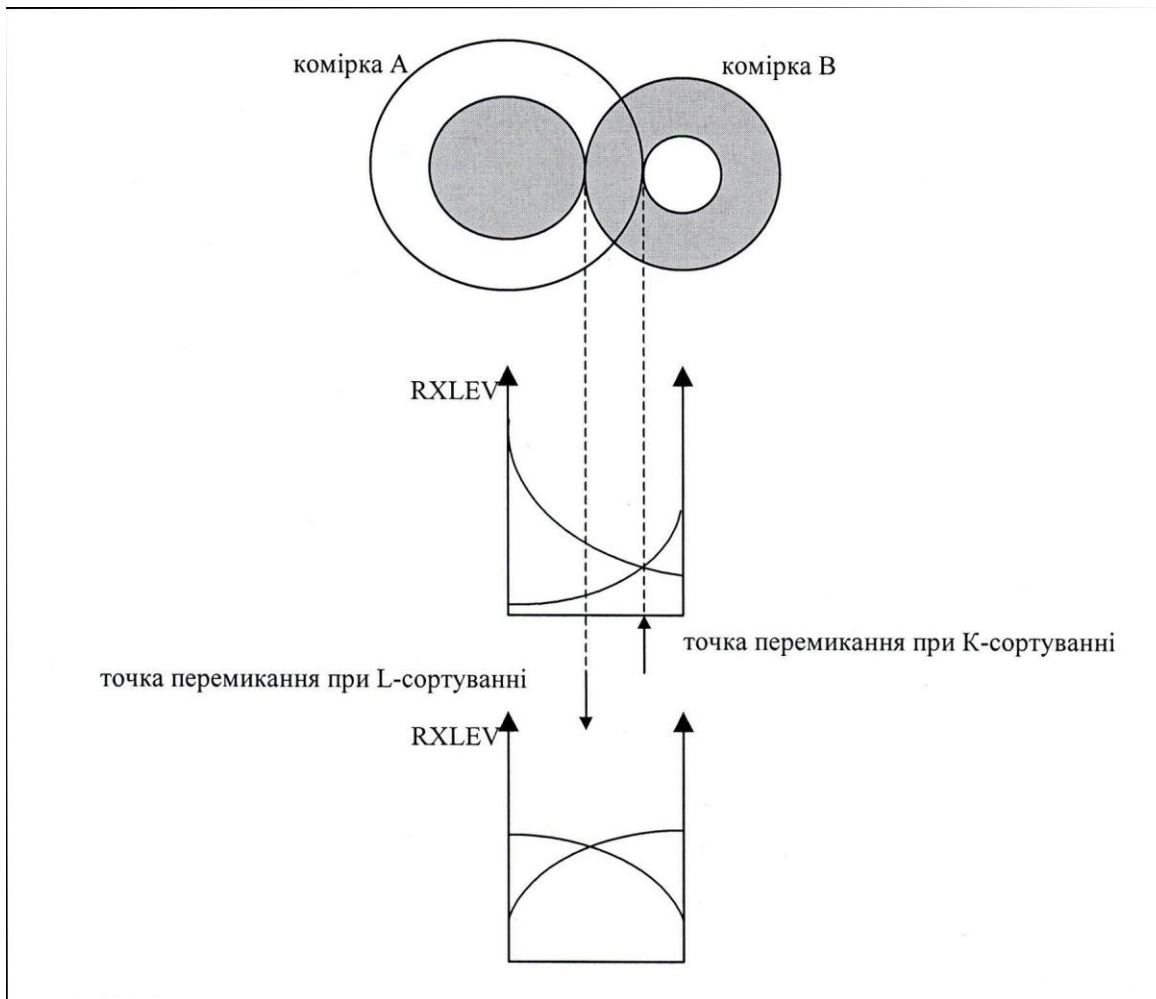


Рис.8.51 К- і L-критерій

Критерієм для сортування комірок згідно алгоритму Ericsson 3 є лише абсолютна потужність сигналу. Це основна відмінність від Ericsson 1, де сортування відбувалось залежно від мінімального і достатнього рівнів потужності, встановлених для кожної комірки індивідуально. Комірки сортуються в одному списку, тут немає поділу на К- і L-комірки. Замість цього в Ericsson 3 використовуються поняття комірка з низьким/високим рівнем сигналу. Якщо потужність сигналу є менша, ніж встановлене порогове значення $HYSTSEP$, то кандидат вважається коміркою з низьким рівнем сигналу; в іншому випадку - коміркою з високим рівнем сигналу. Залежно від типу

комірки при формуванні списку кандидатів від реального значення потужності буде відніматись різне значення потужності, встановлене для даного типу комірки.

Крок 4: Обробка штрафування

Спроба передати обслуговування від однієї комірки до іншої не завжди є успішною. Комірка, яка забезпечує найкраще з'єднання може не прийняти новий виклик, наприклад, через відсутність вільних каналів і виклик залишається в старій комірці. В наступному циклі система знову спробує передати виклик цій перевантаженій комірці і т.д., що може призвести до втрати виклику. У випадку успішної спроби система повинна запобігти можливій передачі виклику попередній комірці, оскільки це може призвести до постійного стрибання між двома комірками. Для цього комірки, які передали виклик, і комірки, які відмовились прийняти виклик, штрафуються.

Штрафування відбувається наступним чином: від дійсного (виміряного) значення потужності сигналу віднімається попередньо визначене значення потужності (штрафна потужність). Це значення залежить від причини спроби передачі обслуговування: невдала попередня спроба передачі виклику, погана якість в попередній комірці, занадто велике значення часового випередження в старій комірці. В результаті штрафування оштрафована комірка може переміститись на нижчу позицію в списку початкового сортування. Слід відмітити, що штрафування дійсне лише протягом певного, визначеного проміжку часу, причому цей час залежить від причини спроби передачі обслуговування. На рис. 8.52 показано, як може змінюватись позиція комірки в списку початкового сортування залежно від параметрів штрафування.

Ситуація 1. Комірка А обслуговує виклик. В певний момент часу система вирішує, що якість з'єднання погіршилась і необхідна передача обслуговування. Комірка В є найкращим кандидатом для прийняття виклику, але вона не має вільних каналів і не може прийняти виклик. Наступним кандидатом є комірка С.

Ситуація 1	Ситуація 2	Ситуація 3	Ситуація 4
Комірка А	Комірка А	Комірка С	Комірка С
Комірка В	Комірка С	Комірка А	Комірка В
Комірка С	Комірка D	Комірка D	Комірка А
Комірка D	Комірка E	Комірка E	Комірка D
Комірка E	Комірка В	Комірка В	Комірка E
Комірка F	Комірка F	Комірка F	Комірка F
<i>Перед спробою передачі обслуговування</i>	<i>Після невдалої спроби передачі виклику комірки В</i>	<i>Після успішної спроби передачі виклику комірки С</i>	<i>Після завершення штрафного часу</i>

Рис.8.52 Зміна позиції комірки в списку початкового сортування внаслідок штрафувannya

Ситуація 2. Внаслідок невдалої спроби передачі обслуговування комірка В оштрафована. Це означає, що від дійсного значення потужності сигналу комірки В віднімається значення потужності, визначене для випадку невдалої спроби передачі виклику. В результаті позиція комірки В у списку змінюється. Штрафування буде дійсне протягом часу, визначеного для випадку невдалої спроби передачі обслуговування.

Ситуація 3. Система робить спробу передати виклик комірки С. Спроба закінчується успішно.

Ситуація 4. Комірка С обслуговує виклик. Після проходження часу штрафувannya комірка В знову пересувається на найвищу позицію в списку початкового сортування.

Приведений приклад обробки штрафувannya справедливий для випадку перемикання між комірками в межах одного контролера базових станцій. При перемиканні між комірками, які належать різним BSC, контролер, який приймає виклик, може не підтримувати режим штрафувannya і може передавати виклик назад відразу після прийняття обслуговування. В такому випадку BSC-джерело повинне знати чи BSC-призначення підтримує обробку штрафувannya. Це вказується шляхом встановлення відповідного індикатора для кожної зовнішньої комірки, тобто комірки, яка належить іншому BSC, але відома BSC-джерелу.

Крок 5: Обробка MS, які швидко рухаються

Проблема обробки MS, які переміщуються з великою швидкістю має місце при невеликих розмірах комірок, особливо при використанні ієрархічної коміркової структури. Тому перш, ніж перейти до методів вирішення проблеми швидких MS, слід детальніше розглянути взаємозв'язок між комірками в ієрархічній структурі.

Ієрархічна коміркова структура передбачає використання трьох рівнів комірок (рис. 8.53):

- рівень 3 (комірки типу “парасоля”);
- рівень 2 (звичайні комірки);
- рівень 1 (мікрокомірки).

Необхідність використання ієрархічної коміркової структури є наслідком оптимізації існуючої коміркової мережі. При плануванні розміщення базових станцій може виникнути дві проблеми:

- між звичайними комірками є території, де немає покриття (пробіли);
- існують території з надзвичайно інтенсивним трафіком.

Пробіли можуть бути покриті великими комірками, тобто базовими станціями з великою вихідною потужністю і великим значенням часового випередження. Такі комірки відносяться до рівня 3 і мають найнижчий пріоритет в ієрархічній структурі. Оскільки комірки рівня 3 не тільки покривають пробіли, але і зони звичайних комірок, вони можуть бути використані і у випадку, коли звичайні комірки перевантажені.

Використання “парасоль” вимагає високої вихідної потужності базової станції і призводить до появи сильних інтерференційних завад. Як наслідок, вони “крадуть” ємність мережі. Не слід плутати комірки рівня 3 з субкомірковою структурою: “парасолі” вимагають власну базову станцію. Термін “парасоля” вказує лише на низький рівень пріоритету при виборі комірки.

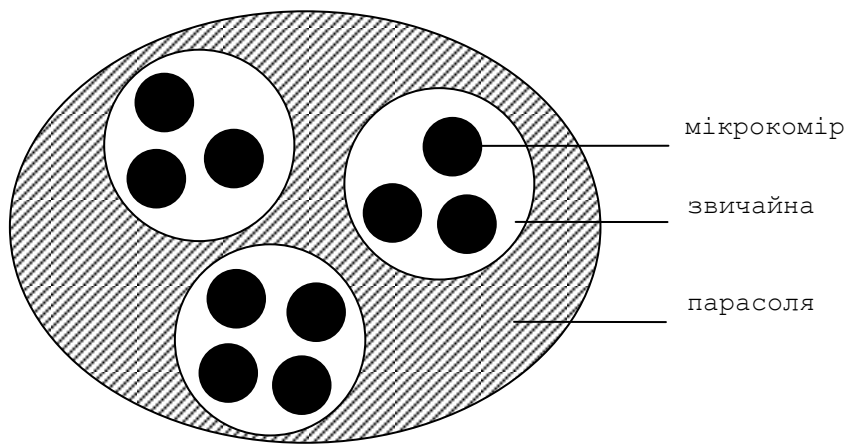


Рис.8.53 Ієрархічна коміркова структура

Території з високою інтенсивністю трафіку звичайно є невеликі за площею: бізнес-центр, виставка, ярмарок і т.д. Використання невеликих комірок (мікрокомірок), які б покривали цю територію є найкращим вирішенням проблеми. Мікрокомірки мають найвищий пріоритет при виборі комірок.

Передача обслуговування може відбуватись як від комірки нижнього рівня до верхнього, так і в зворотному порядку. Пріоритет рівня комірки враховується при складанні списку основного сортування. Для цього на етапі основного сортування складається три списки: кожен рівень має свій список комірок. Далі утворюється один список, в якому комірки розташовані за пріоритетом: комірки рівня 1 - в першій позиції, комірки рівня 3 - в останній. В результаті з двох сусідніх комірок, які належать різним рівням, комірка вищого рівня може вважатись кращим кандидатом, навіть, якщо вона гірша за результатами основного сортування.

Оскільки комірки вищих рівнів мають нижчий пріоритет, система постійно намагається передати обслуговування мобільною станцією коміркам нижчих рівнів. Це може призвести до великої кількості перемикань, особливо у випадку, коли мобільна станція рухається достатньо швидко (рис. 8.54).

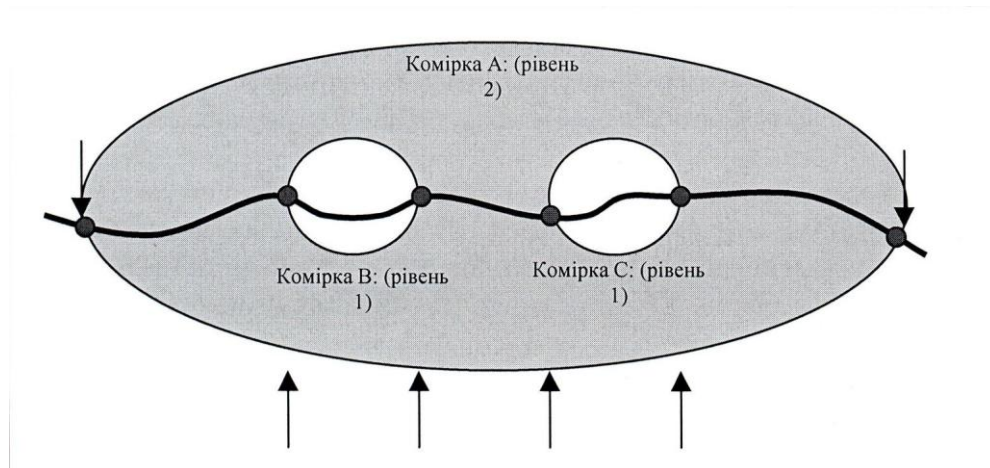


Рис.8.54 Передача обслуговування при швидкому переміщенні MS

На рис. 8.54 дорога (чорна лінія) проходить через одну звичайну комірку і дві мікрокомірки. В такому випадку при переміщенні автомобіля (мобільної станції) система повинна ініціювати шість передач обслуговування.

Існує можливість уникнути додаткових перемикачів між комірками ієрархічної структури. Нехай при отриманні першого звіту про комірку В контролер базових станцій “штрафує” її, віднімаючи від реального значення потужності деяке значення (штрафну потужність). Штрафування діє протягом заданого оператором часового інтервалу $RTIMTEMP$ і призводить до зміщення комірки В на нижчу позицію в списку сортування. В такому випадку, якщо мобільна станція рухається швидко і втратить з поля зору комірку В до того, як закінчиться час дії штрафування, передачі обслуговування не буде.

Виникає питання вибору величини $RTIMTEMP$. Нехай максимальна швидкість на заданій ділянці (рис. 8.54) становить 60 км/с. Припустимо, що результати тестування показують, що відстань між двома точками: першим отриманим звітом про комірку В і зникнення комірки В із звітів мобільної станції - становить 1 км. Тоді час між цими точками становить:

$$t = s/v = 1/60 = 1 \text{ хвилина.}$$

В такому випадку параметр $RTIMTEMP$ слід вибирати більшим, ніж 1 хвилина. Якщо мобільна станція затримається в комірці В довше, комірка буде включена в список кандидатів як неоштрафована комірка рівня 1.

В стандарті GSM також передбачена можливість вмикання для окремих комірок режиму обробки мобільних станцій, які рухаються швидко. Такі станції ідентифікуються шляхом підрахунку кількості перемикань між комірками протягом визначеного проміжку часу (алгоритм визначення інтенсивності перемикань функціонує постійно, незалежно від того, включений режим обробки мобільних станцій, що швидко рухаються, чи ні). Якщо інтенсивність перемикань перевищує деяке порогове значення, ієрархічна структура перестає враховуватись при сортуванні комірок і сортування комірок здійснюється по максимальній потужності. При новому перемиканні між комірками алгоритм визначення інтенсивності перемикань обнулюється, і знову при сортуванні будуть враховуватись пріоритети ієрархічної структури.

Крок 6: Перевірка невідкладних умов

1. Погіршення якості передачі

Система неперервно визначає якість зв'язку як по каналу “вверх”, так і по каналу “вниз”. Для кожного каналу задається граничне допустиме значення якості передачі (в dtqu - одиницях, визначених специфікацією GSM). Зв'язок між коефіцієнтом помилок (BER) і dtqu приведено в табл.8.9.

Таблиця 8.9. Зв'язок між BER і dtqu

BER перед каналним декодером	dtqu
<0.2%	0
0.2-0.4%	10
0.4-0.8%	20
0.8-1.6%	30
1.6-3.2%	40
3.2-6.4%	50
6.4-12.8%	60
>12.8%	70

Як видно з таблиці, хороша якість (низький коефіцієнт помилок) відповідає малим значенням dtqu, погана якість - великим значенням dtqu.

Якщо в звіті хоча б для одного каналу якість зв'язку (в dtqu) перевищує порогове значення, система вирішує, що необхідно виконати невідкладну передачу обслуговування (urgency handover).

2. Перевищення граничного значення часового випередження

Часове випередження - це міра часу поширення пакета між мобільною і базовою станцією. Для звичайної комірки максимальний радіус становить 35 км, що відповідає величині часового випередження $TA=63$ бітові інтервали. При більших значеннях TA (відстань між MS і BTS перевищує 35 км) пакети будуть приходити з запізненням і накладатись на пакети в сусідніх часових інтервалах, що може призвести до втрати інформації. Тому граничне значення часового випередження для звичайних комірок становить 63 бітові інтервали. Якщо система виявляє в звіті TA , яке перевищує граничне, вона робить висновок про необхідність невідкладної передачі обслуговування.

Крок 7: Організація списку кандидатів

Кінцевий список кандидатів залежить не лише від списку початкового сортування, але і від інших умов:

- вимога призначення каналу гіршій комірці;
- перевищення граничної величини часового випередження (невідкладна умова);
- недопустима якість зв'язку (невідкладна умова);
- необхідність перемикання між надкоміркою і підкоміркою;
- необхідність перемикання між звичайними комірками.

Деякі з цих умов виявляються на початкових стадіях алгоритму локалізації, наприклад невідкладне перемикання між комірками внаслідок перевищення допустимого часового випередження. Проте всі перераховані умови є одного рівня і можуть змінити порядок комірок в списку кандидатів. Як наслідок можливі наступні перемикання:

1. Перемикання з K-комірки в L-комірку (передача обслуговування кращій комірці).

2. Перевищення граничної величини часового випередження (невідкладна умова).
3. Якість зв'язку нижче допустимої (невідкладна умова).
4. Перемикання з комірки вищого рівня в комірку нижчого рівня (ієрархічна структура).
5. Перемикання з комірки нижчого рівня в комірку вищого рівня (ієрархічна структура).
6. Зміна підкомірки.
7. Перемикання всередині комірки.

Кроки 8 і 9: Процес обробки виклику і оцінка результату визначення каналу

Процес обробки виклику - це етап, на якому здійснюється перемикання каналів з точки зору сигналізації. Іншими словами, на цьому етапі відбувається резервування нового виділеного каналу для комірки-призначення, забезпечується сигналізація до мобільної станції, отримується результат спроби перемикання і у випадку успішної передачі обслуговування звільняється старий канал. Крім того, на даному етапі обробляється сигналізація з MSC.

Після того, як алгоритм локалізації сформує кінцевий список кандидатів, відбувається спроба передачі обслуговування комірці, яка перебуває на найвищій позиції в списку. Результат спроби перемикання повертається алгоритму локалізації, який визначає які штрафування потрібно застосувати в наступному циклі.

Передача обслуговування - це складний процес, який відбувається по-різному, залежно від умов, через які ініціюється перемикання. Особливості перемикання каналів залежно від різних причин приведено нижче.

1. Перемикання між комірками ієрархічної структури

- *Передача від нижнього рівня до верхнього.* Якщо рівень по потужності сигналу обслуговуючої комірки (рівень 1) стає меншим, ніж деяке порогове значення LEVTHR, система включає в список кандидатів також комірки

вищих рівнів. Для того, щоб запобігти постійному стрибанню між комірками різних рівнів, використовується параметр LEVHYST, який задається оператором і ускладнює умови переходу між рівнями. Для зміни рівня використовується наступний критерій (рис. 8.55):

$$RXLEV_0 < LEVTHR - LEVHYST,$$

де $RXLEV_0$ - рівень сигналу по потужності, який приймає мобільна станція від обслуговуючої BTS.

Кандидатами вважаються комірки, для яких виконується умова:

$$RXLEV_n > LEVTHR + LEVHYST,$$

де $RXLEV_n$ - рівень сигналу по потужності, який приймає мобільна станція від сусідньої BTS.

Якщо ця умова справедлива для комірок нижніх рівнів, то такі комірки мають пріоритет перед комірками вищих рівнів. Слід відмітити, що для комірок рівня 3 порогове значення LEVTHR не встановлюється.

- *Передача від верхнього рівня до нижнього.* Комірка нижчого рівня вважається кращим кандидатом, якщо для неї виконується умова:

$$RXLEV_n > LEVTHR + LEVHYST$$

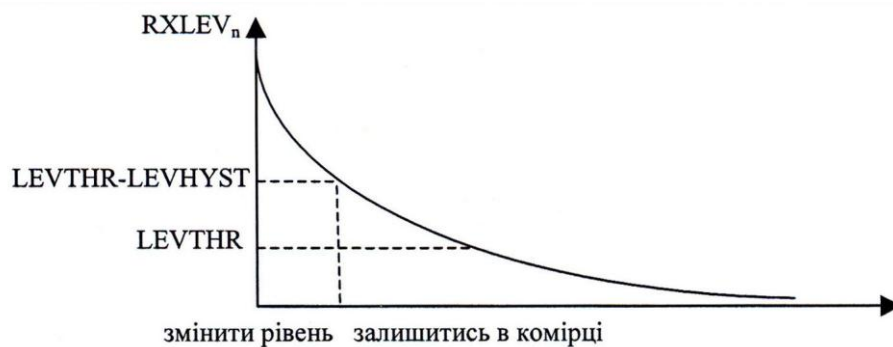


Рис.8.55 Зміна рівня: від вищого до нижчого

2. Перемикання в межах комірки

Перемикання в межах комірки - це перемикання з одного виділеного каналу на інший в межах тієї самої комірки. Таке перемикання може також

включати зміну ВССН-частоти. Використання перемикачів в межах комірки може бути зумовлене як поганою якістю передачі за рахунок спільноканальних інтерференційних завад, так і релеєвськими завмираннями сигналів.

Для того, щоб запобігти постійним стрибкам між каналами використовується лічильник перемикачів в межах комірки і таймер, який визначає час дії лічильника. Якщо кількість послідовних перемикачів перевищує допустиме значення, наступні перемикачів будуть заборонені до того часу, поки не вийде час, встановлений таймером.

3. Перемикачів внаслідок поганої якості (BQ-handover)

Між будь-якими двома комірками обов'язково визначаються “взаємовідносини”, тобто можливість або неможливість передачі обслуговування. Якщо “взаємовідносини” між комірками не визначені, передача обслуговування заборонена.

Ініціювання передачі обслуговування внаслідок погіршення якості передачі залежить від того, як близько перебуває мобільна станція до межі між коміркою, яка обслуговує виклик, і коміркою, якій система хоче передати обслуговування. Це пояснюється тим, що при визначенні “взаємовідносин” між комірками вказується т.зв. коридор для передачі обслуговування внаслідок поганої якості (рис. 8.56).

Чорна лінія між двома комірками (рис. 8.56) позначає зовнішню межу коридору, тобто географічний центр між комірками, де рівні вхідного сигналу від станцій А і В на приймачі мобільної станції будуть однакові. Внутрішня межа коридору:

$$RX_LEV_внутр = RX_LEV_зовн - BQOFFSET,$$

де $RX_LEV_зовн$ - рівень потужності на зовнішній межі коридору;

$BQOFFSET$ - рівень потужності, який визначає ширину коридору. Цей параметр задається при визначенні взаємовідносин між комірками.

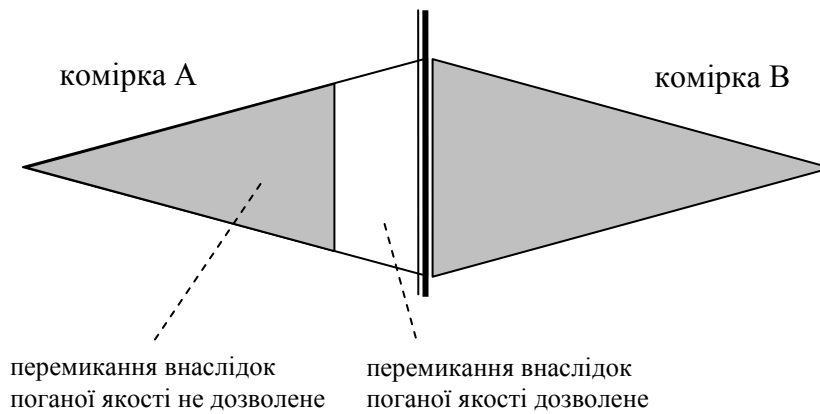


Рис.8.56

Якщо умова поганої якості буде виявлена ззовні коридору, мобільна станція залишиться в старій комірці і перемикання не буде.

8.4.2.6. Виділення каналів при передачі обслуговування

Процес виділення нового каналу можна розбити на два етапи:

- виділення сигналізаційного каналу SDCCCH;
- виділення розмовного каналу TCH.

В деяких випадках зручно виділити канал SDCCCH в одній комірці, а TCH - в другій. Це зручно, якщо в комірці, де використовується SDCCCH, немає вільних розмовних каналів або коли в момент виділення SDCCCH каналу сусідня комірka стає кращим кандидатом для обслуговування виклику. З метою підвищення доступності до мережі використовується перемикання на SDCCCH каналах. Цей метод використовується при погіршенні якості зв'язку по SDCCCH каналу. В такому випадку система не буде розривати з'єднання, а перемкне виклик на новий SDCCCH канал.

У випадку перевантаження комірki будь-який новий виклик буде втрачатись, поки не з'являться вільні канали. Щоб запобігти цьому, з'єднання встановлюється в даній комірці по каналу SDCCCH, а далі система пробує передати обслуговування сусідній, гіршій з точки зору обслуговування виклику, комірці. Передача виклику гіршій комірці можлива лише протягом

певного, чітко визначеного часу. Якщо за цей час спроби перемикавання на нову комірку будуть невдалі, виклик буде втрачений. Виділення каналу в гіршій комірі дозволяє підвищити доступність до мережі, проте такий тип передачі обслуговування можливий лише в чітко визначеному коридорі між комірками.

Ширина коридору, а також дозвіл виділення каналу в гіршій комірі визначаються для кожної комірки індивідуально.

Іншим методом підвищення доступності до мережі є розвантаження комірок шляхом передачі встановлених з'єднань іншим коміркам. Даний метод застосовується лише до ТСН каналів. Якщо в сусідній комірі кількість вільних ТСН каналів є більша, ніж граничне значення, встановлене при визначенні комірки в системі, передача виклику дозволена, в іншому випадку - заборонена. Слід відмітити, що в іншій комірі можуть бути передані тільки ті виклики, які перебувають в межах визначеного коридору, тобто близько до номінальної межі для передачі обслуговування, причому передаються спочатку виклики, які перебувають ближче до цієї межі. Це потрібно для того, щоб уникнути одночасної передачі всіх викликів, що може призвести до їх втрати.

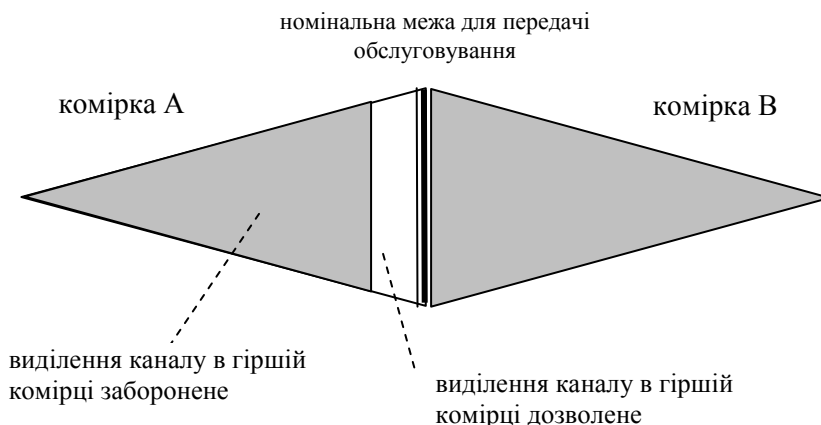


Рис.8.57 Передача обслуговування гіршій комірі

8.5. Транскодер

В системі базової станції швидкість передачі як закодованої розмовної інформації, так і даних на різних ділянках є різною. На радіоінтерфейсі швидкість передачі даних становить приблизно 13 кбіт/с, розмовна інформація

для повношвидкісного каналу також передається з швидкістю 13 кбіт/с (пропускна здатність часового інтервалу радіоінтерфейсу становить понад 33 кбіт/с, проте для захисту інформації додається багато надлишкової інформації). На А-інтерфейсі використовуються стандартні ІКМ-канали, по яких інформація передається з швидкістю 64 кбіт/с. В результаті виникає необхідність зміни швидкості передачі, а для розмовної інформації - ще і перетворення з GSM-формату в ІКМ-формат (кодування мовлення). Функції кодування мовлення і адаптацію швидкості виконує транскодер.

Транскодер взаємодіє з контролером базових станцій по А-ter інтерфейсу, а з центром комутації (MSC) - через А-інтерфейс. Оскільки швидкість передачі інформації на А і А-ter інтерфейсах є різною, то транскодер розміщує 4 канали 16 кбіт/с А-ter інтерфейсу в 1 ІКМ канал 64 кбіт/с. Канали А-інтерфейсу звичайно орендуються в телефонній мережі загального користування (ТМЗК), вони дорогі, і не завжди оператору доступна необхідна кількість каналів. В результаті більшість операторів віддають перевагу розміщенню транскодера поблизу центру комутації.

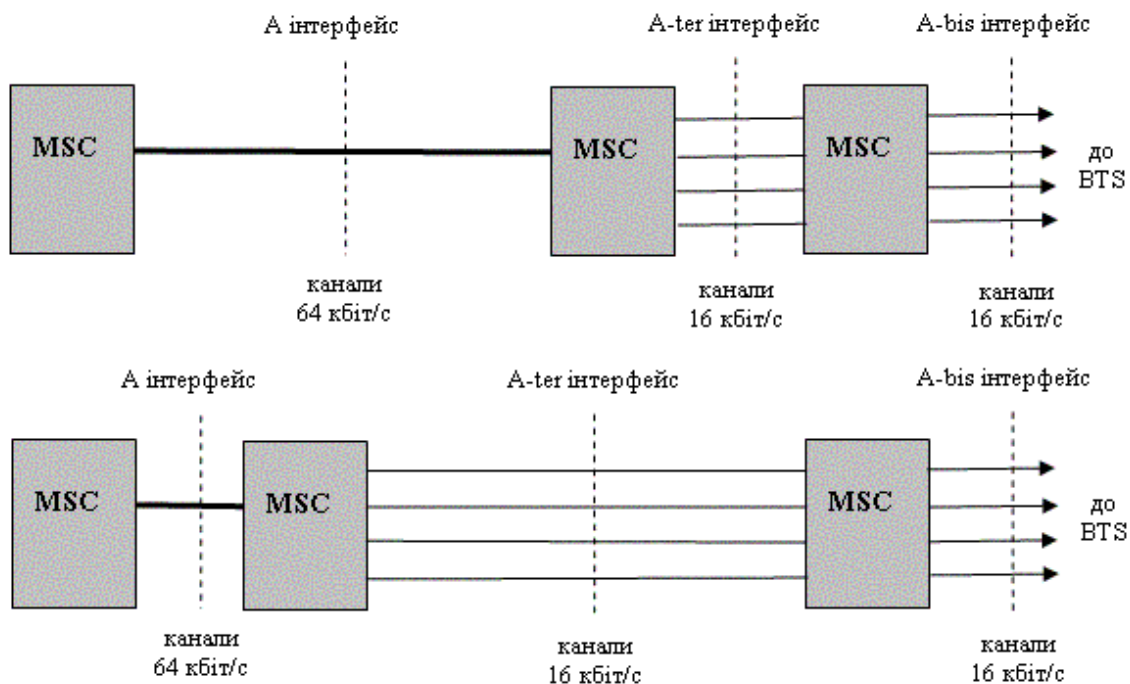


Рис.8.58 Варіанти розміщення транскодера

Слід відмітити, що незалежно від фізичного розташування транскодер завжди відноситься до системи базової станції і відокремлюється від системи комутації А-інтерфейсом.

Транскодер перетворює формат розмовної інформації і виконує адаптацію швидкості в обох напрямках. Для цього в його апаратне забезпечення включений комутатор субшвидкості (SubRate Switch), який працює з потоками, швидкість яких менша, ніж 64 кбіт/с.

8.6. Система базової станції з точки зору систем третього покоління

8.6.1. Стратегії переходу до послуг третього покоління

Таблиця 8.10. Порівняльні характеристики технологій мобільного зв'язку різних поколінь

Технології	2G	2,5G	3G	4G
Базові послуги	мовлення	мовлення дані	мовлення дані відеодані мультимедіа	мовлення дані мультимедіа мобільне телерадіомовлення
Швидкість передачі, кбіт/с	9.6-14.4	115 (фаза 1) 384 (фаза 2)	2048 (фаза 1) 10000 (фаза 2)	10000-44000
Тип комутації	Комутація каналів	Змішана (переважно каналів)	Змішана (переважно пакетів)	Вимоги невизначені
Базові технології радіодоступу	GSM	GPRS, EDGE	Стандарти серії IMT	Стандарти невизначені
Терміни експлуатації	1995-2010	2000-2015	2002-2020	2012-2025

На відміну від технологій попередніх поколінь, де мовлення було домінуючим видом послуг, в системах третього покоління передбачається забезпечити весь спектр сучасних послуг, включаючи передачу мовлення, роботу в режимі комутації каналів і пакетів, взаємодію з застосуваннями Internet, симетричну і асиметричну передачу з високою якістю - і в той же час гарантувати сумісність з існуючими системами.

Третє покоління мобільного зв'язку вже на першому етапі повинне забезпечувати високу пропускну здатність, яка може гнучко змінюватись залежно від швидкості переміщення мобільного абонента:

- 2048 кбіт/с для обслуговування стаціонарних абонентів і тих, що переміщуються в приміщеннях (швидкість менше 3 км/год);
- до 384 кбіт/с при низькій мобільності (швидкість від 3 до 12 км/год) і локальній зоні покриття;
- до 144 кбіт/с при високій мобільності (швидкість від 12 до 120 км/год) і широкій зоні покриття;
- до 64 (144) кбіт/с при глобальному покритті (супутниковий зв'язок).

Що стосується набору послуг, то він фактично наближується до того, що надається в мережах фіксованого зв'язку. В системах третього покоління послуги прийнято поділяти на дві групи: немультимедійні (вузькосмугове мовлення, низькошвидкісна передача даних, трафік мереж з комутацією каналів) і мультимедійні (асиметричні і інтерактивні). Очевидно, що досягнення таких високих швидкостей при обмеженому частотному ресурсі і роботі в каналах з завмираннями буде вимагати розробки принципово нових підходів до побудови радіоінтерфейсу.

В рамках стратегії IMT-2000 розглядаються дві стратегії переходу до послуг третього покоління: поступова (еволюційна) і миттєва (революційна). На заході ці підходи отримали позначення N (англ. Narrowband) і W (англ. Wideband) стратегій (рис. 8.59).

Революційна стратегія передбачає впровадження всіх нових технологій та

інтерфейсів, проте передбачає повну заміну існуючого обладнання і програмного забезпечення, що супроводжується великими капітальними витратами і значним комерційним ризиком. Для відлагодження даної стратегії в різних частинах світу вже розгортаються експериментальні мережі. Японія та азійські регіони стануть першими масовими полігонами, де нові технології планується випробувати до 2002 року. Однією з найважливіших ознак, які відрізняють два підходи є спосіб освоєння частотного діапазону. При революційному сценарії вимагається новий частотний ресурс.

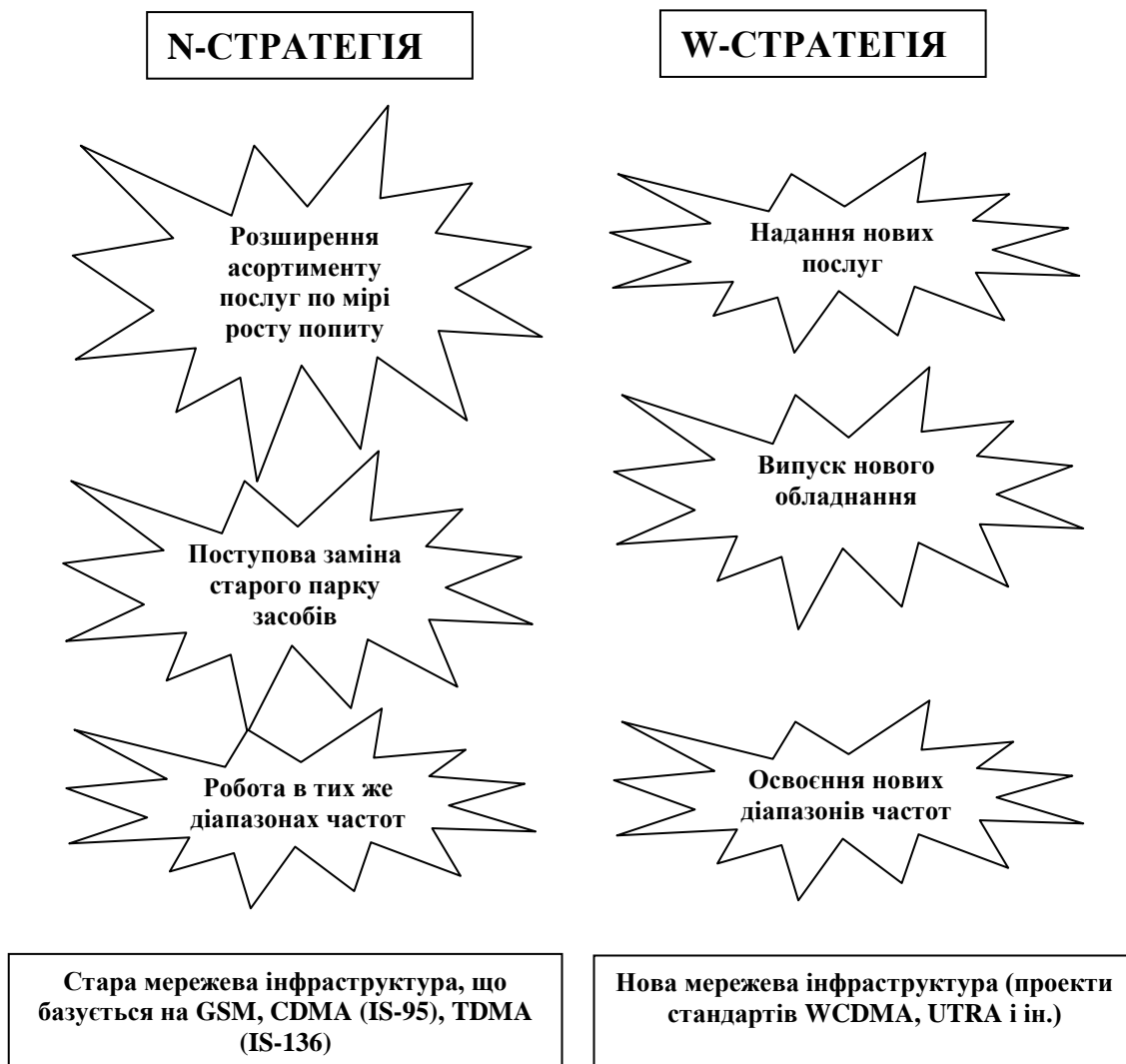


Рис.8.59 Дві стратегії переходу до систем третього покоління

Японія і Європа мають намір піти цим шляхом і виділити для систем

третього покоління індивідуальні смуги частот. В США спектр, виділений ІМТ-2000, вже зайнятий службою PCS, тому системи третього покоління будуть працювати на старих частотах разом з мережами стандартів TDMA/AMPS.

Прибічники двох наймасовіших технологій другого покоління TDMA/AMPS і GSM встали на еволюційний шлях розвитку. Сьогодні ці системи мають обмежені можливості по нарощуванню пропускної здатності і видам послуг в рамках виділеного частотного діапазону. Зростання їх ємності без додаткового розширення спектру можливе лише за рахунок переходу на напівшвидкісні канали, введення багатосекторних антен або використання спектрально-ефективних методів модуляції (наприклад, 8PSK і ін.)

Таблиця 8.11. Дві стратегії освоєння ринку мобільного зв'язку

Ознака	Еволюційний підхід	Револьюційний підхід
Метод використання частотного ресурсу	Робота в старих діапазонах	Освоєння нових діапазонів
Принцип надання послуг	Поступове розширення асортименту послуг	Нові послуги з початку розгортання
Пропускна здатність	Поступове нарощування	Висока з самого початку
Стратегія створення мережевої інфраструктури	Повільний і поступовий перехід від 2G до 3G по мірі появи попиту на послуги	Створення дослідних районів ("островів") з повним набором послуг
Технологічний рівень	Нові технології, що реалізуються в окремих елементах	Всі технології – найновіші
Архітектура мережі	Максимальне використання існуючої інфраструктури	Нова

Комерційний ризик	Низький	Високий
Склад операторів	В основному той же ж, що і в 2G	Оператори, які купили ліцензію на послуги 3G
Глобальний роумінг	З обмеженням	Без обмежень
Капітальні затрати	Незначні	Значні

Еволюційний підхід вимагає менших капітальних затрат і передбачає плавну заміну обладнання залежно від рівня попиту на конкретні види послуг. Такий підхід дозволяє максимально використовувати існуючу інфраструктуру мережі зв'язку, вводячи нові мережеві елементи в процесі послідовної модернізації. Основний недолік еволюційного підходу - відсутність можливості використання всіх переваг нових технологій і організації глобального роумінгу.

Очевидно, що ринкові фактори і особливості регіональних ринків Європи, Північної Америки і Азії будуть перешкоджати швидкому переходу від існуючих технологій до стандартів третього покоління. Етап розгортання нових технологій за оцінками спеціалістів складе не менше 2-3 років, а сумісне існування буде тривати не менше 10 років.

8.6.2. Еволюція мереж GSM

В кінці 1980-х років, коли тільки закладались основи GSM, існувала думка, що цей стандарт технічно перенасичений і його можливості ніколи реально не будуть використані. Проте вже сьогодні всі базові можливості стандарту не тільки реалізовані, але закладені умови для його подальшої модернізації. Вдосконалення мереж GSM іде по кількох взаємозв'язаних напрямках:

- інтеграція з іншими мережами радіозв'язку;
- створення інтегрованих мереж GSM-900/GSM-1800, і в перспективі GSM-400;
- впровадження нових технічних рішень, які забезпечують високошвидкісну передачу даних з комутацією пакетів і взаємодія з мережами ТМЗК, X.25, АТМ і ISDN.

В технологію GSM вкладені немалі інвестиції, і це визначило еволюційний шлях її розвитку. Відбувається поступове нарощування мережевих елементів, вдосконалення контролерів і базових станцій, розробка і створення дворежимних абонентських терміналів. Використання GSM в якості базової технології для надання послуг третього покоління має і другу важливу перевагу - практично з перших днів модернізованої мережі, вона буде володіти потенціально великою абонентською базою.

На даний час визначились наступні основні шляхи модернізації систем на базі GSM:

- високошвидкісна передача даних з комутацією каналів HSCSD (High Speed Circuit Switched Data);
- узагальнені послуги пакетної радіопередачі GPRS (General Packet Radio Service);
- реалізація системи доступу EDGE (Enhanced Data Rates For GSM Evolution);
- впровадження системи GSM-400 для зв'язку в сільській місцевості і малонаселених районах.

8.6.3. Високошвидкісна передача даних з комутацією каналів HSCSD

Сучасні мережі передачі даних мають низьку швидкість передачі - до 9.6 кбіт/с. Фактично її достатньо лише для роботи електронної пошти і передачі коротких повідомлень довжиною 160 символів (послуга SMS). Маршрутизація даних в мережах GSM здійснюється з використанням обладнання з комутацією каналів, що є незручним для користувача. Час встановлення з'єднання при використанні модема достатньо великий - близько 20 с. Всі ці фактори свідчать про те, що в рамках існуючого стандарту GSM виконання вимог систем третього покоління неможливе.

Перший крок в напрямку вдосконалення існуючих мереж GSM - реалізація на базі технології HSCSD передачі даних з швидкістю 19.2 кбіт/с (два канальних інтервали по 9.6 кбіт/с) або 28.8·(2x14.4) кбіт/с. Слід відмітити, що на цих швидкостях в даний час працює більшість користувачів мережі Internet в

європейській країнах.

Впровадження HSCSD із швидкістю до 28.8 кбіт/с вимагає в основному модифікації програмних засобів і протоколів обміну, при цьому інфраструктура діючої системи GSM залишається незмінною. При зайнятті двох каналних інтервалів в одному кадрі часовий зсув сигналів між прийомом сигналів базової станції і наступною їх передачею мобільною станцією не перевищує чотирьох інтервалів, що в принципі підтримується існуючими протоколами GSM.

В HSCSD використовуються дві схеми кодування: CS1 із швидкістю передачі 9.6 кбіт/с і CS2 із швидкістю 14.4 кбіт/с. По мірі розвитку HSCSD планується подальше збільшення швидкості за рахунок об'єднання чотирьох часових інтервалів і передачі інформації із швидкістю $38.4 \cdot (4 \times 9.6)$ кбіт/с (схема CS1) або до $57.6 \cdot (4 \times 14.4)$ кбіт/с (схема CS2). Такий режим вже не підтримується GSM телефонами і не може бути реалізований без їх доробки.

Що стосується ще більшого підвищення швидкості до 76.8 кбіт/с (CS1) або 115.2 (CS2) шляхом об'єднання восьми каналів по 9.6 кбіт/с або 14.4 кбіт/с, то реалізація такої можливості вимагає доробки магістральної базової мережі, де швидкість обміну інформацією між системою базової станції і системою комутації (A-інтерфейс) обмежена величиною 64 кбіт/с.

Незважаючи на можливість підвищення в декілька разів швидкості передачі, технологія HSCSD не дозволяє позбавитись від основного недоліку існуючих мереж GSM - неефективної обробки невеликих за об'ємом потоків даних, і відповідно, нераціонального управління радіоресурсами. Прийнятий в мережах GSM метод тарифікації - за час з'єднання, а не за реальне використання каналів - є одним з основних причин гальмування процесу впровадження послуг передачі даних HSCSD. Тому малоймовірно, що технологія HSCSD, яка базується на комутації каналів, буде в майбутньому поширена в мережах GSM.

8.6.4. Послуга передачі даних GPRS

Існуючі мережі GSM, в тому числі і нова технологія HSCSD, можуть

підтримувати лише трафік мереж з комутацією каналів. Тому одним з найважливіших кроків на шляху еволюції мереж GSM стало впровадження послуг пакетної передачі GPRS (General Packet Radio Service). Система GPRS забезпечить прозору передачу даних (від абонента до абонента) в пакетному режимі IP протоколу з підвищенням швидкості передачі до 115.2 кбіт/с. Слід відмітити, що саме послуга GPRS здатна надавати нові види послуг третього покоління вже сьогодні.

Оскільки послуга передачі даних GPRS надбудовується над існуючою мережею GSM, то немає необхідності в кардинальній модернізації існуючої мережевою інфраструктури. Що стосується нових функціональних можливостей і зміни принципу спряження з новими мережами, то вони є завданнями системи комутації і являються лише розширенням існуючої мережі GSM.

На рис. 8.60 приведено основні вузли модернізованої системи мобільного зв'язку GSM, де:

BG (Billing Gateway) - білінговий шлюз;

BTS (Base Transceiver Station) - базова приймально-передавальна станція;

EIR (Equipment Identification Register) - реєстр ідентифікації обладнання;

GGSN (Gateway GPRS Support Node) - шлюзовий вузол підтримки послуг GPRS;

GMSC (Gateway MSC) - шлюзовий мобільний центр комутації;

HLR (Home Location Register) - домашній реєстр;

IWMSC (Interworking MSC) - MSC для забезпечення міжмережевого обміну;

MSC/VLR (Mobile Switching Center/ Visitor Location Register) - мобільний центр комутації суміщений з гостьовим реєстром;

MS (Mobile Station) - мобільна станція;

PCU (Packet Controller Unit) - пакетний контролер;

SGSN (Serving GPRS Support Node) - сервісний вузол підтримки послуг GPRS;

SM-SC (Short Message Switching Center) - центр комутації коротких повідомлень;

SMS (Short Message Service) - послуга коротких повідомлень;

PDN (Public Data Network) - мережа передачі даних загального користування;

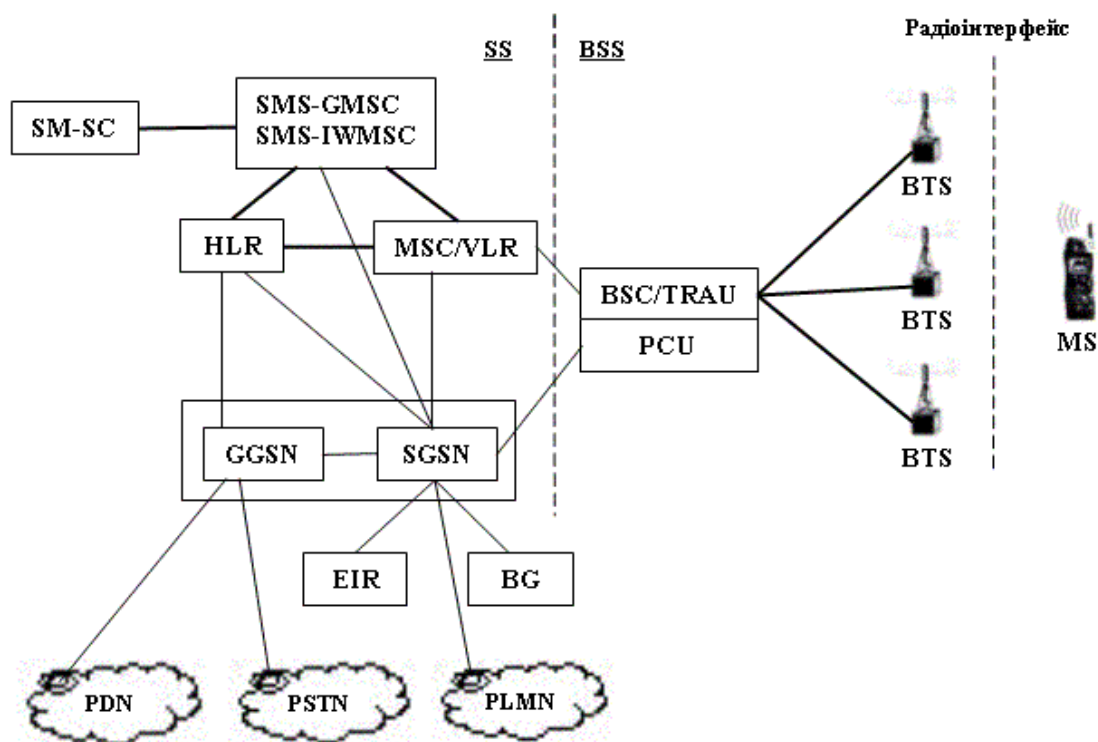


Рис.8.60 Архітектура мережі GSM

PSTN (Public Switched Telephone Network) - телефонна мережа загального користування;

PLMN(Public Land Mobile Network) - мережа сухопутного мобільного зв'язку загального користування.

Як видно з рис. 8.60, впровадження GPRS пов'язано в основному із додаванням нових мережевих елементів, які призначені для підтримки пакетної передачі даних: SGSN та GGSN - в системі комутації, PCU - в системі базової станції.

Сервісний вузол SGSN забезпечує маршрутизацію пакетів, аутентифікацію і шифрування, а також керування мобільністю всіх абонентів, які перебувають в

його зоні обслуговування. На вищому мережевому рівні вузол SGSN підтримує функції, аналогічні тим, які забезпечує MSC/VLR в мережах з комутацією каналів. Вихідний трафік з вузла SGSN перенаправляється до контролера базових станцій, і далі - через базові станції до абонентів. Зв'язок мережі GSM з зовнішніми мережами передачі даних здійснюється через протоколи X.25 та IP і реалізується через вузол GGSN, який відіграє роль шлюзу між SGSN та PDN. В обладнанні GGSN реалізовані функції забезпечення безпеки, обробки рахунків абонентів і динамічного виділення IP-адрес. Зважаючи на те, що вузли SGSN та GGSN відносяться до системи комутації, а не системи базової станції, варіанти їх розміщення, протоколи взаємодії та інтерфейси в даній роботі не розглядаються.

Введення послуг GPRS вимагає не тільки вдосконалення контролерів базових станцій та доробки програмного забезпечення, але й призводить до нововведень на радіоінтерфейсі. Для передачі IP-трафіка в GPRS використовується один або декілька виділених логічних каналів, які називаються PDCH (англ. Packet Data Channel) і оптимізовані для пакетної передачі даних.

Канальна структура GPRS включає три типи логічних каналів. Інформаційні пакети передаються по логічному каналу PDTCH (англ. Packet Data Traffic Channel). Широкомовна і загальносистемна інформація передаються з базових станцій на мобільні по каналу PBCCCH (англ. Packet Broadcast Control Channel). Третій тип логічного каналу PCCH (англ. Packet Common Control Channel) призначений для передачі керуючої інформації. В системі GPRS він виконує декілька функцій. По ньому передаються повідомлення про виклик, які вказують на початок пакетної передачі. Канал PCCH може також використовуватись базовою станцією для передачі даних про розподіл мережевих ресурсів між мобільними станціями. Проте використання PCCH не є обов'язковим у всіх комірках мережі GSM/GPRS. Замість нього мобільний абонент може прослуховувати стандартний канал управління CCCH, який використовується в GSM.

Один канал PDCH відображається в один часовий інтервал тривалістю 576.92 мкс, що дозволяє використовувати ту ж каналну структуру, що і в звичайних мережах GSM. Передача інформації в GPRS здійснюється з швидкістю 270.833 кбіт/с з використанням гаусівської маніпуляції з мінімальним зсувом (GMSK). Як і в GSM, один символ закодованої послідовності відповідає одному модульованому символу. Формат каналного інтервалу в GPRS також ідентичний GSM, тобто звичайний пакет містить 2x57 інформаційних бітів, 2 службові біти, 26 бітів тренувальної послідовності і 2x3 кінцеві біти. Сусідні інтервали розділені захисним інтервалом, тривалість якого відповідає 8.25 бітам.

Для забезпечення гнучкості і підвищення пропускної здатності в системі GPRS запропоновано чотири схеми кодування даних: від CS1 до CS4. Для керування роботою радіолінії в режимі пакетної передачі розроблено спеціальний протокол RLC, який забезпечує її адаптивне налаштування, програмне перенастроювання частоти і керування потужністю. Адаптація радіолінії включає вибір схеми кодування CS1-CS4 залежно від видів інформації, що передається, характеристик радіоканалу і рівня завад.

Таким чином, в режимі GPRS кожному абоненту може виділятися від 1 до 8 каналних інтервалів. Під час пакетної передачі ресурси лінії зв'язку “вверх” і “вниз” можуть визначатись незалежно, тобто в системі може використовуватись асиметричний режим пакетної передачі. Реалізована на практиці швидкість передачі даних в GPRS складає $115.2 \cdot (8 \times 14.4)$ кбіт/с, проте теоретично вона може бути збільшена до $171.2 \cdot (8 \times 21.4)$ кбіт/с при використанні схеми кодування CS4 (табл. 8.12). з метою резервування в структуру повідомлень GPRS введено статусний прапорець в лінії “вверх”.

Таблиця 8.12. Основні характеристики схем кодування в GPRS

Схема кодування	Позначення	CS1	CS2	CS3	CS4
Статусний прапорець в лінії	f	3	6	6	12

“вверх”					
Кількість інформаційних бітів	d	181	268	312	428
Біти перевірки на парність	p	40	16	16	16
Кінцеві біти	t	4	4	4	0
Швидкість кодування	r	½	½	½	1
Кількість бітів, що вирізаються	b	0	132	220	0
Загальна кількість бітів в кадрі	m	456	456	456	456
Загальна швидкість передачі в каналі, кбіт/с	R_0	22.8	22.8	22.8	22.8
Швидкість передачі інформації, кбіт/с	R_1	9.05	13.4	15.6	21.4

Принципи оптимізації якості зв'язку при використанні чотирьох варіантів кодування даних залежно від відношення сигнал/шум (C/I) приведено на рис. 8.61. Перша схема CS1 гарантує з'єднання в будь-яких умовах і є найбільш зручною при передачі сигналізації і коротких повідомлень. Друга схема CS2 призначена для передачі трафіку і дозволяє підвищити пропускну здатність мережі. Два інших варіанти кодування забезпечують найвищі швидкості передачі при високому відношенні сигнал/шум, проте при відношенні C/I менше, ніж 9 дБ поступаються CS1 і CS2. Слід відмітити, що реалізація CS3 та CS4 вимагає модернізації A-bis інтерфейсу.

Основна відмінність технології GPRS від HSCSD - новий механізм тарифікації, який допускає можливість сумісного використання декількома абонентами одного каналного інтервалу і одночасного надання кількох видів послуг, наприклад, прийом повідомлення від третього абонента під час сеансу зв'язку з другим. В цьому випадку оплата перерозподіляється між різними абонентами, які використовують один канал. Фактично абонент GPRS платить не за час зайняття каналу, а тільки за об'єм переданої інформації.

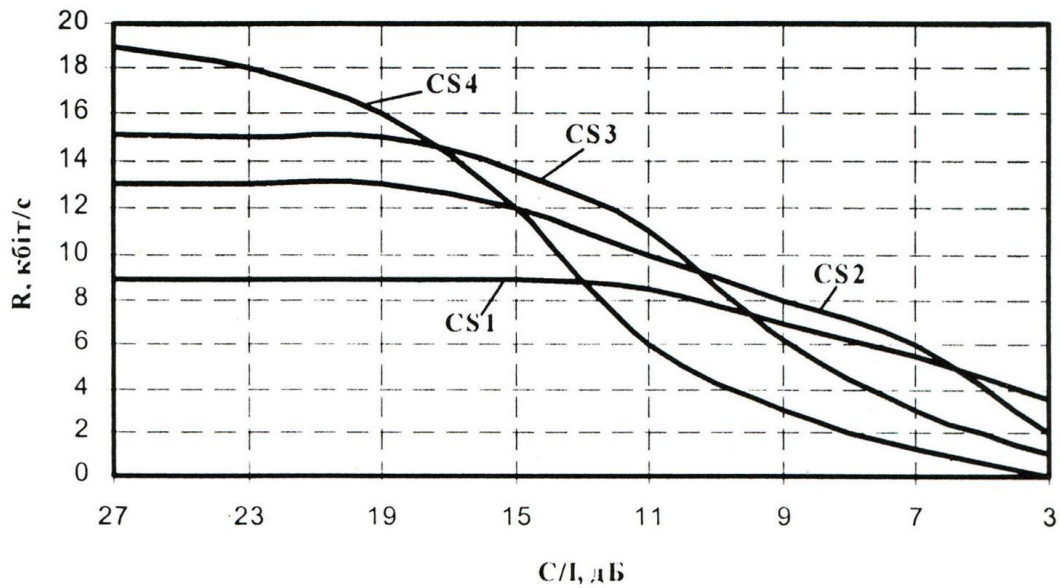


Рис.8.61 Максимальна пропускну здатність радіоінтерфейсу GPRS на канал

8.6.5. Система радіодоступу EDGE

Пропозиція про використання технології високошвидкісного радіодоступу EDGE в якості еволюційної бази GSM була висунута групою ETSI SMG на початку 1997р. Створений на основі стандарту GSM новий радіоінтерфейс EDGE (фаза 1) забезпечує плавний перехід до третього покоління і дозволяє підвищити швидкість передачі даних до 384 кбіт/с на несучу. Що стосується ще більших швидкостей передачі (2048 кбіт/с і вище), які вимагаються для нових поколінь піко- і мікрокоміркових мереж, то їх реалізацію пропонується здійснити на другому етапі розвитку EDGE (фаза 2).

Радіоінтерфейс EDGE надбудовується над існуючою схемою радіодоступу GSM і не вимагає створення нових мережевих елементів. Він буде сумісний з іншими послугами GSM, в тому числі з HSCSD і GPRS. Крім того, технологія EDGE придатна для використання в мережах GSM, які працюють в діапазонах частот 400, 900 та 1800 МГц.

До основних переваг EDGE слід віднести використання спектрально-ефективної модуляції і адаптивного настроювання каналу залежно від вимог абонента і реального відношення сигнал/шум. Спочатку в якості базового методу модуляції в EDGE пропонувалась квадратурна фазова маніпуляція з

мінімальним зсувом (OQPSK), проте пізніше перевага була віддана 8-позиційній фазовій модуляції. На думку розробників стандарту, використання 8PSK призводить до меншого зниження середньої потужності (біля 2 дБ) порівняно з OQPSK.

Ефективність використання спектру EDGE майже в 3 рази вища, ніж в GPRS. При розгортанні системи в смузі 600 кГц (модель повторного використання частот 1/3) може бути забезпечена спектральна ефективність більш 0.45 біт/Гц на комірку. Порівняльні характеристики технологій EDGE і WCDMA приведені в табл. 8.13.

Таблиця 8.13. Порівняльні характеристики технологій EDGE і WCDMA

Технологія	EDGE	WCDMA
Швидкість передачі в умовах високої мобільності в локальних зонах покриття, кбіт/с	128	384
Швидкість передачі в умовах низької мобільності в широких зонах	384	2048
Діапазони частот, МГц	GSM (450, 900, 1800, 1900, 2100)	1920-1980/2110-2170
Ширина смуги каналу, МГц	0.2	5
Метод доступу/модуляція	TDMA/8PSK	DS-SSMA/QPSK
Потужність передавачів мобільної станції (при передачі розмовної)	1 (макс.)	0.125

Нові можливості стандарту EDGE - це автоматичне розпізнавання типу модуляції, що використовується в радіоканалі, з подальшим переходом в потрібний режим. Вдосконалений метод модуляції автоматично адаптується до якості каналу радіозв'язку, пропонуючи найвищі швидкості передачі в найбільш сприятливих умовах поширення радіохвиль, особливо поблизу базових станцій.

В EDGE організуються дві послуги: вдосконалена послуга пакетної передачі EGPRS (англ. Enhanced GPRS) і вдосконалена послуга комутації

каналів ECSD (англ. Enhanced Circuit Switched Data). Порівняно з GSM максимальна швидкість передачі на один канал буде збільшена до 38.4 кбіт/с для ECSD і до 69.2 кбіт/с для EGPRS. Пропускна здатність на несучу теоретично збільшиться до 553.5 кбіт/с.

Аналогічно може бути підвищена швидкість передачі і в режимі з комутацією каналів шляхом об'єднання кількох каналних інтервалів. Для ECSD стане можливою передача в реальному часі потоків ISDN (64 кбіт/с) з малою ймовірністю помилки (BER), при цьому будуть зайняті лише 2 каналні інтервали по 32 кбіт/с.

В стандарті EDGE реалізуються два методи модуляції: GMSK і 8PSK з однаковою швидкістю передачі символів. Оскільки кожен символ 8PSK складається з трьох бітів, то в одному каналному інтервалі може бути передано 346 інформаційних бітів. У всьому іншому структура мультициклу співпадає з GSM, тобто кожен цикл складається з 8 каналних інтервалів, а кожен тринадцятий цикл - цикл очікування.

В EDGE пропонується адаптивна модуляція з комутацією пакетів. В основі пропозиції також лежить використання 6 рівнів кодування від PCS1 до PCS6 з різними характеристиками завадостійкості (табл. 8.14). Зміна режиму кодування відбувається кожного разу, коли попередній декодований блок прийнятий з низькою достовірністю. В результаті наступний блок передається з більш високою завадозахищеністю.

Результати розрахунку ймовірності помилки на блок (BLER) для різних схем кодування в каналі без рознесеного прийому вказані на рис. 8.62. Оцінка виконана для транспортного засобу, який рухається з швидкістю 3 км/год, на частоті несучої 900 МГц при використанні передачі із стрибками по частоті. З представлених графіків наочно видно, що при одній і тій же частоті появи помилкових блоків BLER з пониженням швидкості передачі інформації різко знижується вимога до відношення сигнал/шум, при якому забезпечується задана якість прийому.

Таблиця 8.14. Основні характеристики схем кодування в системі EDGE
(модуляція 8PSK)

Схема кодування	Максимальна	Швидкість	Швидкість
PCS1	69.2	0.33	22.8
PCS2	69.2	0.5	34.3
PCS3	69.2	0.6	41.25
PCS4	69.2	0.75	51.6
PCS5	69.2	0.83	57.3
PCS6	69.2	1.0	69.2

Надання абонентам послуг EDGE планується забезпечити за допомогою терміналів двох типів. В першому більш простому і дешевому терміналі буде забезпечуватись режим 8PSK в каналі “вниз” і GMSK в каналі “вверх”. Використання високошвидкісної передачі в прямому каналі добре узгоджується із структурою трафіку в пакетних мережах, який по своїй природі асиметричний. До другого класу відносяться абонентські термінали, які забезпечують симетричну передачу інформації (8PSK) в обох напрямках.

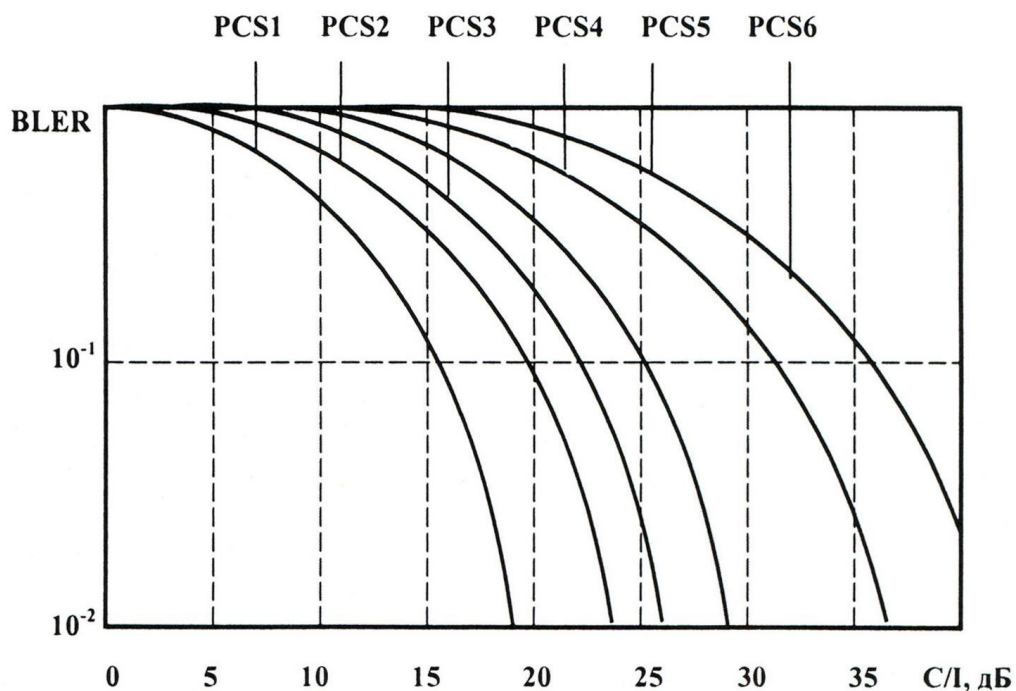


Рис.8.62 Залежність частоти появи спотворених блоків від відношення сигнал/шум

Нові можливості надасть багатошвидкісний мовний кодек AMR (англ. Adaptive MultiRate codec) з широким діапазоном швидкостей, що перемикаються (до 32 кбіт/с). Введення такого мовного кодека в EDGE (фаза 2) дозволить надавати послуги в мікрокоміркових мережах.

Таким чином, стандарт EDGE є прекрасною платформою для створення інтегрованої TDMA технології, яка забезпечить плавний перехід до нових можливостей третього покоління.

9. СТАНДАРТ IS-95 (cdmaOne) ПОКОЛІННЯ 2G

9.1. Версії радіоінтерфейсу IS-95

Система IS-95, або cdmaOne, покоління 2G являється однією з перших, яка базується на застосуванні технології множинного доступу з кодовим розділенням каналів – CDMA [57]. Її радіоінтерфейс описаний в стандартах IS-95. Далі на базі згаданих стандартів розроблено радіоінтерфейс IMT-МС - один з 5 інтерфейсів концепції IMT-2000 створення систем 3G (рис. 9.1).

IMT-2000 Terrestrial Radio Interfaces

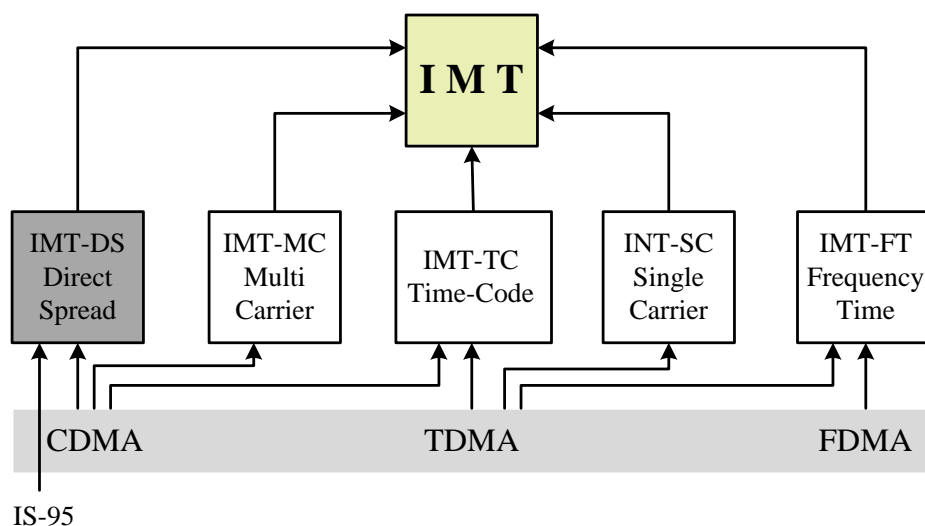


Рис.9.1 Радіоінтерфейси IMT-2000

Поява обладнання, яке підтримує технологію CDMA, виявилось можливим завдяки вирішенню ряду принципових проблем, наприклад точного регулювання потужності випромінювання передавачів АС. Зокрема, розкид рівнів потужностей на вході приймальних пристроїв БС не повинен перевищувати ± 1 дБ. Якщо не забезпечити такі умови, то рівень завад від сусідніх кодових каналів може перевищити корисний сигнал від найбільш віддалених АС.

Стандарт IS-95, в основному використовується в діапазоні 800 МГц

(cellular діапазоні - за американською термінологією). Хоча також передбачено його застосування в діапазоні 1900 МГц (PCS діапазон), де такий стандарт має назву J-STD-008. Аббревіатура IS (interim standard - тимчасовий стандарт) використовується для обліку в Асоціації телекомунікаційної промисловості ТІА (Telecommunications Industry Association).

Одним з найважливіших показників системи являється швидкість передачі повідомлень при забезпеченні їх заданої якості. Використовуються дві версії стандарту IS-95 (IS-95a та IS-95b), які забезпечують наступні швидкості передачі:

- версія IS-95a забезпечує два набори швидкостей передачі:
 - перший набір (RS1 - Rate set 1) включає в себе швидкості 1200, 2400, 4800, 9600 Кбіт/с;
 - другий набір (RS2 - Rate set 2) включає в себе швидкості 1800, 3600, 7200, 14400 Кбіт/с;
- версія IS-95b, яка базується на об'єднанні декількох (від 2 до 8) каналів CDMA, при цьому швидкість може збільшуватися до 28,8 Кбіт/с (при об'єднанні двох каналів із швидкістю 14,4 Кбіт/с), або до 115,2 Кбіт/с (8 каналів із швидкістю 14,4 Кбіт/с).

Далі, при розгляді стандарту IS-95 мається на увазі версія IS-95a. Особливості версії IS-95b будуть розглянуті окремо.

Динамічна ємність системи

В системах, які використовують інші види доступу, що відрізняються від технології CDMA, необхідно планувати розподіл частотного ресурсу, щоб уникнути впливу сусідніх комірок. В системах з технологією CDMA можна використовувати одну і ту саму смугу частот в сусідніх комірках. Для цього досить змінити синхронізацію джерела скремблювання. Таке 100% використання доступного частотного ресурсу визначає високу абонентську ємність мережі та спрощує її планування. Системі CDMA властива динамічна

абонентська ємність [44]. Абонентська ємність системи обмежується внутрішньосистемною інтерференцією, зумовленою одночасною роботою рухомих та базових станцій сусідніх комірок. Тому, в системі взаємозв'язані три основні показники (рис. 9.2):

- Кількість абонентів.
- Площа радіопокриття базової станції.
- Якість передачі в каналі.

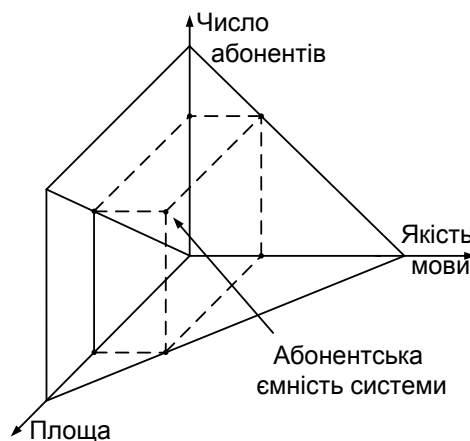


Рис.9.2 Динамічна ємність системи

Очевидно, що не можна забезпечити одночасно максимальне значення кожного з вказаних показників. Проте, такий взаємозв'язок являється перевагою системи, оскільки надає можливість гнучкого проектування мережі. Наприклад, в густонаселених районах можна збільшити кількість абонентів за рахунок зменшення площі покриття, а на окраїнах, де є менша кількість абонентів, збільшити площу зони обслуговування при збереженні однакової якості передачі в обох випадках.

Основні параметри

Основні параметри стандарту IS-95 приведені в таблиці 9.1.

Таблиця 9.1 Основні параметри стандарту IS-95

Параметри	Значення
1. Діапазон частот передачі, МГц зворотний канал прямий канал	824,040...848,860 869,040..893,970
2. Вид модуляції АС БС	О-QPSK QPSK
3. Ширина спектру випромінюваного сигналу, МГц, на рівні -3 дБ -40 дБ	1,23 1,50
4. Кількість каналів на одній несучій частоті АС доступу інформаційних БС пілотний синхронізації персонального виклику інформаційних	1 1 1 1 0...7 55...62
5. Швидкість передачі даних в каналах, Кбіт/с синхронізації персонального виклику та доступу інформаційному	1,2 9,6; 4,8; 2,4 9,6; 4,8; 2,4; 1,2
6. Завадостійке кодування інформації в каналах АС доступу та інформаційному каналі	Згортковий код ($k=9$, $V_k=1/3$) (декодер

(лінія “вверх”) БС синхронізації, персонального виклику та інформаційному (лінія “вниз”)	Вітербі з м’яким рішенням), код Ріда- Соломона I роду Згортковий код ($k=9$, $V_k=1/2$) (декодер Вітербі з м’яким рішенням)
7. Перемішування інформації в каналах	Блочне, тривалість кадру 20 мс
8. Відносна нестабільність несучої частоти: АС БС	$\pm 2.5 \cdot 10^{-6}$ $\pm 5 \cdot 10^{-8}$
9. Вид розділення каналів	CDMA
10. Вид розділення дуплексних каналів	FDD
11. Необхідне відношення сигнал/шум, дБ	6...7
12. Максимальна випромінювана потужність, Вт АС БС	0,3...1,0 <50
13. Чутливість приймача, дБп АС БС	-105 -117

Переваги та недоліки

Серед суттєвих переваг систем стандарту IS-95 можна відмітити наступні:

- АС приймає одночасно сигнали декількох базових станцій, що важливо при переході з однієї комірки в іншу;
- декілька приймачів АС забезпечують приймання при багатопроменевому поширенні сигналів, що дозволяє покращити якість зв’язку;

- швидкість роботи голосового кодека залежить від інтенсивності мови, що дозволяє гнучко регулювати навантаження мережі, звільнивши її від надлишкової інформації;
- на одній частоті БС практично забезпечує зв'язок для 40÷45 стаціонарних абонентів, або до 25 рухомих абонентів при радіусі комірки до 20 км.

До недоліків системи належить:

- низька швидкість передачі 9,6÷14,4 Кбіт/с, що властиво системам другого покоління;
- необхідність точної синхронізації БС, для чого використовують сигнали GPS;
- необхідність забезпечення на вході базової станції однакової потужності від всіх абонентів, що ускладнює систему.

9.2. Структура системи IS-95

Структурна схема системи IS-95 приведена на рис. 9.3.

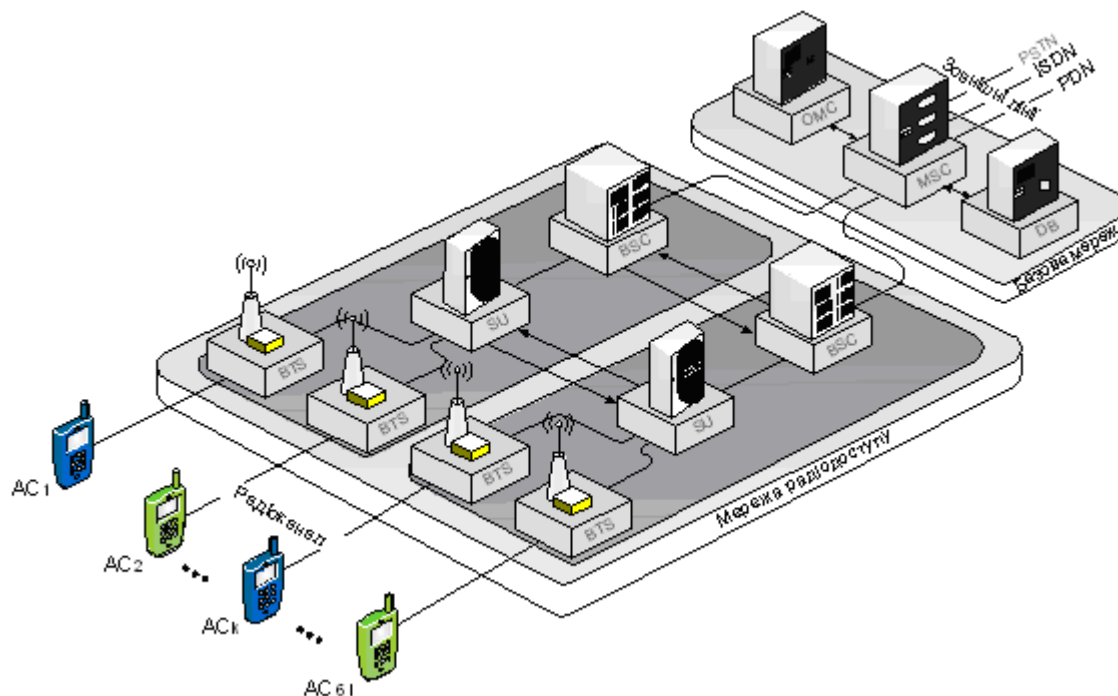


Рис.9.3 Структурна схема мережі IS-95

Її можна розділити на наступні складові:

- Мережу радіодоступу, яка виконує всі необхідні функції радіоканалу. В її склад входять базові станції (BTS - Base Transceiver Station), контролери базових станцій (BSC - Base Station Controller) та пристрої вибору кадру (SU – Selector Unit).
- Базову мережу, яка забезпечує комутацію та маршрутизацію викликів. В її склад входять центр комутації рухомого зв'язку MSC (Mobile Switching Centre), центр управління та обслуговування OMC (Operation and Maintenance Centre) і база даних про абонентів та обладнання DB (Data Base).
- Канали передачі мовної інформації та даних PSTN, ISDN, PDN (зовнішня мережа).
- Абонентські станції AC.

Приймачі та передавачі кожного каналу BTS і AC використовують всю смугу частотного каналу шириною 1,23 МГц. Розглянемо, як в такій спільній для всіх абонентів смузі частот здійснюється передача даних, призначених для будь-якого з абонентів (наприклад, абонента 1). Спочатку (рис. 9.4) здійснюється попереднє перетворення даних абонента 1, (в каналному кодері, за рахунок перемежування і т.д.).

Далі, до отриманих даних вноситься каналний код 1, властивий тільки даному абоненту 1. Отриманий сигнал, після його скремблювання, здійснює модуляцію несучої частоти. Таке формування сигналу в передавачі здійснюється у вигляді послідовних кадрів, тривалістю 20 мс. Отриманий сигнал передається антеною в зону обслуговування даного передавача. На приймальному кінці, аналогічно, здійснюється демодуляція та дескремблювання отриманого сигналу. Далі, аналогічно, на основі відомого каналного коду 1, з сумарних даних усіх абонентів виділяються тільки дані потрібного абонента 1.

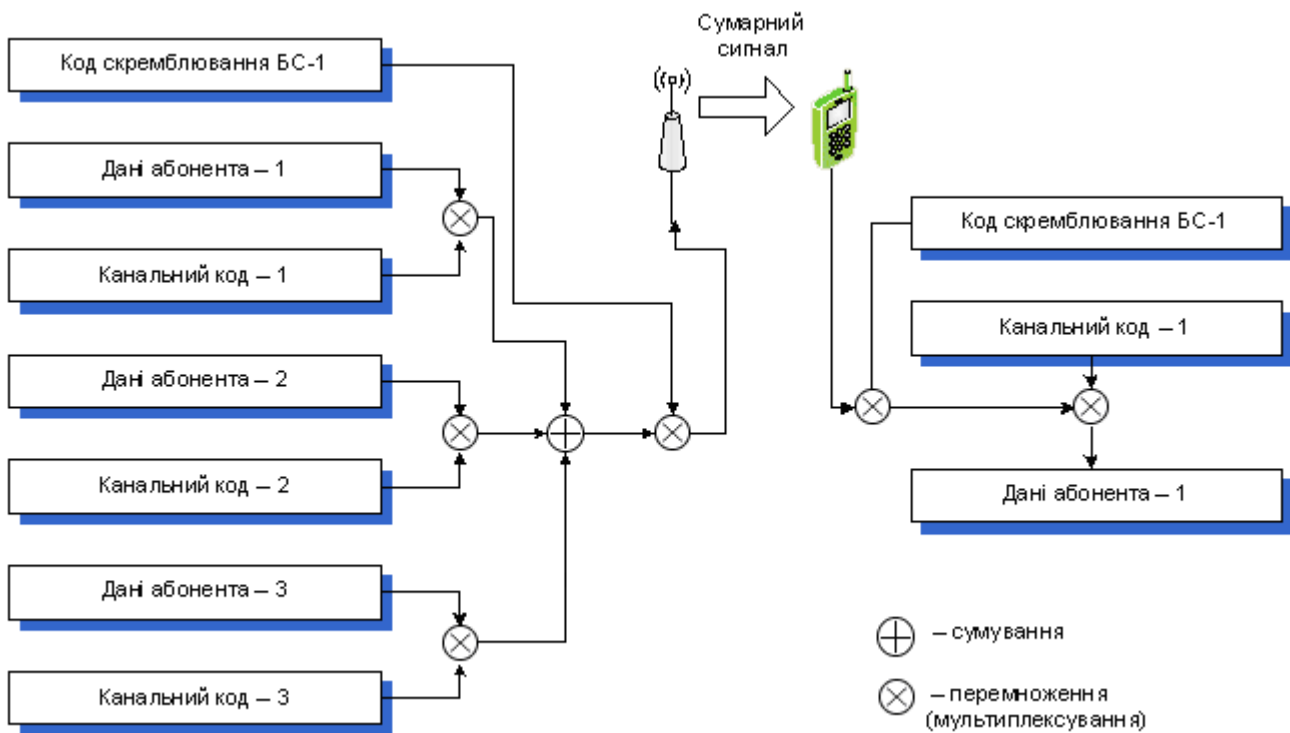


Рис.9.4 Принципи зв'язку в системах CDMA

При використанні всіх інших канальних кодів, крім коду 1, внаслідок їх ортогональності, вихідний сигнал приймача буде рівний нулю. Таким чином, в загальному, розглянуто передачу даних для потрібного абонента.

Характеристики радіоканалу

Основні характеристики системи IS-95, в основному, визначає мережа радіодоступу (рис. 9.5). Канал зв'язку від BTS до АС називається прямим каналом, а канал зв'язку від АС до BTS – зворотнім каналом.

Використання дуплексної схеми FDD (п.10 табл.9.1) означає, що з метою розділення дуплексних каналів (прямого та зворотного) використовуються різні діапазони частот 824,025...848,985 МГц та 869,025...893,985 МГц (п.1 табл.9.1). При цьому в кожному з діапазонів використовується смуга частот 1,23 МГц (п.3. табл.9.1).

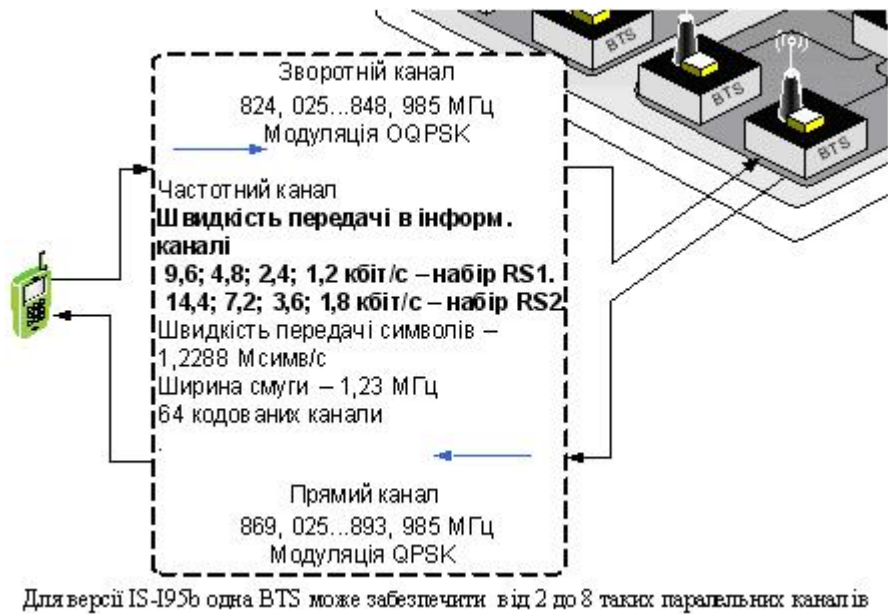


Рис.9.5 Характеристики радіоканалу

В прямому каналі (п.9 табл.9.1) використовується QPSK модуляція, а в зворотному каналі O-QPSK модуляція (п.2 табл.9.1). Ці види модуляції збільшують швидкість передачі інформації в 2 рази (кожен символ передає два біти інформації).

Між БС та АС повинні передаватись біти інформації з певною швидкістю біт/с. Реально замість бітів інформації передаються символи (або чіпи) з швидкістю символ/с (або чіп/с). Кількість символів в загальному випадку відрізняється від кількості бітів інформації. Наприклад, при використанні багатопозиційних видів модуляції кількість символів стає меншою за кількість інформаційних бітів (в одному символі передається декілька бітів). Навпаки, при використанні кодерів з швидкістю $1/k$ (на один вхідний біт на виході кодера утворюється k вихідних бітів) кількість символів стає більшою за кількість бітів. Система забезпечує певну швидкість передачі незалежно від того, що передається (біти інформації чи символи). Очевидно, якщо кількість символів більша за кількість інформаційних бітів, то швидкість передачі останніх буде меншою за швидкість передачі символів. Відношення кількості чіпів до кількості бітів, які їх утворили, характеризує розширення спектру.

В системі, найвища вхідна швидкість інформаційного сигналу (в режимі

RS1) становить 9,6 Кбіт/с, а швидкість передачі чіпів (після кодування сигналу) – 1,2288 Мбіт/с. В результаті кожному інформаційному бітові вхідного потоку відповідає $(1,2288 \cdot 10^6)/(9,6 \cdot 10^3) = 128$ чіпів вихідної послідовності. Виграш у відношенні сигнал/шум для розширеного і вхідного сигналу становить $10 \cdot \lg(128) \approx 21$ дБ. Якщо прийняти, що на вході приймача допустиме відношення сигнал/шум в 3 дБ, то передачу теоретично можна вести при рівні сигналу на 18 дБ нижче рівня інтерференційних завад.

Найважливіші характеристики всієї системи IS-95, в основному, визначаються технічними можливостями базової станції - BTS, та абонентських станцій AC.

Структурна схема каналу зв'язку

В склад каналу зв'язку входить:

- передавач BTS та приймач AC – для прямого каналу;
- передавач AC та приймач BTS – для зворотного каналу.

Структурну схему, як передавача так і приймача, доцільно представити у виді трьох функціональних складових частин:

- від входу голосового повідомлення до входу перетворення даних;
- від входу перетворення даних до входу каналного кодування;
- від входу каналного кодування до антени, де здійснюється каналне кодування (тобто кожному каналу або кожному абоненту присвоюється свій індивідуальний каналний код), скремблювання та модуляція.

Структурна схема каналу зв'язку приведена на рис.9.6.

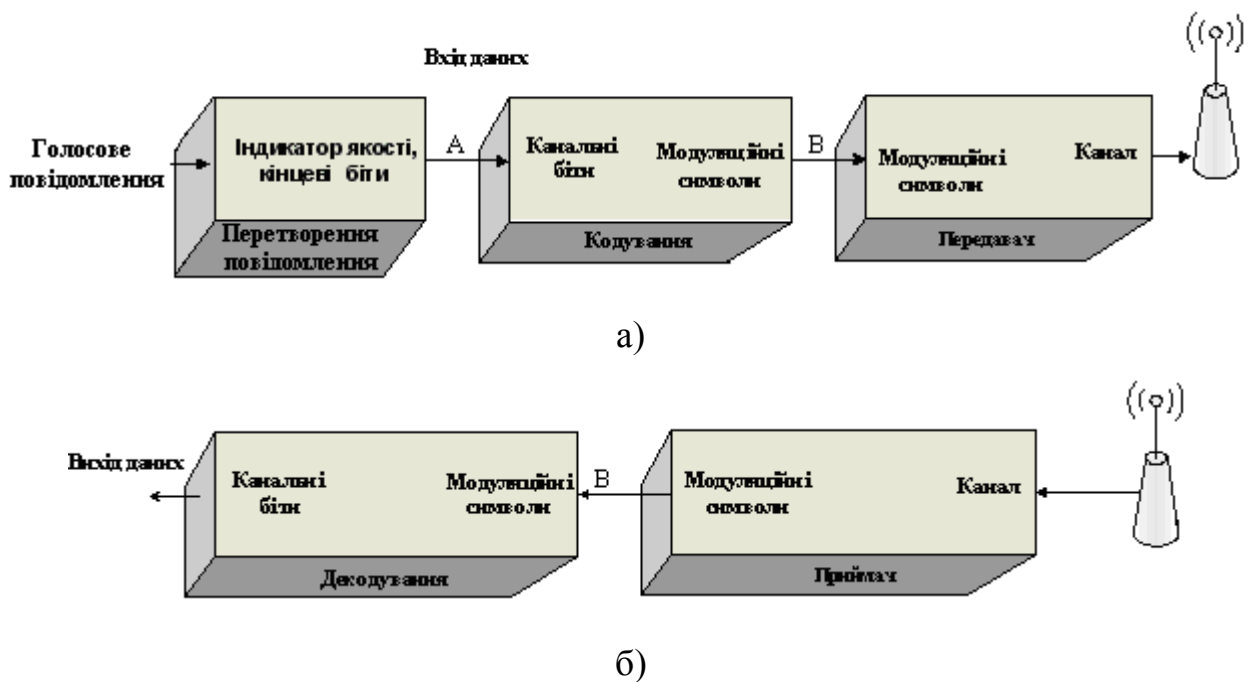


Рис.9.6 Структурна схема каналу зв'язку:

а) передавальна частина, б) приймальна частина

Формування каналів

Для забезпечення можливості одночасного обслуговування однією BTS багатьох АС в межах одного частотного каналу формується 64 кодованих канали в прямому каналі та 94 кодованих канали – в зворотному каналі. Для формування кодованих каналів використовується три види функцій:

- ПВП “короткий код”.
- ПВП “довгий код”.
- Функції Уолша.

Всі вони являються загальними для BTS та АС, але реалізують різні функції (таблиця 9.2).

9.3. Формування каналу трафіку в прямому каналі

У випадку прямого каналу передавальна частина (рис 9.6,а) знаходиться на базовій станції.

Таблиця 9.2 Параметри кодових послідовностей в стандарті IS-95

Тип сигналу	Довжина коду	Виконувані функції	
		BTS (базова станція)	АС (абонентська станція)
Код Уолша	64	Кодове ущільнення або розділення 64 каналів CDMA	Завадостійке кодування
Короткий код	$2^{15}-1$	Розділення сигналів базових станцій за величиною циклічного зсуву	Код з однаковим фіксованим циклічним зсувом, як опорний сигнал скремблера
Довгий код	$2^{42}-1$	Проріджений довгий код – як опорна послідовність скремблера	Довгий код з різним циклічним зсувом, як адресна послідовність

Для розпізнавання різних каналів використовується код прямого розширення спектру. Код розширення спектру в прямому каналі включає 64 ортогональні 64-бітові коди, отримані з матриці Адамара розміром 64x64.

Діляться всі 64 канали на 4 типи наступним чином (рис. 9.7):

- канал 0, пілотний канал (допоміжний канал для управління);
- канали 1÷7, пейджингові канали, причому їх кількість може бути різною, від 1 каналу до 7, (допоміжний канал для управління) з швидкістю 19,2 Кбіт/с;
- канал 32, синхронізації (допоміжний канал для управління) з швидкістю 4,8 Кбіт/с;
- канали трафіку (основні канали передачі інформації користувачів) канали 8÷31 і 33÷63, (додатково деякі, або всі канали 1÷7, якщо вони не використовуються як пейджингові), які забезпечують швидкість передачі даних до 9,6 Кбіт/с для набору швидкостей RS1, або 14,4 Кбіт/с - для набору швидкостей RS2.

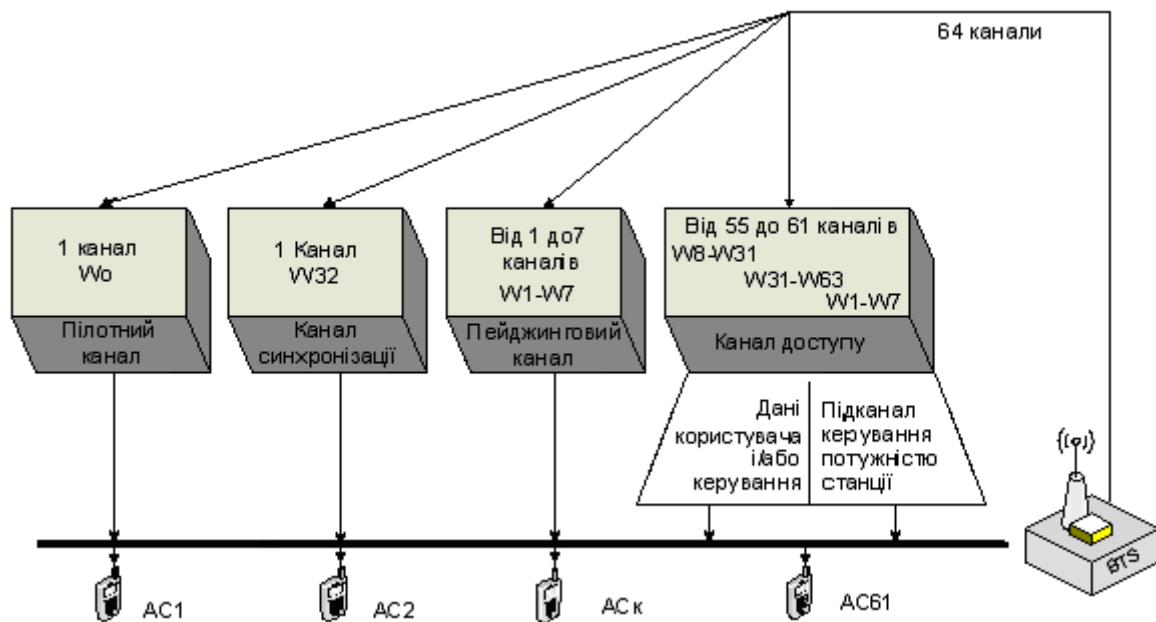


Рис.9.7 Типи каналів передавача BTS

9.3.1. Перетворення голосового повідомлення

Як вказувалось вище в системі наявні два набори швидкостей передачі:

- набір RS1 - з швидкостями передачі 1.2, 2.4, 4.8, 9.6 Кбіт/с;
- набір RS2 - з швидкостями передачі 1.8, 3.6, 7.2, 14.4 Кбіт/с.

Перетворення голосового повідомлення для набору швидкостей передачі RS1

Голосове повідомлення перетворюється в цифрову форму за допомогою блочного кодера. Для цього використовується один з трьох типів вокодерів: 8 Кбіт/с (QCELP, Qualcomm Code Excited Linear Prediction), 13,25 Кбіт/с (CELP) - з постійною швидкістю, або 8 Кбіт/с (EVRC) - з змінною швидкістю. Розмовний кодек працює за алгоритмом лінійного передбачення з кодовим збудженням, аналізуючи по 160 відліків дискретизованої розмови на інтервалі 20 мс. В залежності від активності розмови кодек виробляє різну кількість бітів (172, 80, 40 або 16) на інтервалі 20 мс, причому найнижча швидкість використовується, як правило, в паузах при розмові. Коли користувач мовчить вся пропускна здатність каналу не використовується. В ці моменти часу

швидкість передачі бітів знижується до 1200 біт/с. Використання мовного кодека зі змінним набором швидкостей дозволяє значно зменшити структурну заваду, яку створюють абоненти сусідніх БС за рахунок зниження середньої потужності передаючих сигналів. Коли випромінюється сигнал, що відповідає заниженим швидкостям роботи мовного кодека, його потужність може бути знижена прямо пропорційно величині зниження швидкості. В цьому випадку підтримується постійна енергія, що приходить на кожний біт інформації яка передається та постійна ймовірність помилки.

Далі, після додавання бітів індикатора якості кадру та 8 кінцевих біт кодера (рис. 9.8) формується послідовність зі змінною швидкістю 1.2, 2.4, 4.8, 9.6 Кбіт/с, яка подається на блочний кодер.

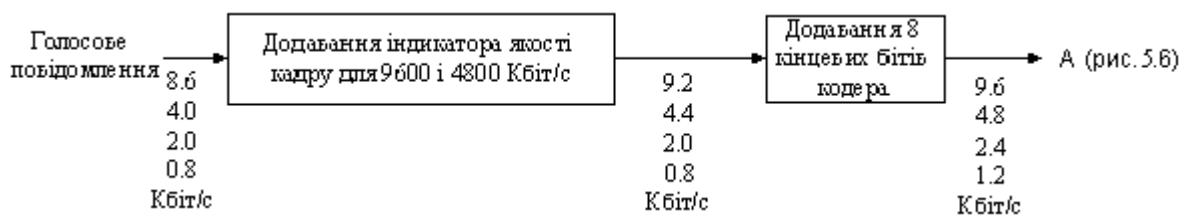


Рис.9.8 Перетворення голосового повідомлення для набору швидкостей передачі RS1

Перетворення голосового повідомлення для набору швидкостей передачі RS2

Якщо в каналі трафіку використовується швидкість з другого набору (RS2), кількість бітів абонента в 20 мс кадру становлять 267, 125, 55 або 21. При цьому швидкість вхідного потоку даних становить 13.35, 6.25, 2.75, або 1.05 Кбіт/с відповідно (рис. 9.9). Далі, до кожного 20 мс кадру додається один резервний біт, біти якості кадру та 8-бітовий блок контролю парності. В результаті швидкість потоку даних зростає відповідно до 14.4, 7.2, 3.6, та 1.8 Кбіт/с.

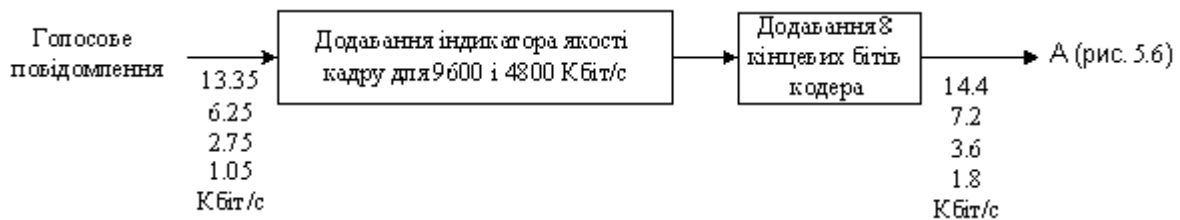


Рис.9.9 Перетворення голосового повідомлення для набору швидкостей передачі RS2

9.3.2. Блок кодування

Кодування даних для набору швидкостей RS1 приведено на рис. 9.10.

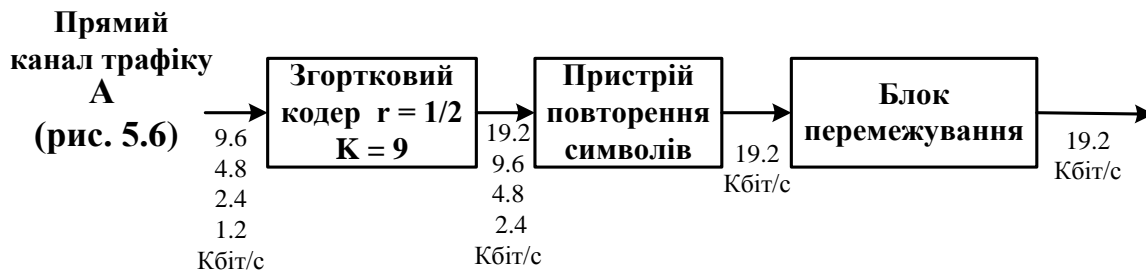


Рис.9.10 Перетворення даних в прямому каналі трафіку для набору швидкостей передачі RS1

Дані, або перетворений в цифрову форму звуковий сигнал блоками по 20 мс та швидкістю передачі даних 9,6 Кбіт/с, при забезпеченні швидкостей передачі згідно варіанту RS1, подаються на блок завадостійкого кодування з використанням схеми прямого виправлення помилок (згортковий кодер з ступінню кодування S). Він може виправляти однократні та двократні помилки в пакеті даних. При вхідній швидкості 9,6 Кбіт/с вихідна швидкість рівна 19,2 Кбіт/с.

Якщо вихідна швидкість даних із блоку кодування є меншою за 19,2 Кбіт/с, вихідні біти в пристрої повторення символів додаються таким чином, щоб на інтервалі 20 мс завжди було 384 біти, тобто завжди формується вихідний рівномірний потік із швидкістю 19,2 Кбіт/с, незалежно від швидкості вхідного потоку.

Далі сигнал поступає в блок перемежування сигналу - блок призначений для боротьби з пачками помилок в ефірі. Пачка помилок - кілька спотворених підряд біт інформації. При цьому потік даних записується в матрицю (24x16) по рядках. Як тільки матриця заповнюється, інформація з неї зчитується по стовпцях. Отже, коли в ефірі спотворюються підряд декілька біт інформації, при прийомі пачка помилок, пройшовши через зворотну матрицю, перетвориться в одиночні помилки.

Перетворення даних для набору швидкостей передачі RS2

Як було вказано вище, в системі застосовується також інший варіант набору швидкостей передачі – RS2. Перетворення даних для цього набору швидкостей приведена на рис. 9.11.

В цьому випадку на вхід згорткового кодера подається інший набір швидкостей – 14.4, 7.2, 3.6, 1.8 Кбіт/с. Застосування загорткового кодера з швидкістю кодування $\frac{1}{2}$ приводить до збільшення швидкості потоку даних в 2 рази. Якщо швидкість потоку даних є нижчою за 28,8 Кбіт/с для збільшення швидкості застосовується повторення бітів. Щоб швидкість такого потоку даних співпала з постійною швидкістю 19,2 кбіт/с в інших каналах, а також в каналах, що використовують перший набір швидкостей, виконується “виколювання” (англ. puncturing) двох з кожних з шести бітів вхідного потоку. Інші структурні блоки передавача для цих двох наборів швидкостей ідентичні.

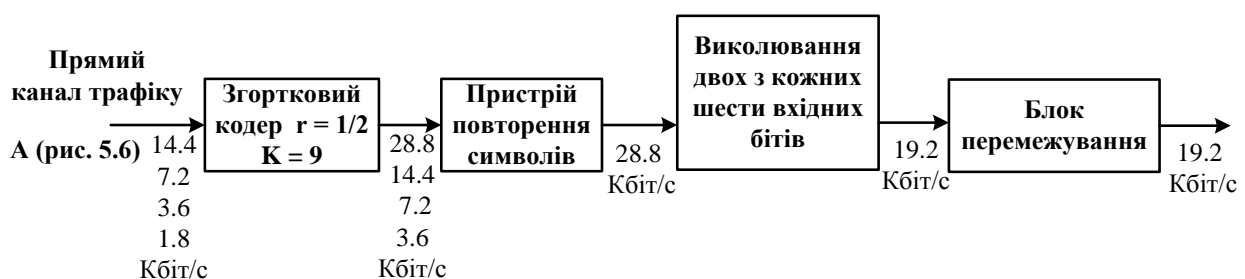


Рис.9.11 Перетворення даних набору RS2 в прямому каналі трафіку

9.3.3. Передавач

В передавачі модуляційні символи з виходу блоку кодування (рис. 9.6,а) перетворюються в сигнал каналу (рис. 9.12).

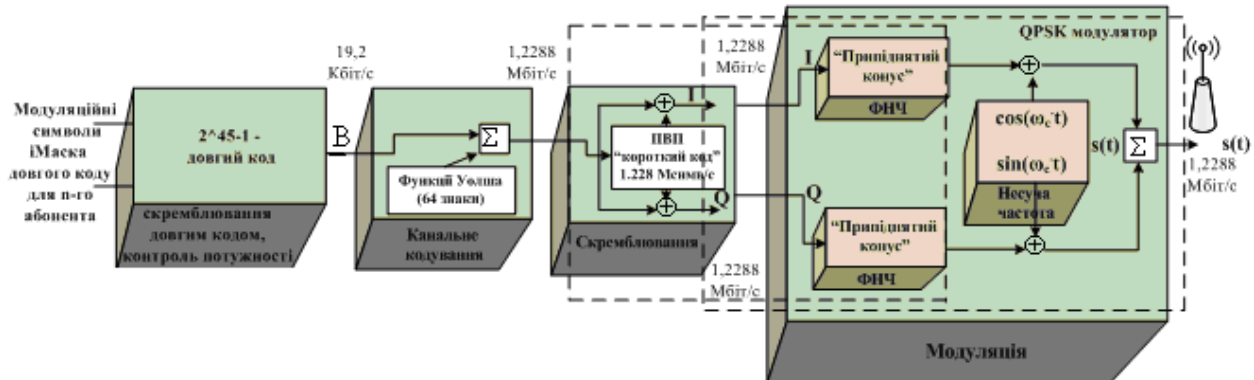


Рис.9.12 Формування в прямому каналі трафіку кодованих каналів, їх скремблювання та модуляція

Перетворення модуляційних символів здійснюється в наступних блоках:

- скремблювання довгим кодом, контролю потужності;
- канального кодування, скремблювання коротким кодом;
- фільтрування;
- QPSK модулятора.

Характерною особливістю технології CDMA являється кодове розділення каналів (абонентів) в загальній частотно-часовій області. При цьому використовується метод прямого розширення спектру DS-CDMA, який передбачає додавання даних (інформації) до канального (розширюючого коду). Для ідентифікації каналів застосовуються канальні (канальноутворюючі) коди з спеціальними властивостями, які забезпечують їх “ефективне розпізнавання”, або розділюваність. Такі властивості забезпечуються ортогональними кодами.

Для забезпечення ідентифікації базових станцій (комірки, сектору) також застосовуються так звані коди скремблювання. В кожній комірці використовується один код скремблювання, як її ідентифікатор. В кожному

кодi скремблювання наявна група каналoутворюючих кодiв. Слiд зауважити, що в цiлому для кодового роздiлення каналiв в широкiй смузi частот в технологiї CDMA використовується один так званий код розширення, який визначається наступним чином:

$$\text{код розширення} = \text{код скремблювання} \times \text{каналoутворюючий код}$$

Тобто, якщо каналoутворюючi коди не використовуються, то коду розширення вiдповiдає код скремблювання.

Скремблювання довгим кодом, контроль потужностi

На наступному етапi бiти даних скремблюються (рис. 9.13). Цей крок необхідний для забезпечення конфiденцiйностi даних, а також для запобiгання вiдправки однакових фрагментiв даних, що у свою чергу, зменшує ймовiрнiсть одночасного вiдправлення даних користувачами у момент найбільшого завантаження системи. Потiк, що утворюється, порiвнюється (операцiя виключне АБО) з вихiдними даними пристрою формування “довгого коду”. Характеристичний полiном, що використовується для формування довгого коду має вигляд:

$$P(x) = x^{42} + x^{35} + x^{33} + x^{31} + x^{27} + x^{26} + x^{25} + x^{22} + x^{21} + x^{19} + x^{18} + x^{17} + x^{16} + x^{10} + x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + x^1 + 1 \quad (9.1)$$

Скремблювання здiйснюється з використанням довгого коду, який формується на виходi 42 - бiтового регiстру зсуву. Регiстр зсуву встановлюється у вихiдне положення за допомогою електронного реєстрацiйного номера користувача, тобто маска довгого коду вiдповiдає n-му абоненту. Вихiднi данi генератора довгого коду передаються з швидкiстю 1,2288 Мбiт/с, яка в 64 рази вища за швидкiсть 19,2 Кбiт/с. Тому далi вибирається тiльки 1 бiт з 64 (операцiя децимацiї).

На наступному етапі формується інформація (потік, із швидкістю 800 біт/с) про регулювання потужності в інформаційному каналі. При цьому в скрембльований потік (з виходу суматора за модулем 2) вводяться в дані, із швидкістю 19,2 Кбіт/с шляхом заміни деяких бітів коду та кодування контрольних бітів за допомогою генератора довгого коду. В цих “захоплених” бітах передається інформація, яка вказує мобільному пристрою, чи треба змінювати рівень потужності.

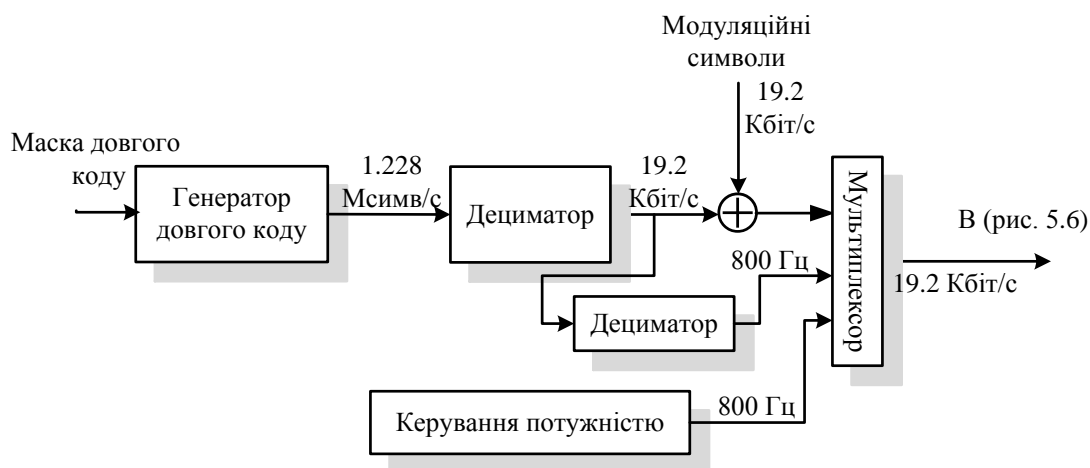


Рис.9.13 Перетворення даних в блоці скремблювання довгим кодом та контролю потужності

Канальне кодування, скремблювання псевдовипадковою послідовністю

Канальне кодування. Формування кодованих сигналів здійснюється за допомогою кодів Уолша. В даному випадку набір кодів Уолша характеризується матрицею Адамара 64x64, де кожен рядок відповідає окремому коду. Як показано на рис. 9.12 один з 64 кодів (швидкість передачі яких становить 1,2288 Мбіт/с) сумується за модулем 2 з вхідною двійковою послідовністю (швидкість передачі якої становить 19,2 Кбіт/с). Оскільки елементи наборів коду Уолша взаємоортогональні, то їх застосування дозволяє розділити прямий канал зв'язку на 64 ортогональних сигнали. Отримані канали використовуються наступним чином:

- Канал 0 використовується для перевірки когерентності отримання даних мобільним пристроєм.
- Канал 32 використовується для синхронізації.
- Для передачі інформації доступні 62 канали.

Таким чином, в процесі зв'язку в прямому каналі кожен біт отриманого 19,2 Кбіт/с потоку даних представляється цілим періодом послідовності Уолша довжиною в 64 символи в прямому (для логічної 1), або інвертованому виді (для логічного нуля) [7]. Послідовність Уолша застосовується як розширююча. В результаті формуються сигнали з розширеним спектром і швидкістю потоку даних $19,2 \cdot 64 = 1,2288$ Мбіт/с.

Скремблювання. Отриманий в результаті кодування каналів сигнал додатково розширюється псевдовипадковою послідовністю ПВП (або скремблюється) так званим “коротким кодом”. Тобто, розширений сигнал в кожному каналі (синфазному I та квадратурному Q) додається до двох ПВП (I та Q), утворених коротким кодом. Отриманий дибіт (сукупність двох бітів) задає фази для QPSK модулятора. Короткий код формується за допомогою 15-розрядного регістру зсуву, і повторюється з інтервалом $2^{15}-1$ елементарних сигналів (один період триває 26.67 мс). Короткий код використовується з швидкістю передачі 1,2288 Мбіт/с та дозволяє додатково зашифрувати сигнал. Оскільки всі базові станції використовують ідентичний розподіл каналів методом Уолша, то при відсутності шифрування їх сигнали можуть корелювати між собою, що небажано. Короткий код можна представити в якості “мітки, або адреси” базової станції. Використання цього коду вимагає наявності двох регістрів зсуву: одного в синфазному каналі (I), а другого – в квадратурному каналі (Q). Кожна базова станція для визначення свого місцезнаходження застосовує особливу модифікацію (зсув) кодів I та Q, які складаються з 64 елементарних сигналів, Таким чином, використання даних кодів дозволяє отримати 512 унікальних адрес ($2^{15}/64=512$). Таке число являється досить

великим, оскільки станції, що знаходяться досить далеко одна від одної, можуть використовувати однакові адреси.

Складові короткого коду генеруються регістрами LFSR (регістр зсуву з від'ємним зворотнім зв'язком) і описуються такими поліномами:

$$\begin{aligned}g(x)_i &= x^{15} + x^{13} + x^9 + x^8 + x^7 + x^5 + 1; \\g(x)_q &= x^{15} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + 1;\end{aligned}\tag{9.2}$$

Регістр LFSR може генерувати ПВП довжиною 2^N-1 (в даному випадку $N=15$). Для того, щоб забезпечити період послідовності рівним 2^{15} , до послідовності з 14 нулів, яка зустрічається в кожному періоді ПВП, додається ще один нуль.

НЧ фільтр (рис. 9.12)

Необхідна форма спектру на виході модулятора забезпечується фільтром з АЧХ, яка задається функцією “припіднятий косинус”.

Модулятор (рис. 9.12)

Для несучої частоти використовується чотирипозиційна фазова модуляція QPSK. Завдяки ортогональності послідовностей Уолша, інтерференційні завади між каналами однієї базової станції практично відсутні.

9.4. Додаткові канали передавача BTS

Структурна схема для інших каналів передавача (пейджингових, синхронізації та пілот-каналу) має як спільні так і відмінні елементи порівняно з структурною схемою для каналу трафіку (рис. 9.6,а)), а саме:

- відсутній блок перетворення голосового повідомлення;
- ідентичні блоки каналного кодування, скремблювання та модуляції;
- відрізняються тільки блоком перетворення даних.

Формування пейджингового каналу

Над інформацією, що поступає на вхід пейджингового каналу виконуються такі операції: згорткове кодування, повторення та блокове перемежування (рис. 9.14). В стандарті передбачено організацію до 7 пейджингових каналів з використанням функцій Уолша з W_1 до W_7 . Вільні пейджингові канали можуть бути використані в якості каналу трафіку.

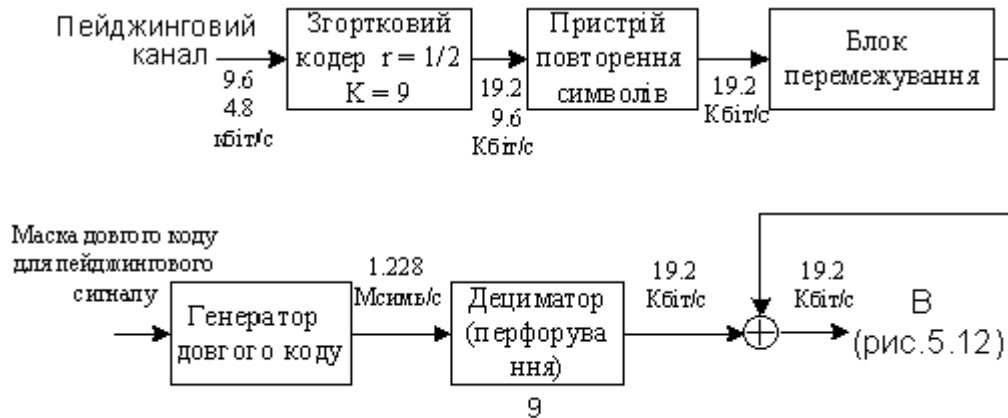


Рис.9.14 Формування пейджингового каналу в передавачі BTS

Формування каналу синхронізації

Над інформацією, що поступає на вхід каналу синхронізації виконуються такі операції: згорткове кодування, повторення та блокове перемежування (рис. 9.15). Каналу синхронізації відповідає функція Уолша W_{32} .

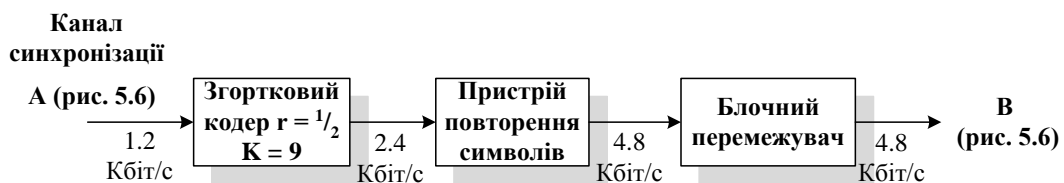


Рис.9.15 Формування каналу синхронізації в передавачі BTS

Формування пілот-каналу

Найпростіше здійснюється формування пілот-каналу (рис. 9.16). Йому відповідає функція Уолша W_0 , еквівалентна логічному нулю.

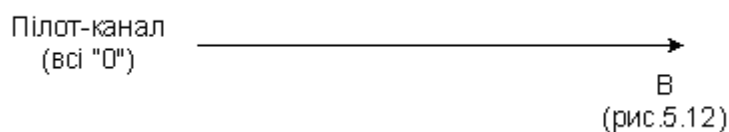


Рис.9.16 Формування пілот-каналу в передавачі BTS

Параметри прямого каналу зв'язку

З врахуванням розгляду параметрів каналів трафіку, пейджингового та синхронізації в таблиці 9.3 приведені основні параметри прямого каналу зв'язку.

Таблиця 9.3 Параметри прямого каналу зв'язку системи IS-95

Канал	Синхро нізація	Селективний		Перший набір				Другий набір			
		виклик		інформаційних каналів				інформаційних каналів			
Швидкість передачі даних (Кбіт/с)	1,2	4,8	9,6	1,2	2,4	4,8	9,6	1,8	3,6	7,2	14,4
Кількість повторів коду	2	2	1	8	4	2	1	8	4	2	1
Швидкість передачі символів модуляції (Ксимвол/с)	4,8	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2
Кількість чіпів на символ модуляції	256	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64
Кількість чіпів на біт	1024	256	128	1024	512	256	128	682,6	341,3	170,6	85,33

9.5. Канал приймача АС

Канал трафіку

Розглянемо детальніше обробку каналу трафіку в приймачі АС. В ньому здійснюються в оберненій послідовності, порівняно з BTS, всі етапи перетворення сигналу [8]. Структурна схема з врахуванням даних (рис. 9.6,б), (рис. 9.12) приведена на рис. 9.17.

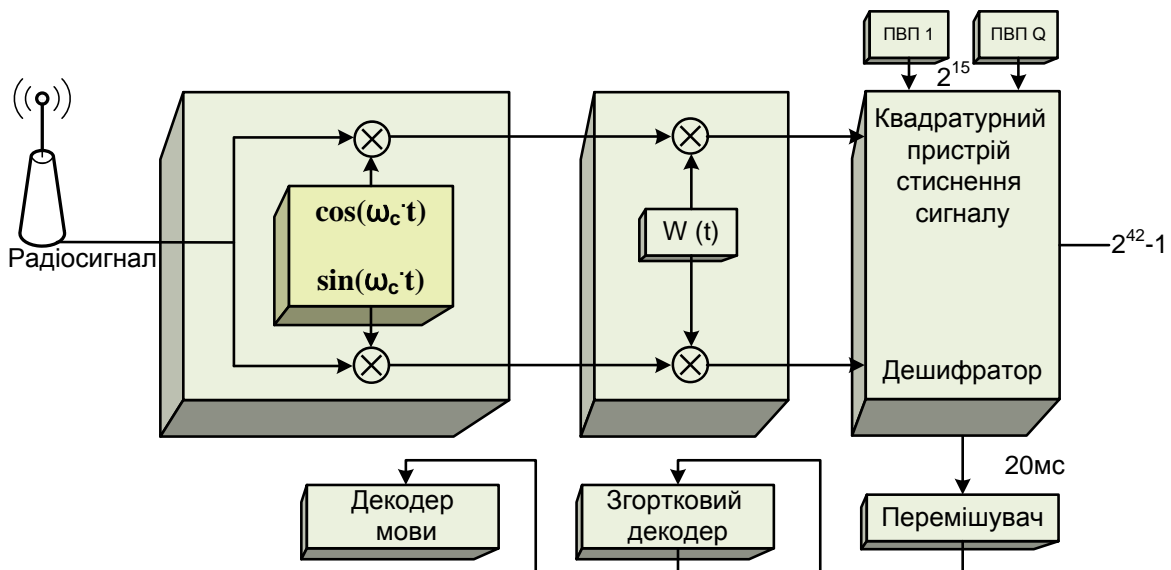


Рис. 9.17 Спрощена структурна схема приймача АС

9.6. Передача даних в зворотному каналі

Зворотній канал складається (рис. 9.18), з 92 логічних каналів CDMA, кожен з яких займає одну і ту саму смугу частот шириною 1,23 МГц (на рівні -3 дБ, п.3 табл. 9.1). Для розпізнавання різних каналів використовується код прямого розширення спектру. Кодом розширення спектру в зворотному каналі являється “довгий код”, який формує 94 канали.

Діляться всі 94 канали на 2 типи наступним чином:

- канали доступу, 32 канали;
- інформаційні канали, 62 канали.

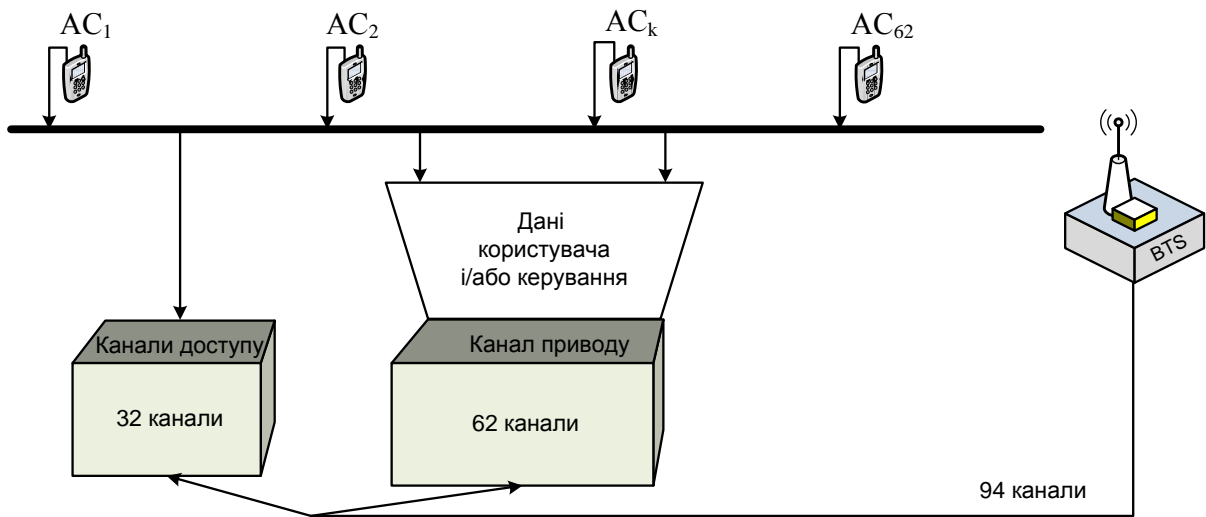


Рис.9.18 Типи каналів передавача АС

9.6.1. Канал трафіку в зворотному каналі

Канал трафіку в зворотному каналі призначений для передачі даних від АС до BTS. Формування сигналу передавача АС, структурна схема якого з врахуванням даних (рис. 9.6,а) приведена на рис. 9.19.

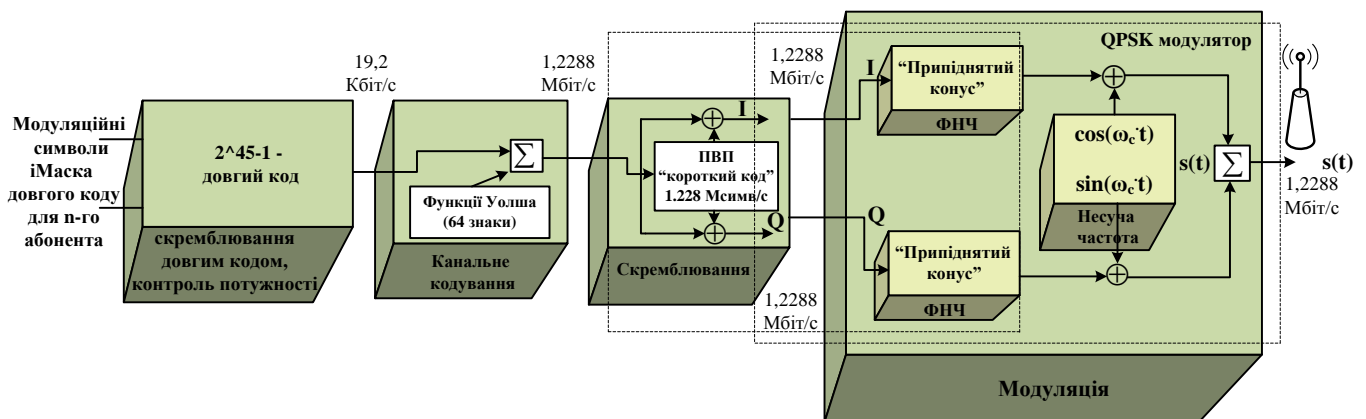


Рис.9.19 Структурна схема передавача АС

Кодування каналів, скремблювання та модуляція

Детальніше частина схеми передавача АС (від каналного кодування до антени) приведена на рис. 9.20.

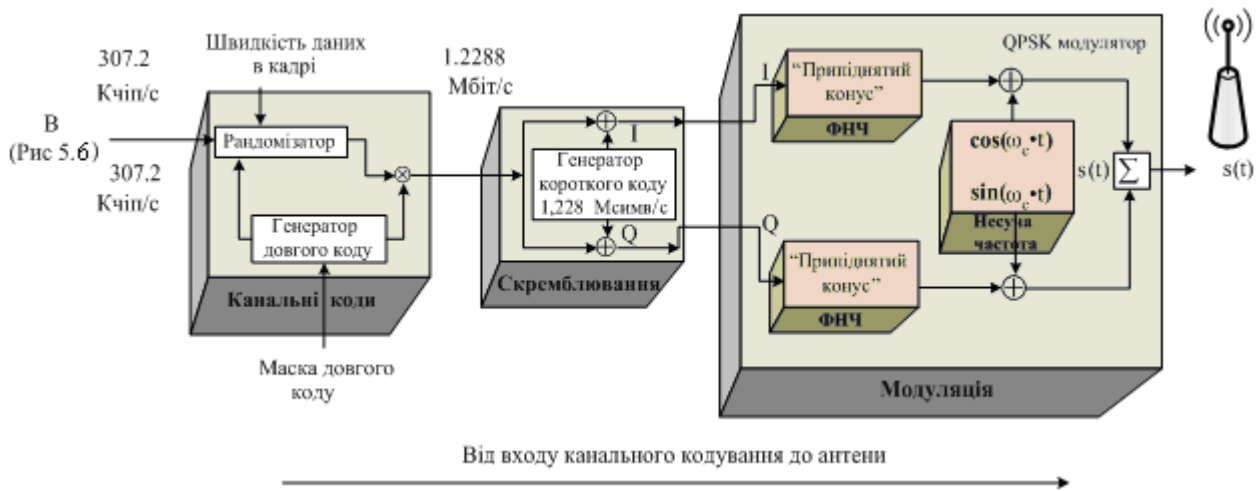


Рис.9.20 Формування в зворотному каналі трафіку кодованих каналів, їх скремблювання та модуляція

Канальне кодування

В цьому випадку користувачі відрізняються один від одного (ідентифікуються) довгим кодом. При зв'язку від АС до BTS вхідний потік з швидкістю 307,2 Кбіт/с подається на суматор за модулем 2, де скремблюється довгим кодом з швидкістю 1,2288 Мбіт/с (на один вхідний символ припадає чотири символи псевдовипадкової послідовності довгого коду).

Якщо довгий код формується з використанням маски довгого коду, то описана процедура скремблювання виконує роль шифрування інформації.

Скремблювання

Скремблювання здійснюється аналогічно як і в прямому каналі.

Модуляція

Процедура модуляції в зворотному каналі аналогічна модуляції в прямому каналі за винятком того, що для всіх 64 каналів використовується одна і та пара квадратурних послідовностей з нульовим зсувом, затримана на $\frac{1}{2}$ тривалості одного символу.

Необхідність затримки на $\frac{1}{2}$ тривалості символу пов'язана з використанням чотирипозиційної модуляції O-QPSK. Такий вид модуляції

дозволяє знизити вимоги до лінійності підсилювачів передаючого тракту АС. Зниження вимог пояснюється тим, що при даному виді модуляції усуваються можливі зміни фази на 180^0 , що забезпечує зменшення співвідношення пікової та середньої потужності підсилювача передавача АС.

Перетворення даних

Перетворення даних приведено на рис. 9.21.

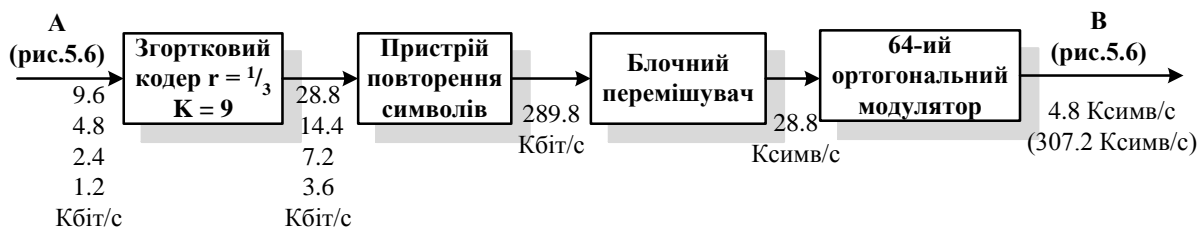


Рис. 9.21 Перетворення даних трафіку в зворотному каналі

Далі сигнал поступає на блок завадостійкого кодування, який може виправляти до 3-х помилок в пакеті даних. Тому згортковий кодер відрізняється від кодера в прямому каналі кодовою швидкістю $1/3$. Швидкість цифрового потоку на виході згорткового кодера рівна $28,8$ Кбіт/с незалежно від швидкості вхідного потоку. Перемежування бітів проводиться на інтервалі 20 мс, на якому розміщується 576 бітів. Біти стовпець за стовпцем висотою 32 біти заносяться в матрицю 32×18 , а далі рядок за рядком зчитуються. На наступному етапі сигнал поступає в блок кодування (від підслуховування) - на інформацію накладається маска (послідовність) довжиною 42 біти. Ця маска є секретною. При несанкціонованому перехопленні даних в ефірі неможливо декодувати сигнал, без правильної маски. Метод перебору всіх значень є не ефективним, оскільки при генерації цієї маски, доведеться генерувати $8,7$ трильйона масок довжиною 42 біти.

На цьому етапі кодування сигналу відбувається розширення спектру частот, тобто кожен біт інформації кодується послідовністю, отриманою із функції Уолша, довжиною 64 біти. Цифровий потік, що надходить з входу

перемножувача, розбивається на блоки по 6 бітів, кожній такий блок заміщається однією із 64 функцій Уолша, порядковий номер якої відповідає двійковому числу, вираженому 6 бітами кодуєчого блоку. Число різноманітних блоків складає 64, тобто рівна кількості функцій Уолша. Таким чином, швидкість передачі даних збільшиться в $64/6$ разів тобто до 307,2 Кбіт/с. Функції Уолша також використовуються для відокремлення непотрібної інформації від інших абонентів. В момент початку сеансу зв'язку абонентові призначається частота, на якій він працюватиме і один (з 64 можливих) логічний канал, який визначає функція Уолша. В момент прийому сигнал по схемі проходить у зворотний бік. Прийнятий сигнал множиться на кодову послідовність Уолша. За результатом множення обчислюється кореляційний інтеграл.

Перетворення даних для додаткового зворотного каналу

Як і при передачі в прямому каналі, в зворотному каналі крім основного кодового каналу може передаватись до семи додаткових кодових каналів. Основні та додаткові канали відрізняються лише на етапі перетворення даних (від точки А до точки В на рис. 9.20). Послідовність функціональних блоків для одного такого перетворення приведена на рис. 9.22.

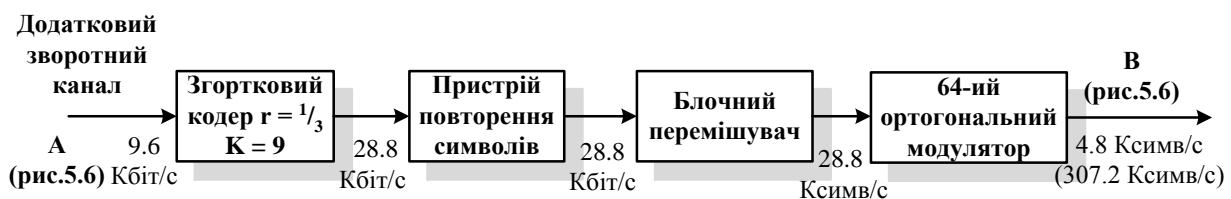


Рис.9.22 Перетворення даних трафіку для додаткового зворотного каналу

Перетворення голосового повідомлення

Перетворення голосового повідомлення в зворотному каналі здійснюється аналогічно, як і в прямому каналі.

9.6.2. Канал доступу передавача АС

Формування сигналів в каналі доступу зворотного каналу приведено на рис. 9.23.

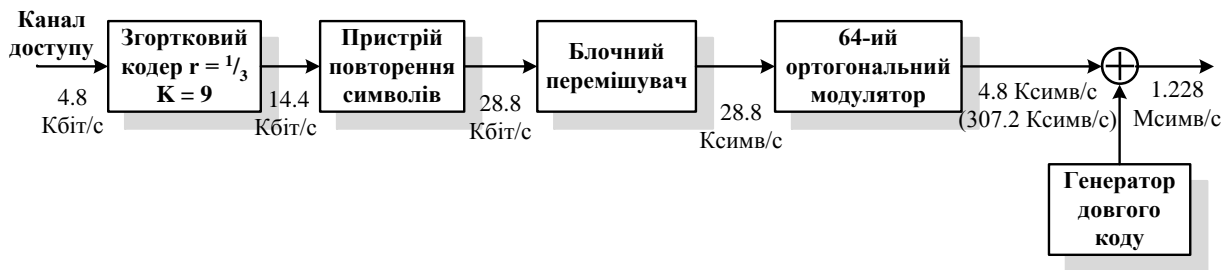


Рис.9.23 Формування сигналів в каналі доступу зворотного каналу

Через канал доступу передаються дані з швидкістю 4800 біт/с. Канал доступу пов'язаний з каналом пейджингу, тому може бути до 7 каналів доступу.

9.7. Переключення абонентів

Оскільки розмір соти є обмеженим внаслідок певних причин, може виникнути ситуація коли користувач залишить межі поточної соти, що призведе до погіршення якості зв'язку.

Розміри соти в основному визначаються ресурсом радіоканалу (а також через інші причини). Оскільки загасання сигналів при віддаленні від передавача зростає, межі соти вибирають виходячи із забезпечення певної якості зв'язку.

При перетині межі соти система зв'язку повинна переключити шлях проходженні інформації користувача від БС попередньої соти до БС нової соти. Таке переключення називають хендовером (handover). Відомі такі механізми переключення: жорсткий хендовер, м'який хендовер [44].

В системі CDMA передбачений м'який хендовер (soft handoff) під час переходу абонента з одної соти в іншу. АС може підтримувати зв'язок одночасно з двома або трьома БС, проводячи безперервний пошук всіх пілот-сигналів на робочій частоті з фіксацією їх рівнів.

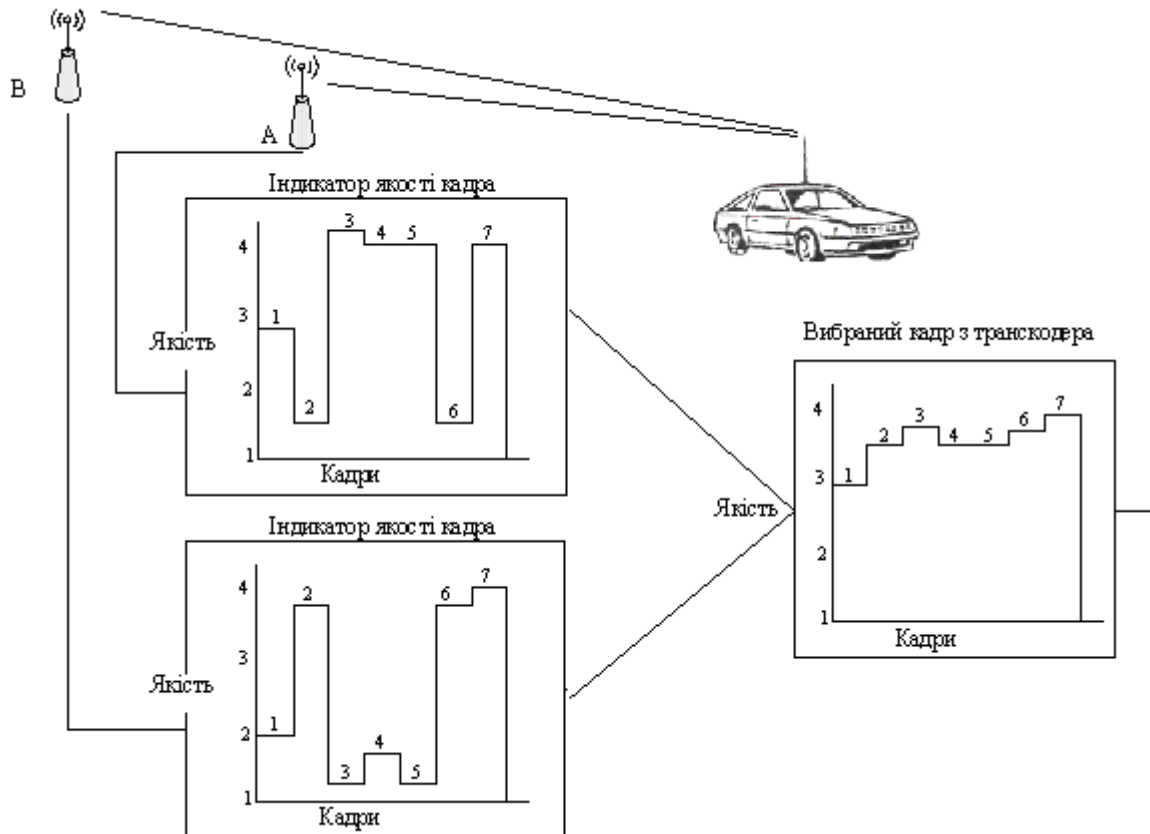


Рис.9.24 Оцінка якості мовного кадру

Пілотні сигнали з достатньо сильною амплітудою виявляються АС. Якщо такі сигнали присутні на протязі довгого періоду часу, вона заносить інформацію про них в спеціальний список [10]. Результати вимірювань амплітуди пілот-сигналів передаються БС, котра в свою чергу передає їх центру комутації. На основі повідомлень, що поступають від різних БС, контролер базових станцій приймає рішення, яка БС буде використовуватися під час переключення. Після цього він призначає БС вільну функцію Уолша та повідомляє їй код АС. БС посилає повідомлення АС про початок процедури переключення вказуючи канал трафіку нової БС. Абонентська станція приймає повідомлення про переключення та передає назад підтвердження переключення.

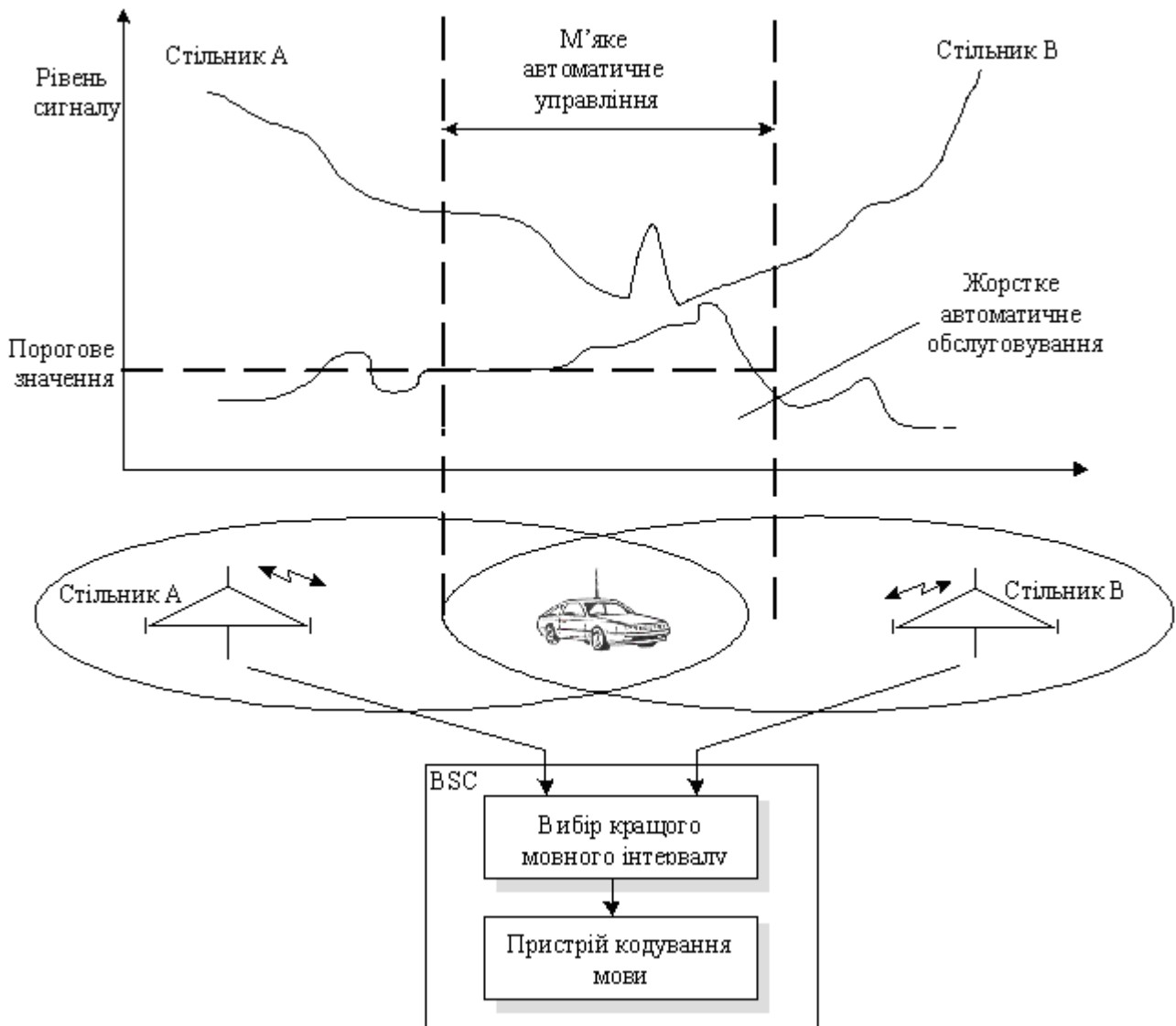


Рис.9.25 М'який хендовер

9.8. Регулювання потужності

З метою збільшення ефективності роботи системи CDMA, використовується потужності. Регулювання здійснюється на основі вимірювання частоти помилок в приймачах, рівнях потужності прийнятих сигналів. Застосування адаптивних порогів дозволяє зменшити ймовірність роботи АС із надлишковою потужністю та підвищити спектральну ефективність системи. Завдяки регулюванню потужності передавачі АС працюють з мінімально можливою потужністю, збільшуючи ємність системи [44].

Регулювання потужності здійснюється з використанням прямого та

зворотного каналів зв'язку:

- регулювання в прямому каналі – розімкнута петля;
- регулювання в прямому каналі – замкнута петля;
- регулювання в зворотному каналі.

Прямий канал – розімкнута петля

Всі БС в мережі можуть вести передачу в одному діапазоні частот. Поряд з іншими сигналами кожна із БС випромінює пілот-сигнал постійної потужності. При циклічному зсуві короткої ПВП АС визначає, якою БС даний сигнал був переданий. Але рівень потужності прийнятого сигналу в пілотному каналі також дозволяє АС оцінити втрати на трасі розповсюдження від БС до АС. АС, приймаючи пілот-сигнал, визначає його рівень потужності, а після цього наближено встановлює величину загасання сигналу в радіоканалі. Наступним завданням АС є змінити власну потужність випромінювання (на основі встановленого загасання сигналу між АС і БС) для того, щоб рівень потужності сигналу прийнятого БС від АС знаходився в заданих межах. Проте, оскільки прямий та зворотній канали рознесені по частоті, вони мають різні коефіцієнти передачі. В діапазонах частот, що відповідають прямому та зворотному каналам, будуть близькі лише середні значення затухання потужності сигналу на трасі розповсюдження. Внаслідок того, що швидкі завмирання сигналів в цих частотних діапазонах пройдуть незалежно, миттєві значення рівнів прийнятих сигналів будуть різні. Тому така схема регулювання не дозволяє точно змінювати потужність.

Регулювання потужності по схемі без зворотного зв'язку призначено для компенсації ефектів загасання та повільних замирань в зворотному каналі зв'язку та має період регулювання близько 30 мс.

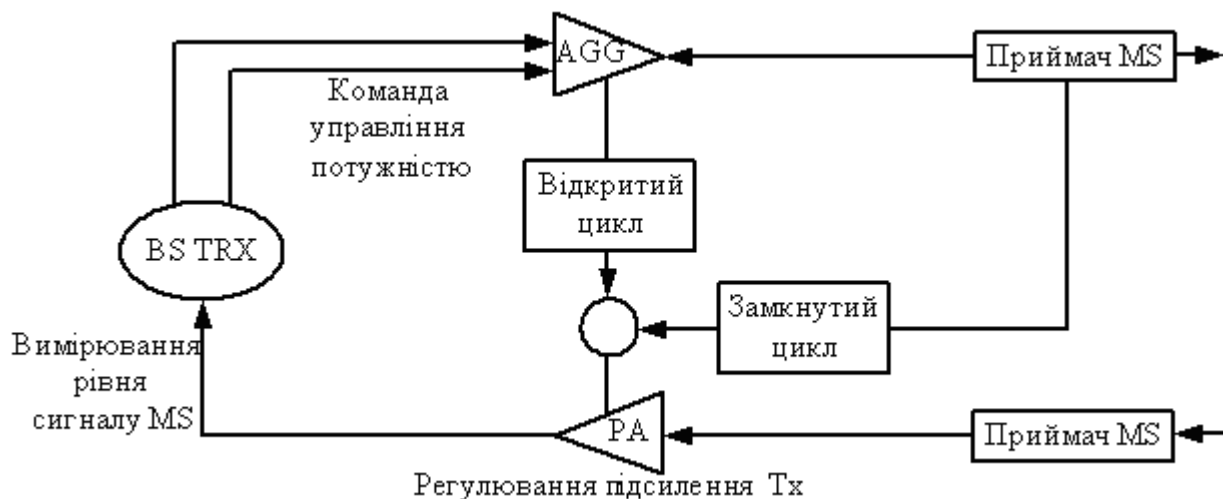


Рис.9.26 Регулювання потужністю в прямому каналі

Прямий канал – замкнута петля

Після прийому то обробки сигналу від АС базова станція оцінює відношення сигнал/шум в тракці приймача та порівнює його з пороговим рівнем. Величину сигнал/шум вимірюють виходячи із співвідношення амплітуд сигналів на виході підканалів кореляторів та частоти помилкових кадрів. На основі відмінності вимірюваного та порогового відношення сигнал/шум БС виробляє рішення та посилає АС по каналу прямого трафіку дані корекції про точність підстройки рівня потужності передавача. АС дістає команди регулювання кожні 1,25 мс (швидкість 800 біт/с). Передача „0” означає, що АС повинна збільшити рівень своєї середньої вихідної потужності на 1 дБ, а передача „1” – зменшити на 1 дБ. Регулювання здійснюється з кроком 1 дБ в динамічному діапазоні 85 дБ.

Призначення такої схеми регулювання потужності полягає у компенсації ефектів швидких завмирань. Щоб мінімізувати затримки в вузлі регулювання, відповідні командні біти передають без завадостійкого згорткового кодування. Викликаний відсутністю завадостійкого кодування ріст ймовірності помилки при передачі бітів керування знижує якість роботи системи регулювання потужності. Але набагато більше зниження якості виникло б через збільшення часу обробки на кодування/декодування команд.

Регулювання в зворотному каналі

В процесі регулювання потужності БС періодично починає зменшувати потужність випромінювання в інформаційному каналі. Потужність зменшують до тих пір, поки АС не зареєструє перевищення порогового значення частоти помилкових кадрів та не передасть інформацію про це БС. Одержуючи повідомлення про рівень помилок від АС, БС змінює потужність випромінювання у відповідних каналах; при цьому перерозподіляється обмежений ресурс потужності.

Ресурс потужності, що виділяє передавачем БС, в поєднанні з коефіцієнтами направленої дії являється найважливішим параметром, оскільки він забезпечує формування зони обслуговування мережі. Наприклад, перевищення випромінюваної потужності в одному із секторів приведе до збільшення перешкод в середині системи, а через це впаде відношення сигнал/шум у приймальних трактах сусідніх комірок.

Завдяки ефективному регулюванню потужності та використанню розширеного спектру потужність передавачів в системі IS-95 є меншою, ніж в інших системах зв'язку рис. 9.27.

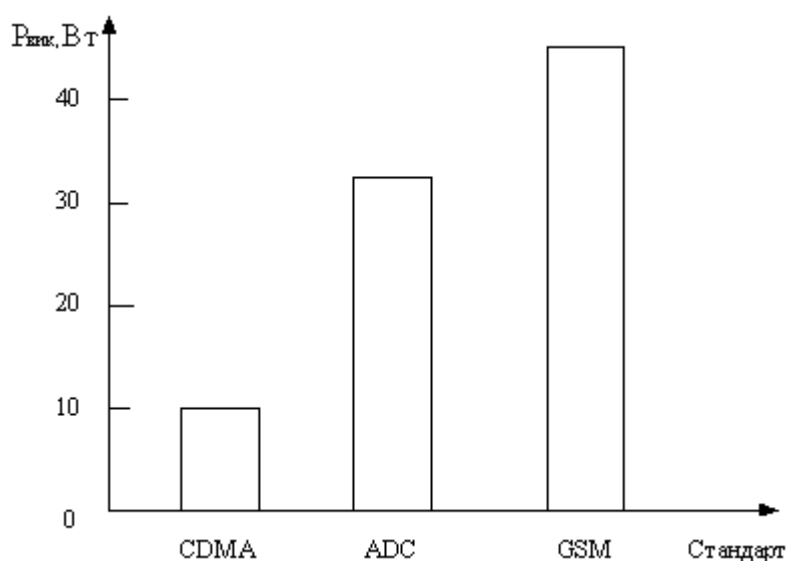


Рис.9.27 Потужність передавачів систем коміркового зв'язку

9.9 Взаємодія базової та абонентських станцій

Для початку роботи в системі АС приймає пілот-сигнал. Цей сигнал має кілька призначень:

- АС використовує пілот-сигнал для початкової синхронізації з БС.
- Рівень потужності сигнал пілот-каналу є на 4÷6 дБ вищим, ніж в інформаційних каналах. Вимірюючи потужність пілот-сигналів БС, мобільна станція може використовувати отримані дані при естафетній передачі, а також під час регулювання потужності передавача.

АС спочатку приймає пілот-сигнал, який постійно випромінюється БС. Адресна послідовність пілотного каналу, або короткий код являють собою m -послідовність довжиною 2^{15} . Короткий код ідентифікує окрему БС. Далі АС оцінює фазу пілот-сигналу та виділяє опорне коливання, яке потрібне для когерентної обробки сигналів даної БС при прийомі.

Всі БС в системі використовують один короткий код, але із різними циклічними зсувами. На основі такого циклічного зсуву можна виділяти та розрізняти сигнали, від БС в різних комірках та секторах. Циклічні зсуви мають рівномірний крок 64 символи. Таким чином, можливі 511 різноманітних циклічних зсувів короткого коду відносно положення із умовно нульовим зсувом. Це означає, що навіть у районах із мікрокомірковою структурою є гарантія, що сигнали різних БС можна розрізнити під час прийому. Якщо мережа містить більше 511 БС, можна зробити так, щоб БС з однаковими циклічними зсувами короткого коду не були одночасно в зоні радіобачення одної МС.

Після початкової АС здійснює основну синхронізацію використовуючи канал синхронізації. Канали синхронізації всіх БС використовують єдину функцію Уолша W_{32} . Швидкість передачі даних по каналу синхронізації становить 1200 біт/с, довжина кадру рівна періоду повторення короткого коду (26,66 мс). Оскільки канал синхронізації жорстко зв'язаний по тактовій частоті та по зсуву циклічного коду з пілотним каналом, АС дістає доступ до

синхронізації тої базової станції, на пілотний канал якої вона настроїлась.

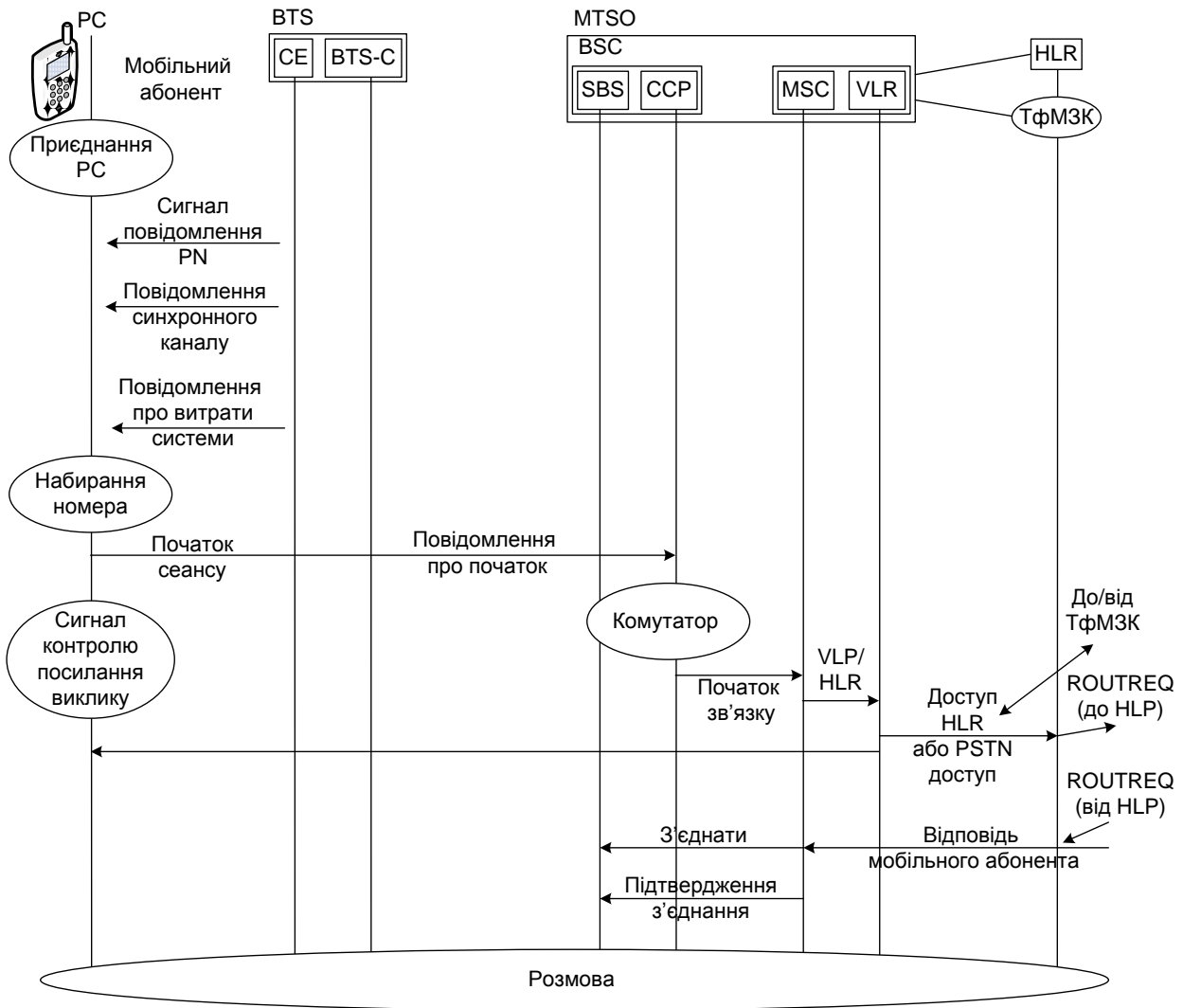


Рис.9.28 Встановлення вихідного виклику

Після завершення процесу початкової синхронізації АС настроюється на канал персонального виклику та приймає команди керування. Якщо команди керування від БС не передаються, АС переходить в режим очікування, продовжуючи прослуховувати канал персонального виклику та підтримуючи готовність до встановлення з'єднання.

Якщо абонент намагається зареєструватися в мережі його станція намагається здійснити з'єднання з базовою по одному з каналів доступу. Базова станція призначає канал для з'єднання та передає цю інформацію АС. Після одержання підтвердження від базової станції, АС починає передачу інформації.

Передача повідомлень в мережі здійснюється кадрами. В прямому каналі зв'язку використовується згорткове кодування із швидкістю 1/2, а зворотному – із швидкістю 1/3 та декодером Вітербі з м'яким рішенням. Використовувані принципи прийому дозволяють аналізувати помилки в кожному інформаційному кадрі і стирати кадр при перевищенні допустимого рівня, тим самим підтримуючи високу якість передачі мови.

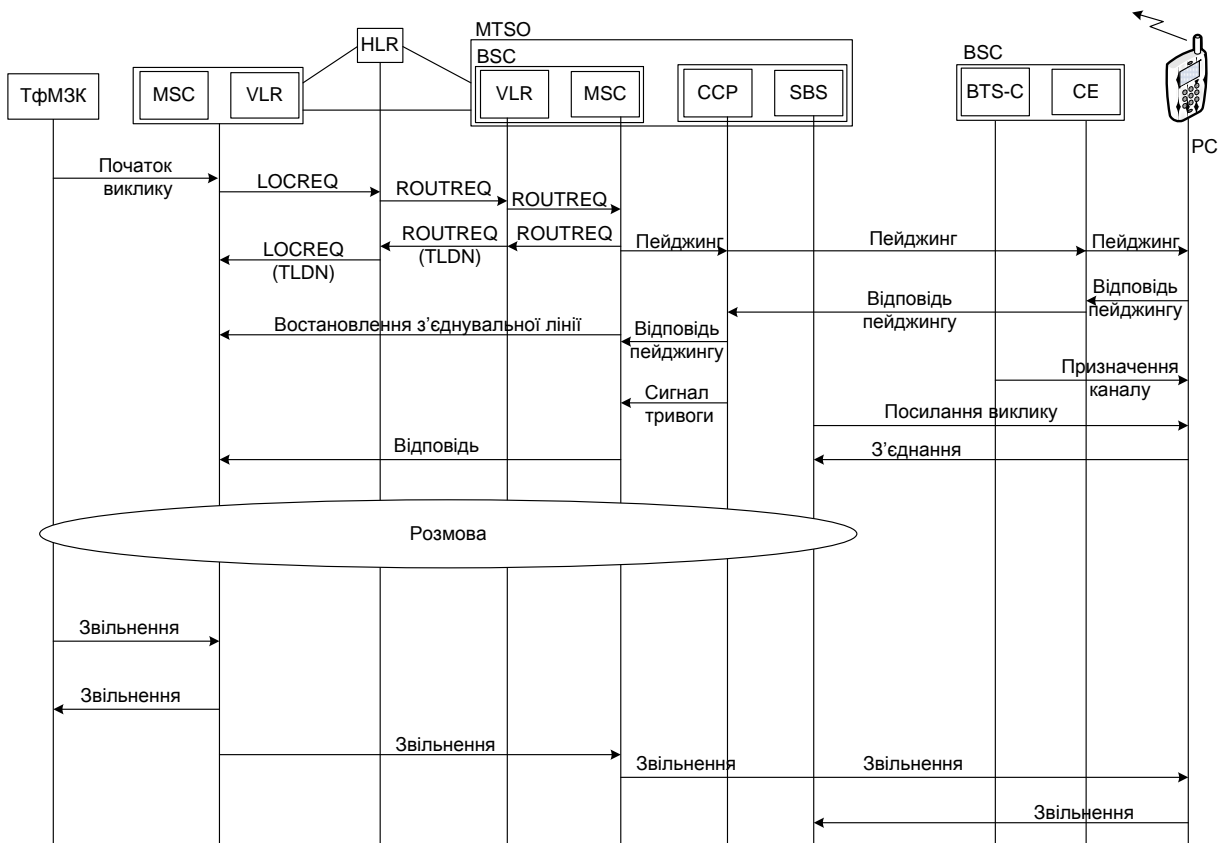


Рис.9.29 Встановлення вхідного виклику

10. СИСТЕМИ cdma2000 1x ТА cdma2000 3x

10.1. Загальні зауваження

Радіоінтерфейс cdma2000 оснований на популярному в Америці та Південній Кореї стандарті другого покоління IS-95. Під мережами стандарту cdma2000 мають на увазі мережі стандарту IMT-2000 з радіоінтерфейсом IMT-MS (рис. 10.1).

IMT-2000 Terrestrial Radio Interfaces

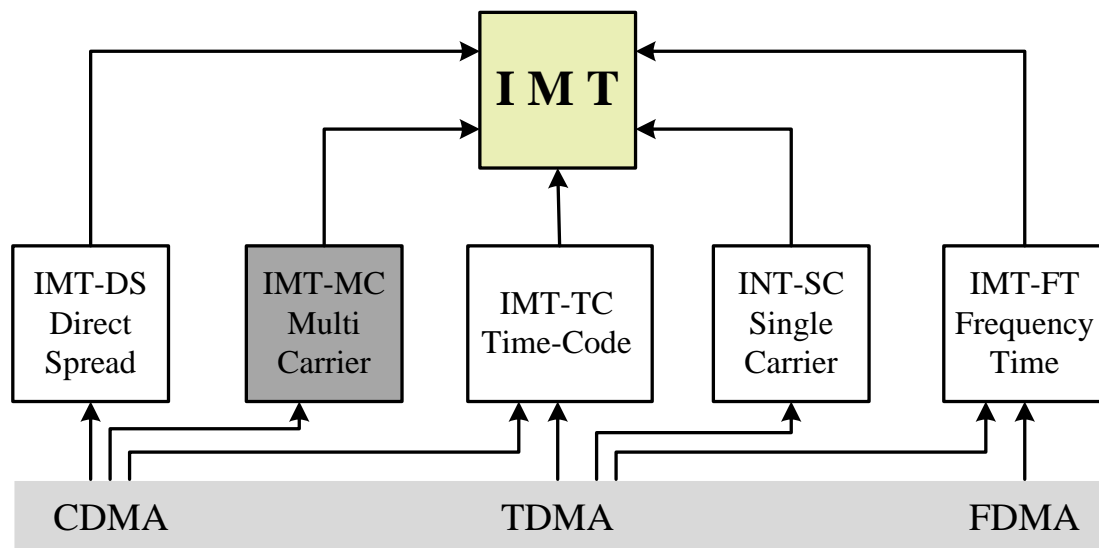


Рис.10.1 Радіоінтерфейси IMT-2000

Перший етап розвитку стандарту cdma2000, відомий як cdma2000 1x, або cdma2000 1XRTT представляє собою розширення існуючого стандарту IS-95B (рис. 10.2).

Більшість операторів мереж стандарту IS-95A вирішила пропустити етап переходу до IS-95B і перейти відразу до першої фази стандарту третього покоління - стандарту cdma2000 1x. Вона дозволяє подвоїти ємність системи та збільшити швидкість передачі до 614 Кбіт/с. Друга фаза, названа cdma2000 1xEV (англ. Evolution - еволюція), являється результатом подальшого розвитку стандарту cdma2000 1x. Стандарт cdma2000 1x називають також IS-95C. В

подальшому було виділено дві фази цього стандарту cdma2000 1x EV-DO (data only) і cdma2000 1x EV-DV (data and voice), які забезпечують швидкість передачі даних до 2,4 Мбіт/с. Далі, в третій фазі розвитку системи cdma2000, названої cdma2000 3x, планується ввести використання трьох незалежних CDMA каналів, які не перекриваються. При цьому буде збережена зворотна сумісність з стандартами cdma2000 1x і IS-95B. Збільшення смуги частот в 3 рази дозволяє підвищити швидкість передачі даних до 2 Мбіт/с.

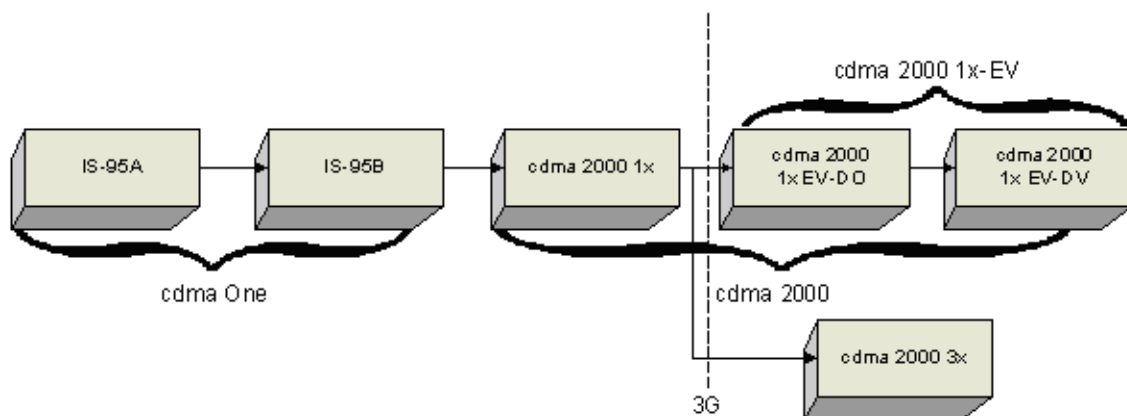


Рис.10.2 Еволюція IS-95A до стандарту третього покоління - 3G

Слід також відзначити, що стандарти сімейства cdma2000 не вимагають організації окремої смуги частот і в ході їх еволюційного розвитку від cdmaOne можуть бути реалізовані у всіх частотних діапазонах, що використовуються системами стільникового рухомого зв'язку (450, 700, 800, 900, 1700, 1800, 1900, 2100 МГц) і можуть бути накладені як на інфраструктуру мережі ANSI-41 так і на GSM-MAP.

Стандарт cdma2000 1x – перехідний стандарт між cdmaOne і 3G. В “чистому” виді, без надбудов та версій еволюції стандарт cdma2000 1x відноситься до 2.5G, а cdma2000 3x – до 3G.

В таблиці 10.1 приведені основні параметри системи cdma2000.

Таблиця 10.1 Основні параметри системи cdma2000

Параметр	cdma2000 1x	cdma2000 3x
Спектральна ширина каналу, МГц	1,25	3×1,25
Прямий радіоканал (DL). Канальна структура	Пряме розширення спектра (DS) псевдовипадковою послідовністю	Декілька несучих, DS на кожній несучій
Зворотній радіоканал (UL). Канальна структура	Пряме розширення спектра (DS)	Пряме розширення спектра (DS)
Чіпова швидкість, Мчп/с	1,2288 (прямий канал) 1,2288 (зворотний канал)	1,2288 на кожну несучу (прямий канал) 3,6864 (зворотний канал)
Довжина кадру, мс	20/5 (змінна для сигнальних пакетів)	
Тактування	Синхронне, від системи GPS	
Канальне кодування	Згортокове кодування, турбо-кодування, або без кодування	
Модуляція	QPSK	
Детектування	UL: когерентне, пілотна послідовність мультиплексована із бітами керування потужністю DL: когерентне, загальний неперервний і допоміжний пілот-канал	
Коефіцієнт розширення	4÷256	
Розширення в прямому каналі	Ортогональні послідовності Уолша змінної довжини (каналоутворюючі коди), m-послідовності довжиною $2^{15}-1$ (фазовий зсув визначає соту)	
Розширення в	Ортогональні послідовності Уолша змінної довжини	

зворотному каналі	(каналоутворюючі коди), m -послідовності довжиною $2^{42}-1$ (фазовий зсув визначає користувача)
Можливість зміни швидкості передачі даних	Змінні розширення спектра та мультикоди
Хендовер (передача з'єднання)	М'який хендовер, міжчастотний хендовер
Управління потужністю, Гц	З відкритою петлею та швидкою закритою петлею – 800

Як видно з таблиці 10.1 стандарти cdma2000 1x та cdma2000 3x мають багато спільного між собою, тому їх доцільно розглядати одночасно. Основна відмінність стандартів cdma2000 1x та cdma2000 3x полягає в ширині спектру (рис. 10.3), яку вони займають.

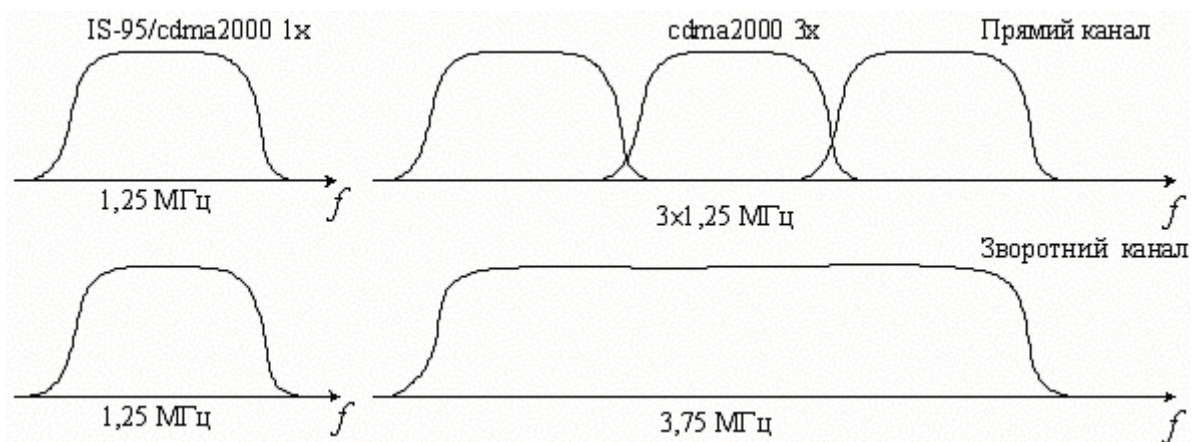


Рис.10.3 Розподіл спектру частот для систем cdma2000 1x та cdma2000 3x

Саме наявність трьох несучих в прямому каналі для cdma2000 3x (рис. 10.3) дало підставу для назви радіоінтерфейсу IMT-МС (Multi Carrier - багато несучих).

Крім того, системи cdma2000 1x та cdma2000 3x мають також багато спільного з стандартом IS-95 тому, в основному, будемо розглядати їх

відмінності від стандарту IS-95. Структурну схему каналу системи cdma2000 1x та cdma2000 3x можна представити у вигляді (рис. 10.4).

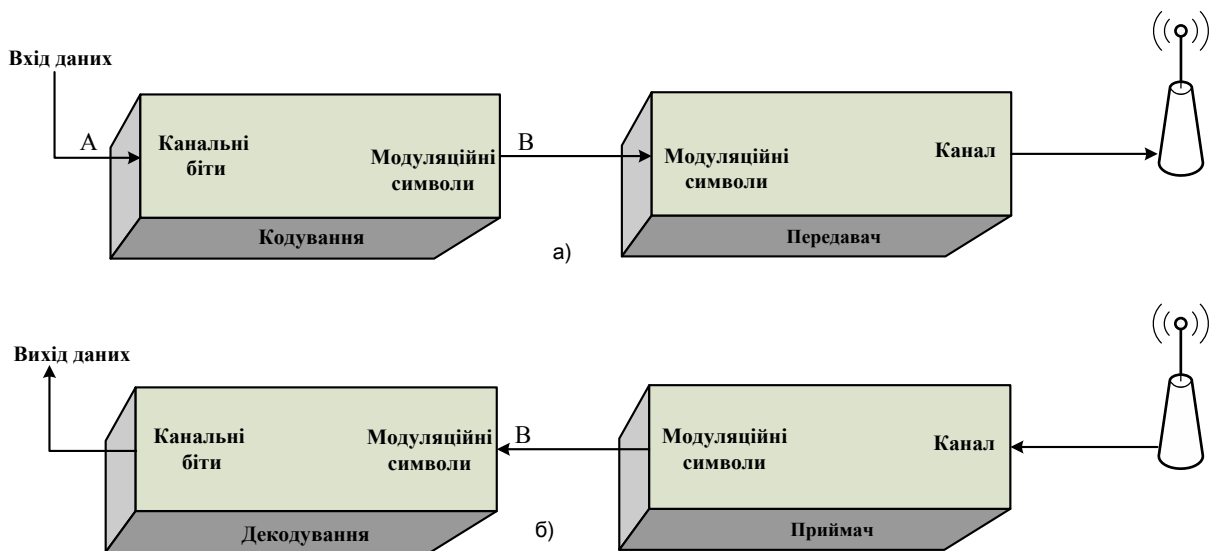


Рис.10.4 Структурна схема каналу зв'язку:

а) передавальна частина, б) приймальна частина

10.2. Прямий канал

У випадку прямого каналу передавальна частина (рис. 10.4) знаходиться на базовій станції. Розглянемо детальніше її будову.

10.2.1. Блок кодування

Канальні біти в блоці кодування (рис. 10.4,а) перетворюються в модуляційні символи в наступних блоках (рис. 10.5):

- додавання 16-бітового CRC блоку;
- кінцевих та резервних бітів кодера;
- згорткового кодера, $k = 9$, $R = 1/4$;
- блочного перемежувача.

Зауважимо, що числові дані приведені на рис. 10.5 стосуються випадку набору швидкостей RS2 для прямого додаткового каналу в системі cdma2000 3x.

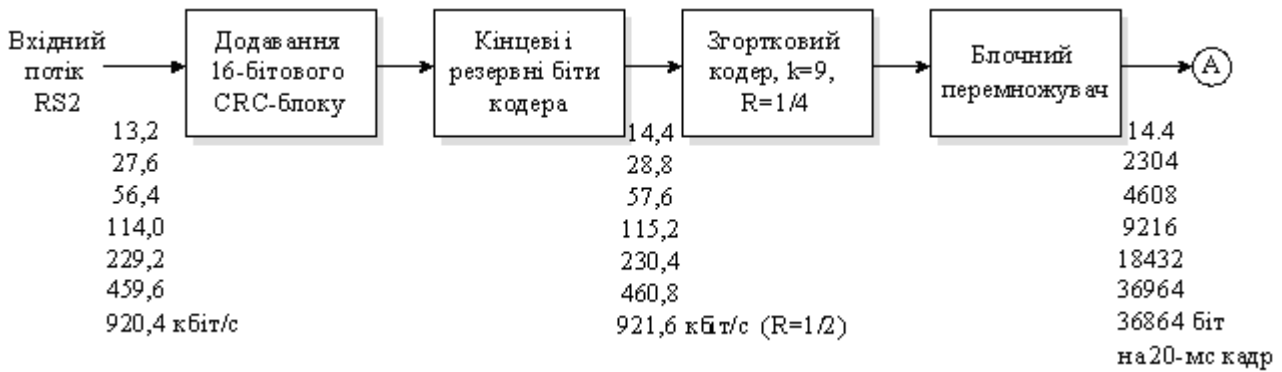


Рис.10.5 Передача даних на етапі кодування прямого каналу

До блоку даних, який повинен передаватись в 20-мс кадрі спочатку додаються 16 CRC-бітів, потім резервні та кінцеві біти. Далі, отриманий потік кодується згортковим кодом з довжиною кодового обмеження $k = 9$, коефіцієнтом кодування $R = 1/4$ та здійснюється перемноження.

10.2.2. Передавач

В передавачі (рис. 10.4,а) дані перетворюються в сигнал каналу в наступних блоках (рис. 10.6):

- скремблювання довгим кодом, контролю потужності;
- канального кодування, скремблювання коротким кодом;
- фільтрування;
- QPSK модулятора.

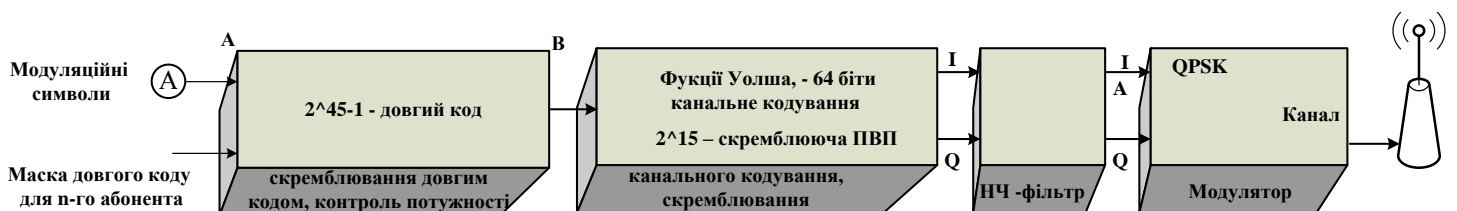


Рис.10.6 Передача даних в прямому додатковому каналі
(система cdma2000 3x, набір швидкостей RS2)

Скремблювання довгим кодом, контроль потужності

В даному блоці (рис. 10.7) здійснюються операції, аналогічні системі IS-95, тобто модуляційні символи сумуються за модулем 2 з прорідженим вихідним потоком генератора довгого коду з маскою, специфічною для n-го користувача, та додаються біти регулювання потужності.

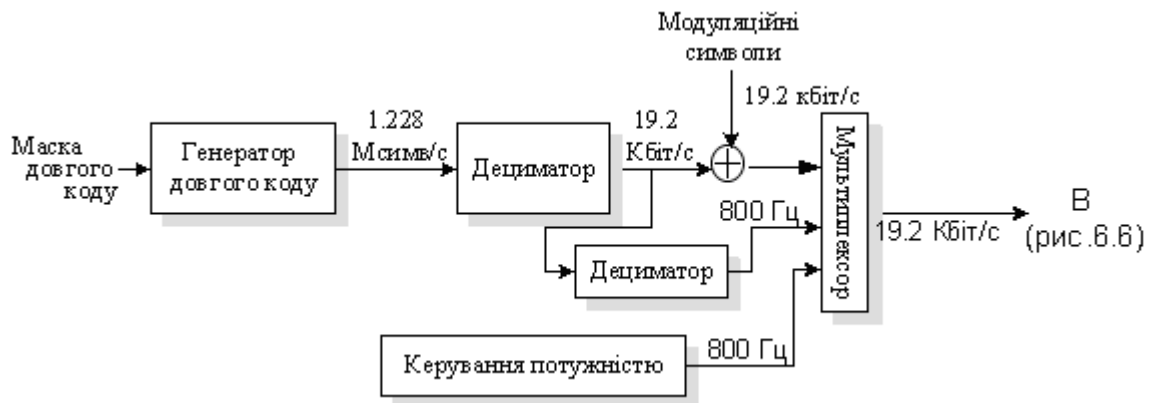


Рис.10.7 Перетворення даних в блоці скремблювання довгим кодом та контроль потужності

У випадку системи cdma2000 3x потік даних ділиться на три гілки, причому для кожного потоку генерується окрема несуча частота (f_1 , f_2 , і f_3 – рис. 10.3).

Канальне кодування, скремблювання псевдовипадковою послідовністю (рис. 10.6)

В даному блоці двійкові потоки розділяються на синфазні та квадратурні складові (рис. 10.8). Потім ці складові розширюються функціями Уолша, які виступають в ролі кодів каналотворення. Функції Уолша можуть містити від 4 до 256 бітів (табл. 10.1), причому при меншій довжині коду формується більша швидкість даних користувача. Далі за допомогою ПВП довжиною 2^{15} здійснюється скремблювання отриманих двійкових потоків. Фаза ПВП послідовності визначає комірку. Після процесу скремблювання синфазні та

квадратурні вихідні потоки формуються низькочастотними фільтрами та модулюють відповідні несучі частоти.

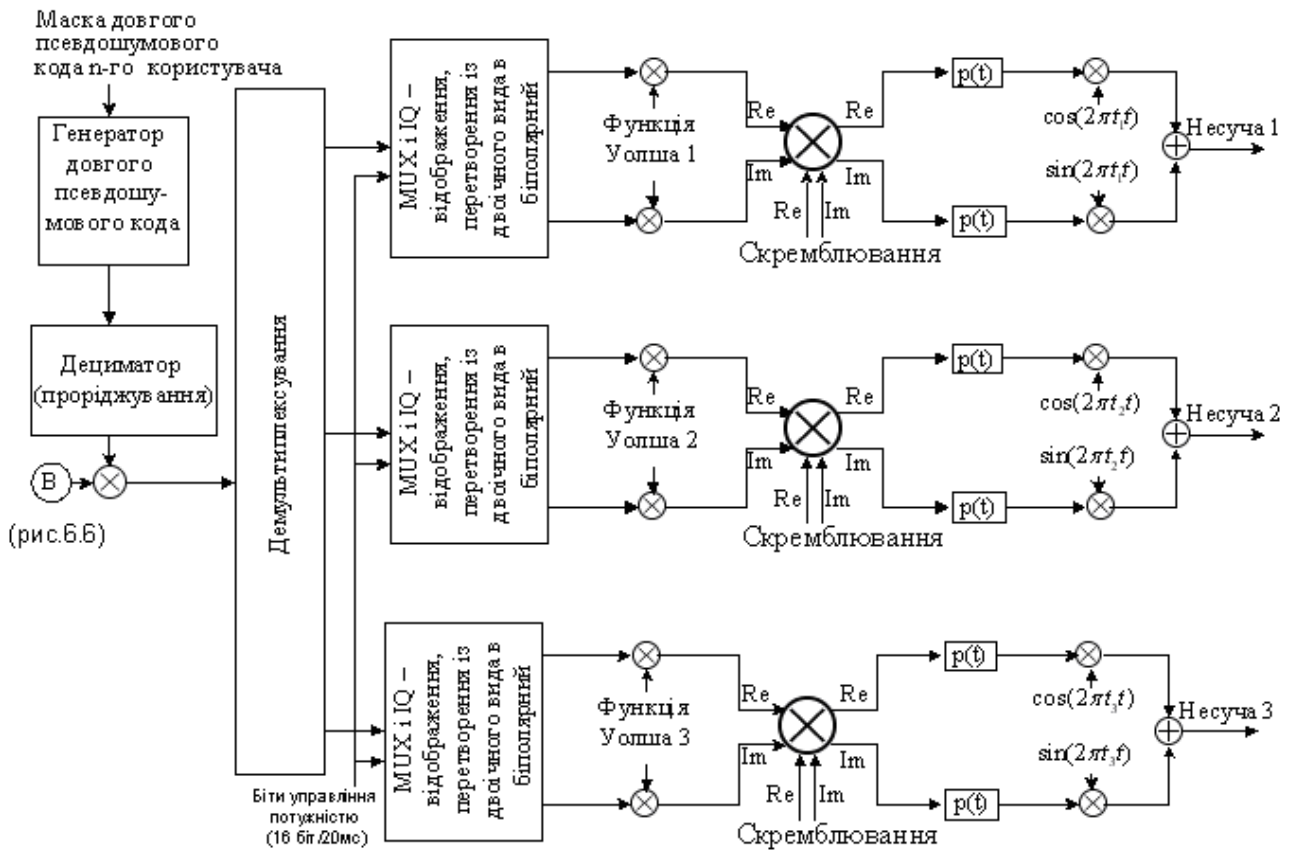


Рис.10.8 Передача даних в прямому каналі системи cdma2000 3x

НЧ фільтр, модулятор (рис. 10.6)

Зауважимо, що НЧ фільтр та модулятор ідентичні приведеним для системи IS-95. Також необхідно відмітити, що крім сигналів каналу трафіку, показаних на рис. 10.5, також передаються сигнали інших каналів (пілот-каналу, основного каналу, каналу пейджингу і т.д.).

10.2.3. Швидкість передачі каналу трафіку

Одним з найважливіших питань при аналізі системи являється визначення швидкості передачі даних каналу трафіку [7]. Суть збільшення швидкості передачі в системі cdma2000 порівняно з системою IS-95, полягає в наступному:

- В системі IS-95 для голосового каналу і передачі даних із швидкістю 9600 біт/с використовуються функції Уолша довжиною 64 біта. Для забезпечення більшої швидкості передачі даних користувача, при збереженні швидкості передачі вихідних символів 1.2288 Мбіт/с, необхідно зменшити довжину кодової послідовності. Для швидкості передачі 19200 біт/с використовуються функції Уолша довжиною 32 біта, і далі відповідно до зростання швидкості довжина функції Уолша зменшується, наприклад, для швидкості 153,6 Кбіт/с довжина складає лише 4 біти.
- Змінено структуру та кількість фізичних каналів.

Зауважимо, що в системі cdma2000-1x набагато більше фізичних каналів, порівняно з IS-95.

Передача трафіку в прямому каналі здійснюється за допомогою двох прямих каналів (рис. 10.9):

- прямого основного каналу (англ. Forward Fundamental Channel - F-FCH);
- прямого додаткового каналу (англ. Forward Supplemental Channel - F-SCH), причому одному з'єднанню, крім основного каналу F-FCH, може бути виділено одночасно декілька каналів F-SCH.

Прямий основний канал F-FCH

Він формує кадр довжиною 20 мс. Швидкості передачі вибираються з набору швидкостей, аналогічних для IS-95B:

- 1.2; 2.4; 4.8; 9.6 кбіт/с – для набору RS1;
- 1.8; 3.6; 7.2; 14.4 кбіт/с – для набору RS2.

Велика кількість комбінацій типів кодування, повторення та перемежування дозволяє створити множину різних швидкостей передачі даних. У всіх конфігураціях 20 мс кадр містить 384 біти, що еквівалентно швидкості

19,2 Кбіт/с для набору RS1, та 768 бітів, або 38,4 Кбіт/с, в наборі швидкостей RS2.

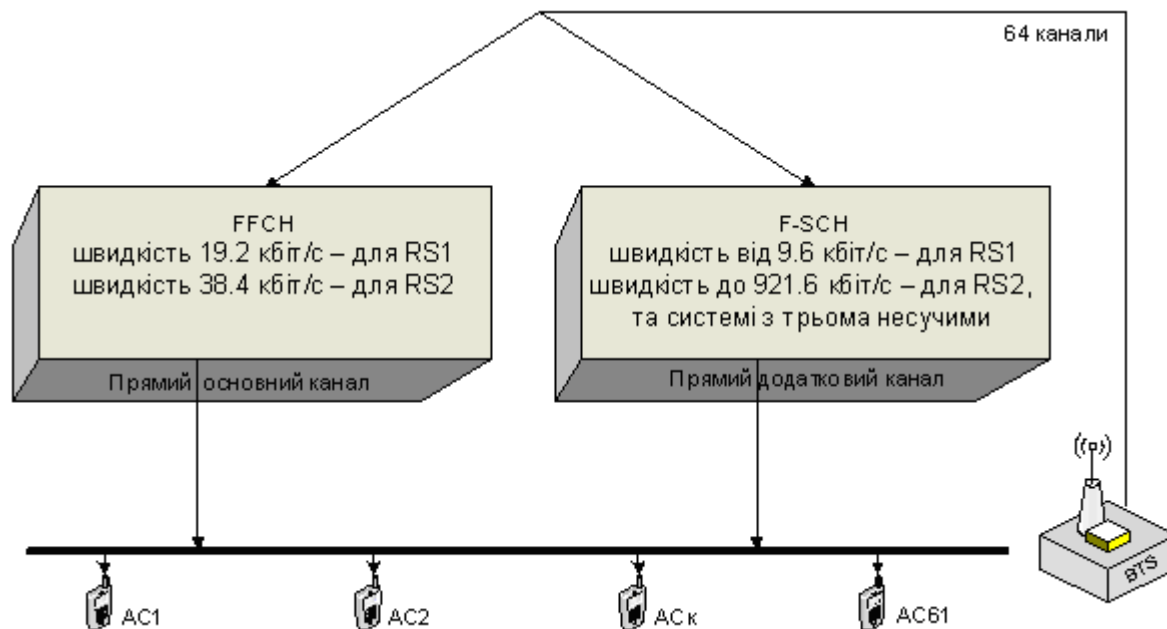


Рис.10.9 Швидкості передачі в прямому каналі

Прямий додатковий канал F-SCH

Додатковий канал використовується для перенесення інформації сумісно з основним каналом на більш високих швидкостях, порівняно з використанням тільки F-FCH каналу. Для передавачі даних з невеликими швидкостями використовується згорткове кодування, а для передачі з більш високими швидкостями - турбо-кодування. До різних додаткових каналів можуть бути різні вимоги щодо ймовірності появи бітових помилок в залежності від застосування. При передачі через додаткові канали каналоутворюючі функції Уолша можуть мати різну довжину (різні коефіцієнти розширення), яка залежить від швидкості вхідного потоку. Вони вибираються таким чином, щоб після розширення ширина спектру лишалась незмінною, або швидкість передачі модуляційних символів становила 1.2288 Мбіт/с.

В результаті можна отримати широкий спектр швидкостей (рис. 10.5) передачі даних, починаючи з 9,6 Кбіт/с і закінчуючи 921,6 Кбіт/с при 548

використанні набору швидкостей RS2 в конфігурації системи cdma2000 3x з трьома несучими.

10.3. Передавальна частина зворотного каналу

В зворотному каналі, як і в прямому каналі, використовується декілька фізичних каналів, призначення яких буде показано далі. Для опису передавальної частини зворотного каналу, в першу чергу, представляють інтерес наступні фізичні канали:

- зворотний основний канал (R-FCH);
- зворотний додатковий канал (R-SCH);
- зворотний пілот-канал (R-PICH);
- зворотний виділений канал (R-DCCH).

Конфігурація зворотних основного, додаткового, пілотного і виділеного каналів передавальної частини зворотного каналу відрізняється від конфігурації прямого каналу. В основному такі зміни майже не стосуються блоку кодування (рис. 10.4,а), а в більшій мірі стосуються блоку передавача.

Після кодування та перемежування в блоці кодування здійснюється каналне кодування за допомогою функцій Уолша (рис. 10.10).

Далі, потоки даних скремблюються псевдовипадковою комплексною послідовністю, модифікованою довгим кодом, специфічним для конкретного користувача. Після формування імпульсів синфазна та квадратурна компоненти переносяться в потрібний діапазон частот за допомогою пари ортогональних модуляторів.

Необхідно відмітити, що розширення спектру, яке здійснюється за допомогою функцій каналоутворення, залежить від швидкості вхідного потоку, тому можливе використання функцій Уолша різної довжини. Це основна різниця між системами cdma2000 та IS-95.

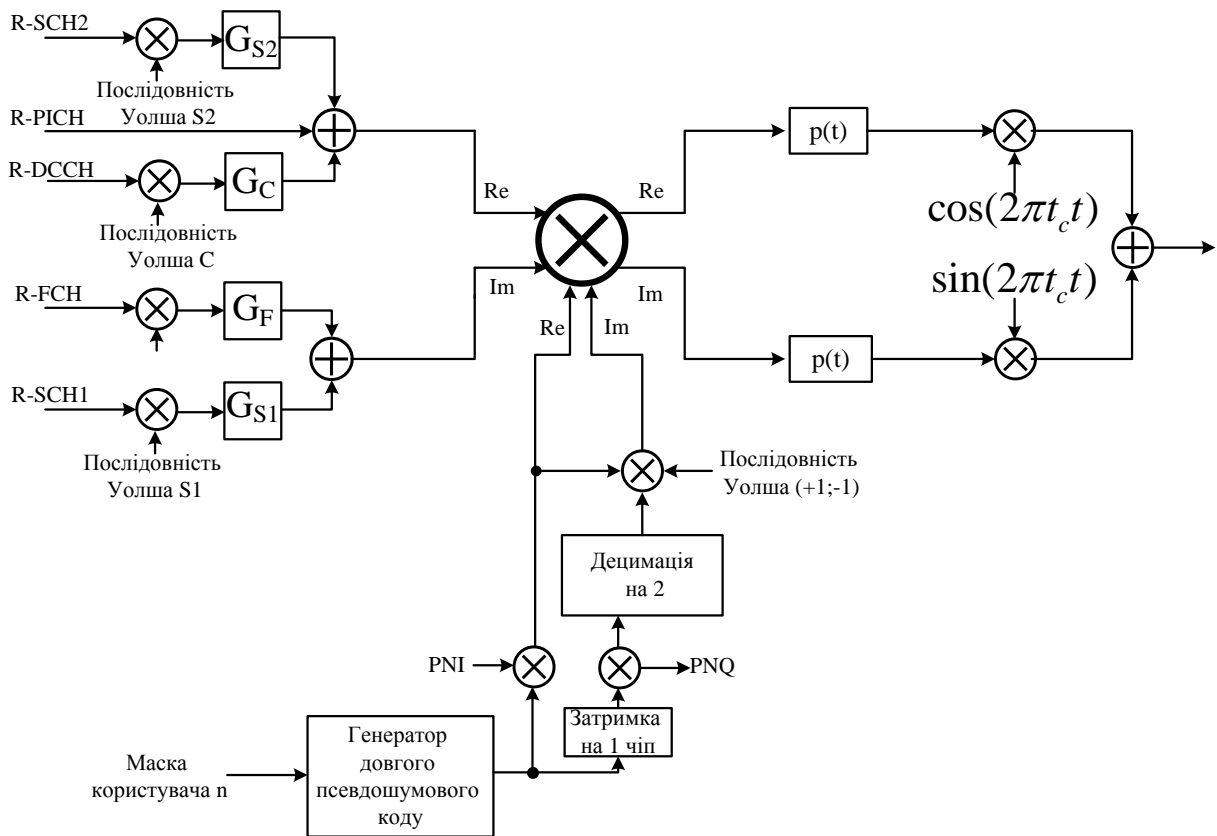


Рис.10.10 Формування даних в блоці передавача зворотного каналу

10.4. Швидкість передачі в зворотному каналі

Передача трафіка в зворотному каналі здійснюється за допомогою двох зворотних каналів:

- зворотного основного каналу (англ. Reverse Fundamental Channel - R-FCH);
- зворотного додаткового каналу (англ. Reverse Supplemental Channel - R-SCH).

Зворотній основний канал R-FCH

Цей канал використовується для формування даних користувача. Швидкості передачі вибираються з набору швидкостей:

- 1.5; 2.7; 4.8; 9.6 Кбіт/с - набір швидкостей RS1;
- 1.8; 3.6; 7.2; 14.4 Кбіт/с - набір швидкостей RS2.

Зворотній додатковий канал

Призначений для додаткової передачі даних користувача. Він може використовуватись в двох режимах:

- в першому режимі швидкість передачі даних не перевищує 14,4 Кбіт/с, причому базова станція повинна визначати реальну швидкість передачі даних без додаткової інформації від рухомої станції;
- в другому режимі можливі більш високі швидкості передачі, але вони попередньо відомі.

10.5. Фізичні канали системи

Перелік фізичних каналів приведено на рис. 10.11.

Прямий пілот-канал (англ. Forward Pilot Channel – F-PICH) використовується АС для оцінки імпульсного відгуку каналу, що є необхідним для роботи RAKE приймача. Він також необхідний для визначення соти та під час переключення між сотами [8].

Прямий канал синхронізації (англ. Forward Sync Channel – F-SYCH) використовується АС для синхронізації з системою. Існує два типи каналу синхронізації. Перший називається розділюваним F-SYCH каналом та використовується в IS-95B та cdms2000. Інший використовує весь спектр ширококутний F-SYCH канал використовується в перекриваючихся та неперекриваючихся системах (IS-95B та cdms2000).

Прямий пейджинговий канал (англ. Forward Paging Channel – F-PCN) використовується для виклику АС та передачі їм повідомлень керування пов'язаних з виділенням каналів, підтвердженням та ін.

Прямий загальний канал керування (англ. Forward Common Control Channel – F-CCCH) використовується для передачі АС повідомлень MAC рівня і мережевого рівня.

Прямий загальний допоміжний пілот-канал (англ. Forward Auxiliary Pilot Channel – F-CAPICH) застосовується для створення вузьких (гостронаправлених) променів за допомогою адаптивних антен. Канал F-

CDMA використовується рухомими станціями, розташованими в створеному напрямленому промені.

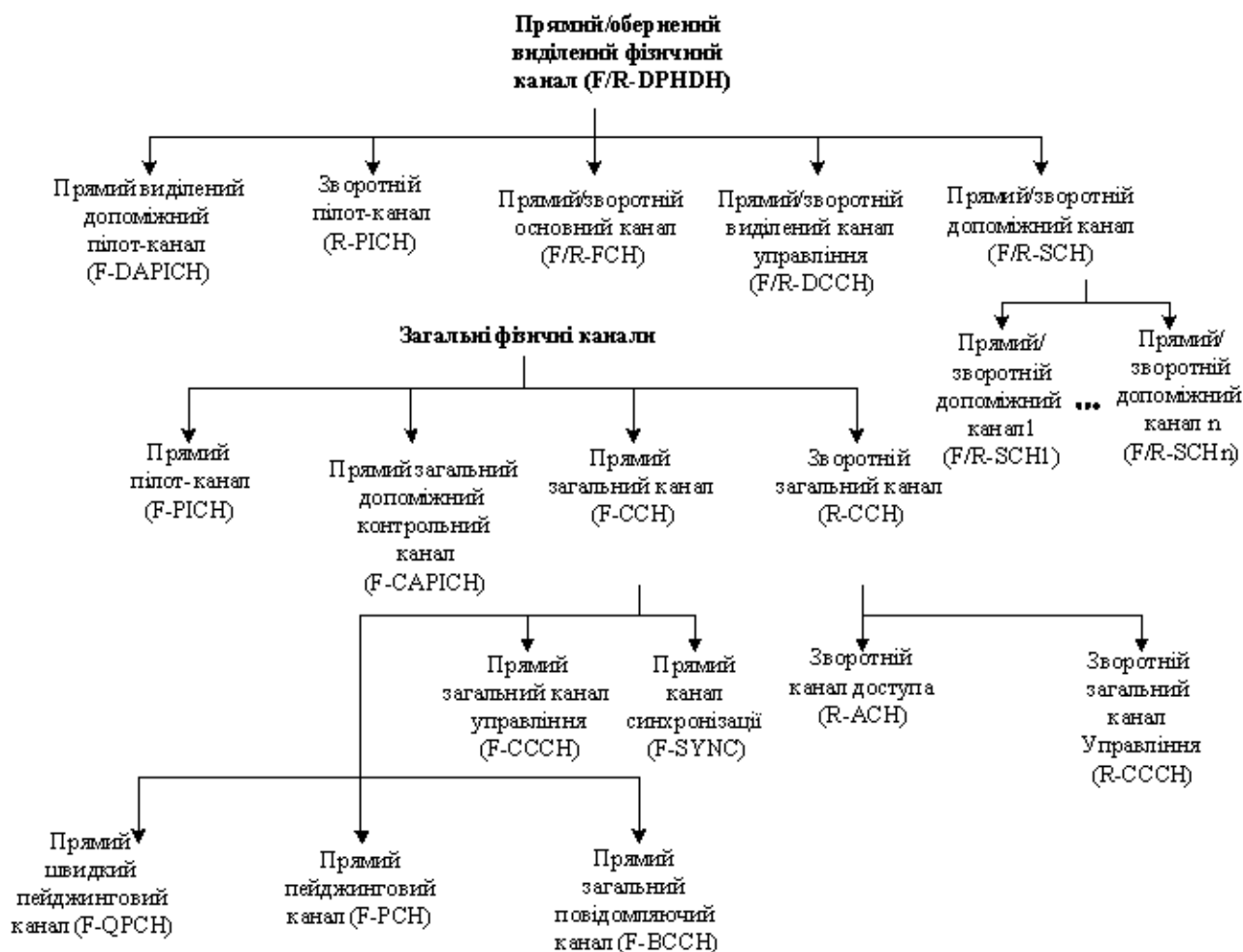


Рис.10.11 Фізичні канали системи cdma2000

Прямий виділений допоміжний пілот-канал (англ. Forward Dedicated Auxiliary Pilot Channel – F-DAPICH) використовується для знаходження конкретної рухомої станції.

Прямий загальний мовний канал (англ. Forward Broadcast Common Channel – F-BCCH) є каналом виклику, призначеним для передачі мовних і SMS-повідомлень, тобто для передачі цих повідомлення не потрібно використовувати пейджинговий канал.

Прямий швидкий пейджинговий канал (англ. Forward Quick Paging Channel – F-QPCH) використовується для виклику АС, що працюють в режимі

виділеного слоту.

Прямий основний канал (англ. Forward Fundamental Channel – F-FCH) використовується для передачі трафіку прямого каналу. Кадр має довжину 20 мс. Швидкість передачі даних вибирається з наборів швидкостей, аналогічних IS-95B – RS1 (1,5; 2,7; 4,8; 9,6 Кбіт/с) та RS2 (1,8; 3,6; 7,2 і 14,4 Кбіт/с).

Прямий додатковий канал (англ. Forward Supplemental Channel – F-SCH) використовується для передачі інформації користувача разом із основним каналом на вищих швидкостях, ніж це дозволяє використання тільки F-FCH. Для передачі даних з невеликими швидкостями використовується згорткове кодування, а для передачі даних з високими швидкостями турбо-кодування. Одному з'єднанню може бути одночасно виділено кілька каналів F-SCH. Залежно від застосувань до різних додаткових каналів можуть ставитися різні вимоги щодо ймовірності появи помилок. В результаті можна отримати широкий спектр швидкостей передачі даних, починаючи від 9,6 Кбіт/с до 921,6 Кбіт/с при використанні набору швидкостей RS2 в конфігурації системи cdma2000 з трьома несучими.

Прямий виділений канал управління (англ. Forward Dedicated Control Channel – F-DCCH) використовується для передачі даних керування в режимі “точка-точка” із швидкістю 9,6 Кбіт/с.

Зворотний канал доступу (англ. Reverse Access Channel – R-ACH) - канал багатостанційного доступу, який використовується АС для отримання доступу до ресурсів системи. При передачі даних каналом R-ACH застосовується принцип синхронної АЛОНА.

Зворотний загальний канал управління (англ. Reverse Common Control Channel – R-CCCH) використовується для передачі повідомлень рівня MAC і мережевого рівня від рухомої на базову станцію. В порівнянні з каналом R-ACH канал R-CCCH володіє розширеним можливостями, які дозволяють забезпечити швидший доступ при пакетній передачі даних.

Зворотний пілот-канал (англ. Reverse Pilot Channel – R-PICH) складається з пілотної послідовності, що отримується при подачі на вхід каналу постійного

сигналу, мультиплексованого з бітами керування потужністю, які призначені для закритої петлі керування потужністю. Канал R-PCN користується базовою станцією для початкової установки, підтримки шкали часу, оцінки каналу, вимірювань потужності і синхронізації послідовностей, необхідних RAKE-приймачу.

Зворотний виділений канал управління (англ. Reverse Dedicated Control Channel – R-DCCN) призначений для індивідуальної передачі даних від рухомої станції на базову.

Зворотний основний канал (англ. Reverse Fundamental Channel – R-FCH) використовується для передачі даних користувача. Швидкість передачі даних залежить від використовуваного набору швидкостей. У набори входять швидкості RS1 (1,5; 2,7; 4,8; 9,6 Кбіт/с) та RS2 (1,8; 3,6; 7,2 і 14,4 Кбіт/с).

Зворотний додатковий канал (англ. Reverse Supplemental Channel – R-SCH) додатковий канал для передачі даних користувача. Він може працювати в двох режимах. В першому режимі швидкість передачі даних не перевищує 14,4 Кбіт/с і базова станція повинна визначати реальну швидкість передачі даних без додаткової інформації, яка передається AC. В другому режимі доступні вищі швидкості передачі даних, але вони відомі заздалегідь.

10.6. Інші стандартні функції системи cdma2000

Найбільш важливі з них - регулювання потужності, хендовер, пошук соти, а також процедури довільного доступу. В cdma2000 так само як і в IS-95 застосовуються відкрита і закрита петлі управління потужністю. Як правило, рівень сигналу встановлюється на основі вимірювань рівня прийнятого сигналу. Точність регулювання потужності відкритої петлі не дуже висока. При використанні закритої петлі регулювання потужності вдається компенсувати “середні” та швидкі завмирання. Процедура пошуку соти подібна на таку ж процедуру в системі IS-95B. В cdma2000 виконується процедура м'якого хендовера. Крім того, існує можливість передачі з'єднання між системами cdma2000 і IS-95B Під час хендовера основний і додатковий канали

обробляються по-різному. При м'якому хендовері використовується мінімально можлива кількість базових станцій, щоб мінімізувати перешкоди і максимізувати ємність системи.

10.7. Особливості радіоінтерфейсу CDMA 2000 1x EV-DO

Якщо в стандарті 1x пропускна здатність прямого і зворотного каналу однакова, то в стандарті EV-DO пропускна здатність прямого каналу значно більша. Цьому є достатньо просте пояснення якщо стандарт 1x в основному використовується для голосу і даних, тобто трафік достатньо симетричний, то стандарт 1x EV-DO розрахований тільки на передачу даних, цим і обумовлена велика швидкість в прямому каналі. Реально трафік даних є не симетричним, зазвичай абоненти приймають більше інформації, ніж передають.

На рисунку 10.12 видно, що принципово структура формування каналів в даному стандарті практично аналогічна стандарту 1x. Але окрім цього додаються специфічні канали, властиві даному стандарту. У прямому каналі це канали оцінки активності і контролю потужності зворотного каналу, а також блокування каналу контролю передачі даних, які використовуються мережею для заборони абонентському терміналу вибору сектора.

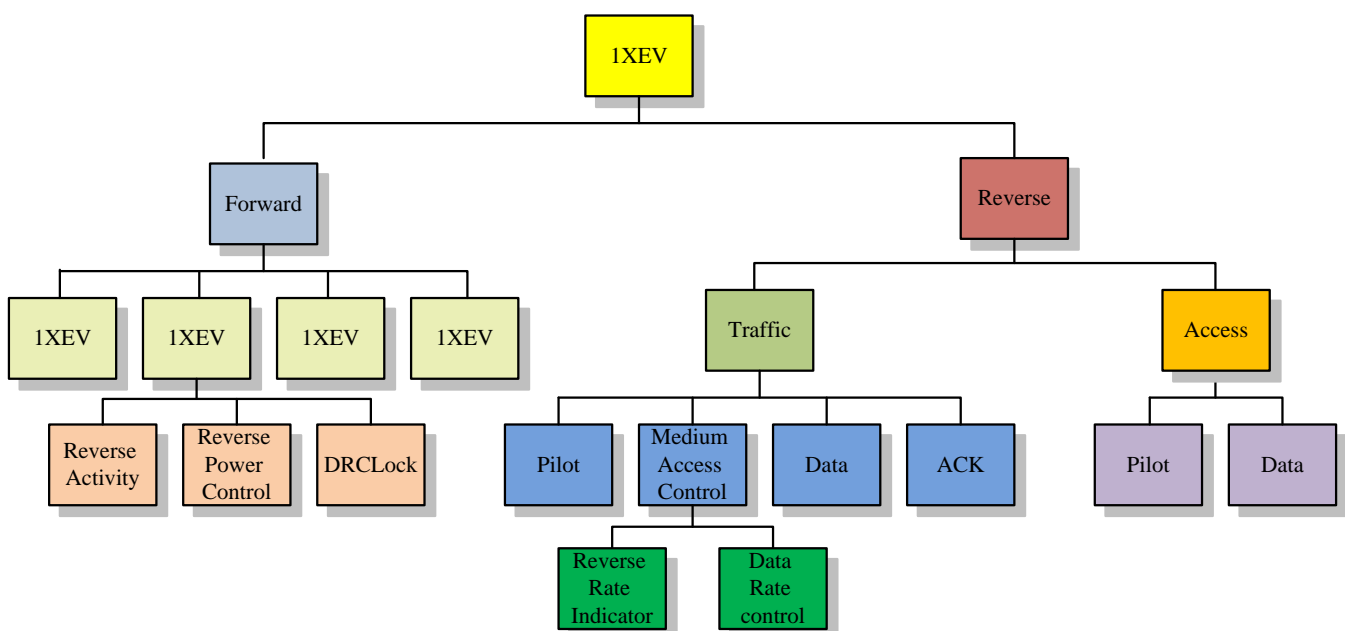


Рис.10.12 Структура каналів cdma2000 1x EV-DO

Зворотний канал за типом модуляції і структурою повністю аналогічний стандарту 1x за винятком двох нових логічних каналів інформації про швидкість передачі даних в зворотному каналі (абонентський термінал повідомляє швидкість передачі даних в зворотному каналі) і контролю передачі даних (DRC). При цьому термінал повідомляє максимально можливу швидкість передачі даних в прямому каналі.

Максимальна швидкість передачі даних для абонента 1x EV-DO в прямому каналі може досягати величини 2,4 Мбіт/с. Така швидкість досяжна завдяки принципам відмінностям прямого каналу.

У прямому каналі використовується технологія часового розділення абонентів. Технологія часового розділення найбільш оптимально підходить для пакетної передачі даних. При цьому в прямому каналі в стандарті EV-DO використовуються 16 тайм-слотів тривалістю по 1,67 мс кожен, в яких передається абонентська інформація. Тобто в якийсь момент часу передається інформація одного абонента. Це дозволяє виділити повну потужність передавача для кожного конкретного абонента. Немає необхідності контролю потужності в прямому каналі. Відповідно в прямому каналі немає джерел інтерференції, всередині соти присутні перешкоди від сусідніх сот.

Залежно від типу інформації, що передається використовується адаптивна модуляція. Від типу модуляції яка використовується в прямому каналі, залежить швидкість передачі даних, система оцінює розмір кодованого пакету стан радіоінтерфейсу і призначає відповідно до цього вид модуляції QPSK, 8PSK або 16QAM.

Застосовуються алгоритми контролю швидкості передачі даних. Оскільки в системі EV-DO потужність передачі постійна, проводиться оцінка стану радіоінтерфейсу і швидке підстроювання швидкості передачі даних. Залежність швидкості передачі інформації приведена в таблиці 10.2.

Пояснимо вищесказане. Наприклад, абонент закачує файл даних великого розміру або дивиться потокове відео, система сама призначає йому швидкість.

Абонентський термінал оцінює відношення сигнал/шум в секторі і разом з інформаційним запитом передає індекс DRC, відповідно до якого система визначає максимально можливу швидкість передачі даних в прямому каналі. Даний індекс динамічно міняється під час сеансу залежно від рівня інтерференції. Відповідно до кількості біт в кодованому пакеті система призначає вид модуляції, кількість тайм-слотів і відповідно швидкість передачі даних.

Таблиця 10.2 Залежність швидкості передачі від відношення сигнал/шум

Rdo	Індекс DRC	Порогове С/Ш, дБ
38,4 Кбіт/с	1	-12
76,8 Кбіт/с	2	-9,6
153,6 Кбіт/с	3	-6,8
307,2 Кбіт/с	4	-3,9
307,2 Кбіт/с	5	-3,8
614,4 Кбіт/с	6	-0,6
614,4 Кбіт/с	7	-0,8
921,6 Кбіт/с	8	1,8
1 2288 Мбіт/с	9	3,7
1,2288 Мбіт/с	10	3,8
1,8432 Мбіт/с	11	7,5
2,4576 Мбіт/с	12	9,7

Таким чином, при значенні DRC-індексу 12 і передачі пакетів великого об'єму швидкість передачі даних абонента досягає 2,4 Мбіт/с. При цьому він займає всього лише один тайм-слот. Решта всієї ємності доступна для інших абонентів. Тобто система керує швидкістю передачі і ніколи не виділить більше ресурсів абонентові, що знаходиться в гірших умовах.

10.8. Система CDMA 450

В системі ІМТ-МС-450 використовуються шумоподобні (псевдовипадкові) сигнали і розширення спектру, а також ефективніші, ніж в системах 2G методи модуляції і кодування (зокрема, енергетичний вигравш від кодування в системі cdma2000 на 5 дБ більше, ніж в GSM-системах) і т.д. В цілому це забезпечує вищу спектральну ефективність систем ІМТ-МС при передачі, як мови, так і даних.

Використання енергії декількох сигналів при багатопроменовому розповсюдженні радіохвиль одна із хороших властивостей систем ІМТ-МС; ефективна робота в умовах багатопроменового розповсюдження сигналів особливо яскраво проявляється в умовах щільної міської забудови.

Багатопроменове розповсюдження сигналів негативно позначається на роботі коміркових систем 1G і 2G, які використовують сигнал тільки одного променя, а решта променів створюють перешкоди і можуть приводити до значних завмирань сигналу (федінгу). В системах ІМТ-МС багатопроменове розповсюдження не веде до погіршення зв'язку завдяки використанню RAKE-приймачів, які мають декілька каналів кореляційного прийому. RAKE-приймачі обробляють сигнали, що пройшли різними шляхами (променями), вирівнюючи їх фазу і складаючи по амплітуді, що дозволяє використовувати практично всю потужність сигналу, що приймається. Також RAKE-приймачі використовуються під час м'якого переключення (хендовер - soft handover), що дозволяє знизити потужність випромінювання БС і підвищити ємність системи.

Динамічне регулювання потужності передачі абонентських терміналів і базових станцій - одна з принципових особливостей систем ІМТ-МС, без якої було б неможливо реалізувати їх основні переваги і, перш за все, забезпечити високу спектральну ефективність. У системах cdma2000 використовується складна і ефективна система регулювання потужності з параметрами, які істотно перевершують аналогічні параметри в системі GSM: глибина - 80 дБ, крок - 0,5 дБ, точність - 0,5 дБ, швидкість передачі команд - 800 Гц. Це дозволяє передавачам абонентських і базових станцій працювати на мінімально можливій потужності і тим самим максимізувати ємність системи. Одночасно

це зменшує вплив електромагнітних випромінювань терміналів на абонентів і збільшує термін служби акумуляторів між заряджаннями. Максимальна потужність, що випромінюється телефоном ІМТ-МС-450, складає близько 200 мВт (у системах GSM ця величина рівна 2 Вт). З врахуванням регулювання потужності середнє значення потужності, що випромінюється передавачами абонентських і базових станцій стандарту ІМТ-МС, значно менше максимальних значень.

У системах ІМТ-МС всі основні параметри мережі - зона обслуговування, пропускна спроможність (ємність) підсистеми радіодоступу і якість обслуговування - взаємозв'язані, і є можливість поліпшення одних параметрів за рахунок інших. Тому в системах ІМТ-МС немає жорстких обмежень щодо ємності (soft capacity), і при зростанні навантаження на деякі сектори їх пропускна здатність може бути збільшена за рахунок зменшення зони покриття і/або деякого збільшення вірогідності помилкових фреймів, що не призводить до істотного зниження якості мови і параметрів передачі даних.

Вокодери, які використовуються в системі cdma2000 (EVRC), забезпечують не тільки ефективнішу передачу мови, ніж в системі GSM (8 Кбіт/с замість 13 Кбіт/с), використовують адаптивну швидкість передачі залежно від ступеня активності мови, але і забезпечують зниження рівня навколишнього шуму за рахунок адаптивного регулювання порогів переходу до різних швидкостей передачі залежно від рівня шуму.

У системі ІМТ-МС в прямому каналі конфігурації RC3 і RC4 можуть використовуватися одночасно. Підтвердження стійкості системи ІМТ-МС до перевантажень було отримане в Санкт-Петербурзі під час футбольних матчів, масових заходів та ін., коли один сектор ближньої базової станції протягом декількох годин обслуговував навантаження більше 90 Ерл. замість нормативного навантаження 20 Ерл., причому була задіяна тільки одна несуча 1,23 МГц із трьох доступних в смузі 4,4 МГц, відведених для ІМТ-МС-450.

Слід також відзначити, що для забезпечення однакової пропускної спроможності передачі мови системі GSM буде потрібно у декілька разів

ширшу смугу частот в порівнянні з системою ІМТ-МС-450.

Однією з найважливіших переваг технології ІМТ-МС є закладена в стандарт можливість високошвидкісної пакетної передачі даних (ВСПД) на швидкості до 153 Кбіт/с. Специфікації використовуваної зараз версії стандарту (IS-2000 rev. 0) були розроблені в 1999 р. на базі стандарту IS-95В. Причому закладені в специфікації можливості ВСПД максимально орієнтовані на користувачів інтернету, що працюють в інтерактивному режимі. Швидкість, яка надається користувачеві мобільного інтернету, залежить, зокрема від ресурсу, який вимагається. У режимі ВСПД користувачеві окрім фундаментального каналу (із швидкістю 9,6 Кбіт/с) може бути наданий додатковий канал із швидкістю 19.2, 38.4, 76.8 або (максимум) 153.6 Кбіт/с.

При незначному об'ємі ресурсу, який вимагається абонентом, наприклад, скачуванні з інтернету текстових сторінок розміром в десятки кілобайт, повношвидкісний (153 Кбіт/с) додатковий канал не надається, а середня швидкість під час сеансу складає 40÷60 Кбіт/с. Навпаки, якщо є запит до ресурсу об'ємом декілька мегабайт, то адаптивний алгоритм прагне надати такому користувачеві повношвидкісний додатковий канал за наявності в системі вільного ресурсу (тобто кодів Уолша і каналних елементів на БС). В цьому випадку середня швидкість передачі даних за сесію у користувача, як правило, перевищує 100 Кбіт/с (з урахуванням нижчої швидкості при встановленні з'єднання і умов радіоефіру).

У стандарті GSM спочатку не була закладена можливість передачі даних на швидкостях більше 9,6 Кбіт/с. Можливість збільшити швидкість передачі до 13 Кбіт/с з'явилася пізніше. Наступний крок полягав у впровадженні технології GPRS. Проте це вимагало від операторів значних інвестицій, а по-друге, не забезпечило високої швидкості передачі даних в реальних випадках. Найбільш поширені термінали працюють в режимі GPRS по схемі 4/2(1), тобто 4 тайм-слота на лінії "вниз" і 1 - 2 слоти на лінії "вгору".

Таким чином, пікові швидкості GPRS рівні $4 \times 13,4 = 53,2$ Кбіт/с на лінії "вниз" і 26,8 (13,4) Кбіт/с - на лінії "вгору". В умовах значної завантаженості

мережі GSM голосовим трафіком середня швидкість, яку отримує абонент GPRS, як правило, не перевищує 20÷30 Кбіт/с, особливо в години найбільшого навантаження.

Крім того, зони покриття GPRS при використанні базових станцій діапазону 1800 МГц досить малі, а використання для цієї мети базових станцій діапазону 900 МГц обмежено недостатністю ресурсу (ємністю) цих станцій, який необхідний для передачі голосового трафіку. Впровадження в мережі GSM технології EDGE означає впровадження нової модуляції в радіоканалі між базовою станцією і мобільним терміналом. Для цього потрібно мати EDGE-сумісні передавачі на базових станціях і відповідно телефони, які підтримують EDGE. Більшість комерційно доступних терміналів - двослотові, що при максимальній швидкості в одному EDGE-слоті 59,2 Кбіт/с забезпечує в середньому близько 100 Кбіт/с, тобто ненабагато більше, ніж в мережі IMT-MS 1x (rev. 0).

Переваги використання діапазону 450 МГц

Діапазон 450 МГц, як найбільш низькочастотний з діапазонів, що використовуються для стільникового зв'язку, забезпечує мінімальне загасання на трасі розповсюдження сигналу, що обумовлює максимально можливий радіус дії соти IMT-MS-450.

У поєднанні з іншими перевагами мереж IMT-MS, про які говорилося вище, це дозволяє мати більше в порівнянні з іншими системами загасання на трасі: система cdma2000 має вигреш в бюджеті каналу в порівнянні з системою NMT-450 близько 10 дБ, а в порівнянні з системою GSM - близько 3-4 дБ.

Необхідне число БС різко росте із збільшенням робочої частоти (у 3 рази при використанні діапазону 900 МГц, в 10÷12 раз - для діапазону 1800 МГц і в 15÷16 раз - для діапазону 2100 МГц).

В системі 1x EV-DO передача мови може здійснюватися тільки в режимі VoIP (передача голосу з використанням IP), тоді як в системі EV-DV rev. D забезпечується також передача мови в режимі комутації каналів (режим 1x).

Необхідно відмітити, що із розвитком систем крім основного параметру – швидкості передачі даних - поліпшується ряд інших важливих параметрів, зокрема зменшується час з'єднання, що дозволить реалізувати деякі можливості транкінгових мереж, зокрема груповий зв'язок натисненням однієї кнопки (push-to-talk, РТТ), і підвищити ефективність передачі мови в режимі VoIP. Збільшення швидкості в зворотному каналі разом із зменшенням часу реакції системи істотно розширює можливості надання мультимедійних послуг.

Крім того, необхідно підкреслити, що мережі ІМТ-МС-450 будуються за рахунок використання частини смуги частот в діапазоні 450 МГц, раніше виділеної для мереж стандарту NMT-450.

Виділення додаткових смуг і/або діапазонів частот може бути необхідним надалі при інтенсивному зростанні абонентської бази і необхідності забезпечення високої щільності трафіку. Така ситуація може виникнути в мегаполісах і можливо в містах, що мають більше мільйона жителів.

Завдяки перерахованим перевагам системи ІМТ-МС-450 повинні отримувати і вже набувають все більш широкого поширення в країнах з великими територіями та невисокою щільністю населення. В той же час, ці мережі можуть ефективно використовуватися і в мегаполісах, особливо при виділенні додаткових смуг частот і/або при побудові багаточастотних мереж ІМТ-МС.

В порівнянні з мережами NMT-450 і GSM мережі ІМТ-МС-450 мають наступні основні переваги:

- значно більший радіус дії базових станцій;
- вищу ємність (в розрахунку на базову станцію і на смугу частот);
- можливість високошвидкісної передачі даних в пакетному режимі, яка є основою для організації великого числа різноманітних мультимедійних послуг;
- забезпечення плавного переходу від мереж першого покоління до мереж наступного покоління;
- велику екологічну безпеку.

11. СИСТЕМИ WCDMA FDD

11.1. Концепція побудови

Радіоінтерфейс UMTS FDD являється одним з 5 інтерфейсів покоління 3G. В Європі прийнято проект системи IMT-2000, названий UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), причому в його склад включені два інтерфейси:

- IMT-DS з частотним (FDD) дуплексом;
- IMT-TS з часовим (TDD) дуплексом.

В даному розділі розглядається тільки інтерфейс IMT-DS з FDD.

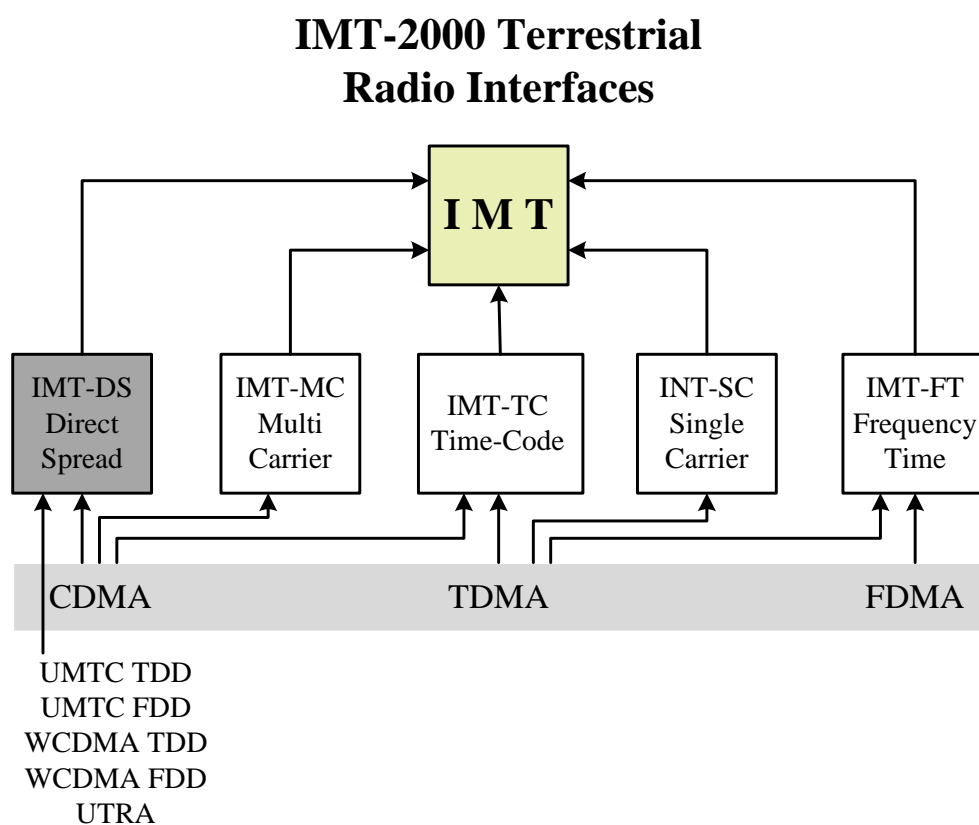


Рис.11.1 Радіоінтерфейси IMT-2000

За рахунок прямого розширення спектру радіосигналу в UMTS ширина його складає 5 МГц (WCDMA - широкопугвий CDMA) [7]. Тому деколи вживаються інші назви згаданого інтерфейсу: UMTS FDD, WCDMA FDD, а

також UTRA FDD (англ. UMTS Terrestrial Radio Access - наземний радіодоступ UMTS) та ін.

Мережа радіодоступу UTRAN характеризується наступними параметрами радіоінтерфейсу, приведеними в таблиці 11.1.

Таблиця 11.1 Параметри радіоінтерфейсу для WCDMA-FDD

Параметри	Опис
Метод багатократного доступу	DS-CDMA
Ширина смуги сигналу, МГц	5 (10/20)
Дуплексна схема	FDD
Чіпова швидкість, Мчп/с	3,84
Рознесення несучих частот, КГц	200
Довжина кадру, мс	10
Довжина суперкадру, мс	720
Кодування даних	Надточне кодування ($R=1/2, 1/3, 1/4$; $K=9$); Турбо-кодування ($R=1/2, 1/3, 1/4$); Каскадне кодування (код Ріда-Соломона)
Перемноження	Міжкадрове і внутрікадрове (10/20/40/80 мс)
Модуляція	Лінія “вниз”: QPSK, лінія “вверх”: BPSK замкнута схема (внутрішній контур, зовнішній контур), відкрита схема
Управління потужністю	Замкнута схема (внутрішній контур, зовнішній контур); відкрита схема
Рознесення	RAKE в базових і рухомих станціях, рознесення антен
Синхронізація базових станцій	Асинхронна (точної синхронізації не потрібно)
Схема пошуку комірок	3 - етапне захоплення по коду

	нескрембльованих символів
Ущільнення послуг	Забезпечення мультислуги в одному з'єднанні
Багатошвидкісна передача	Забезпечується використанням змінного коефіцієнта розширення і мультикода
Хендовер	М'який, напівм'який, міжчастотний і міжсистемний

Функціонально мережу UMTS можна розділити на наступні складові (рис. 11.2):

- Мережу радіодоступу (RAN – Radio Access Network, наземну UMTS RAN - UTRAN), яка виконує всі необхідні функції радіоканалу. В її склад входять базові станції (БС, або Node B), та контролери RNC.
- Базову мережу (Core Network - CN), яка забезпечує комутацію та маршрутизацію викликів. В її склад входять центр комутації мережі MSC/VRL, та сервісний опорний вузол SGSN.
- Канали передачі мовної інформації та даних (зовнішня мережа).
- Обладнання користувача (UE), або абонентські станції АС.

11.2. Радіозв'язок між базовою та абонентськими станціями

Взаємодія між базовими (BTS) та абонентськими станціями (UE) забезпечується за допомогою інтерфейсу Uu (рис. 11.2). В даному розділі розглядаються наступні питання взаємодії між АС та БС:

- характеристики радіоканалу;
- швидкості передачі інформації між БС та окремим АС;
- визначення кількості абонентів, яку може обслужити одна БС;
- ідентифікація абонентів;
- забезпечення завадозахищеності.

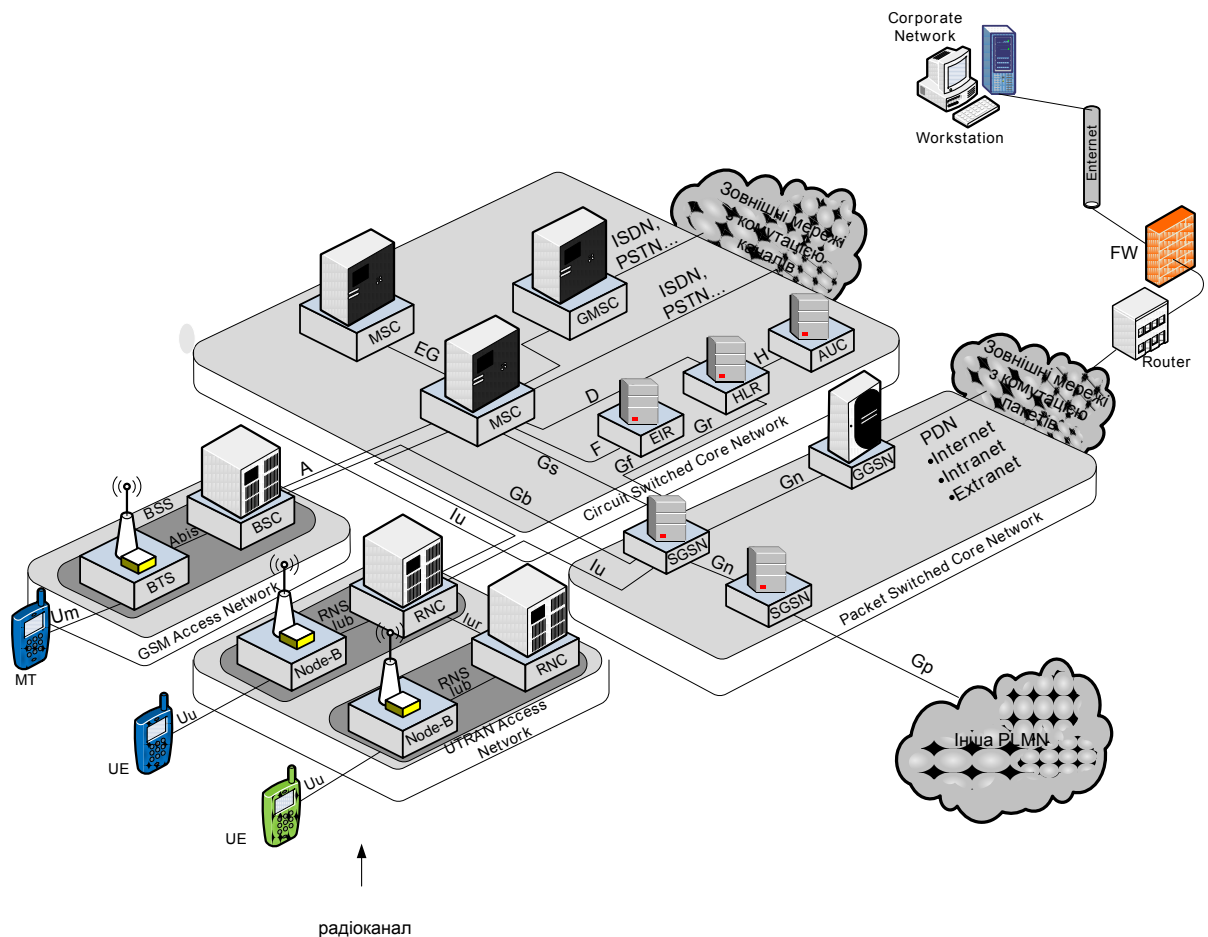


Рис.11.2 Структурна схема мережі WCDMA FDD

Характеристики радіоканалу між БС та АС

Розглянемо характеристики радіоканалу, приведеного на рис. 11.2. З врахуванням даних (таблиці 11.1) основні характеристики каналу приведені на рис. 11.3.

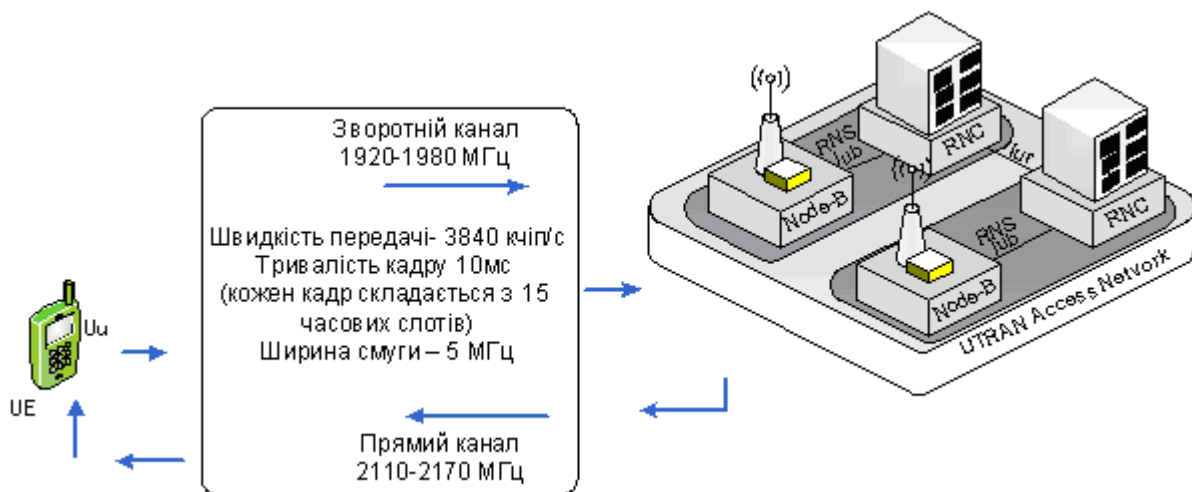


Рис.11.3 Характеристики радіоканалу

Використання дуплексної схеми FDD (п.3 таблиці 11.1) означає, що з метою розділення дуплексних каналів (прямого та зворотного) використовуються різні діапазони частот (1920÷1980 МГц та 2110÷2170 МГц). При цьому в кожному з діапазонів (рис. 11.4) використовується смуга частот 5 МГц (п.2. таблиці 11.1).

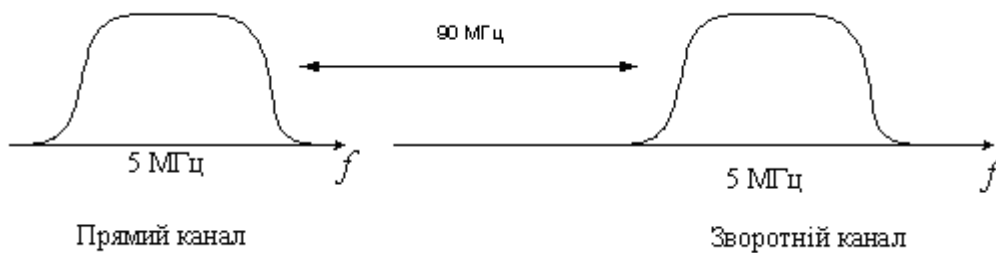


Рис.11.4 Розподіл спектру частот для систем WCDMA FDD

Рознесення несучих частот становить 0,2 МГц (п.5 таблиці 11.1). В прямому каналі (п.9 таблиці 11.1) використовується QPSK модуляція, яка збільшує швидкість передачі інформації в 2 рази (кожен символ передає два біти інформації), а в зворотному каналі - BPSK модуляція, яка не збільшує швидкість передачі інформації. Передача сигналів між BTS та UE здійснюється у вигляді послідовності кадрів, тривалістю 10 мс, причому можливе також формування суперкадру, тривалістю 720 мс (п.6. таблиці 11.1).

Між BTS та UE повинні передаватись біти інформації з певною швидкістю біт/с. Реально замість бітів інформації передаються символи (або чіпи) з швидкістю символ/с (або чіп/с). Кількість символів в загальному випадку відрізняється від кількості бітів інформації. Очевидно, якщо кількість символів більша за кількість інформаційних бітів, то швидкість передачі останніх буде меншою за швидкість передачі символів. Швидкість передачі чіпів становить 3,84 Мчіп/с (п.4 таблиці 11.1). Чіпова швидкість залежить від ширини смуги частот сигналу (5 МГц, таблиця 11.1) і чисельно повинна бути рівною значенню ширини смуги (значення $3,84 \cdot 10^6$ співрозмірне з значенням $5 \cdot 10^6$).

Зміна кількості абонентів, швидкості передачі інформації можлива після закінчення кожного кадру, тобто не частіше 10 мс.

Забезпечення швидкостей передачі

Як вказано вище, швидкість передачі між BTS та UE може становити 3840 Кбіт/с. Але реально абоненти поділяються на різні рівні. Формування рівнів можна представити у вигляді дерева (рис. 11.5). Кількість абонентів (або коефіцієнт розширення спектру) N_m на кожному рівні визначається наступним чином:

$$N_m = 2^{m-1} \quad (11.1)$$

де m – номер рівня.

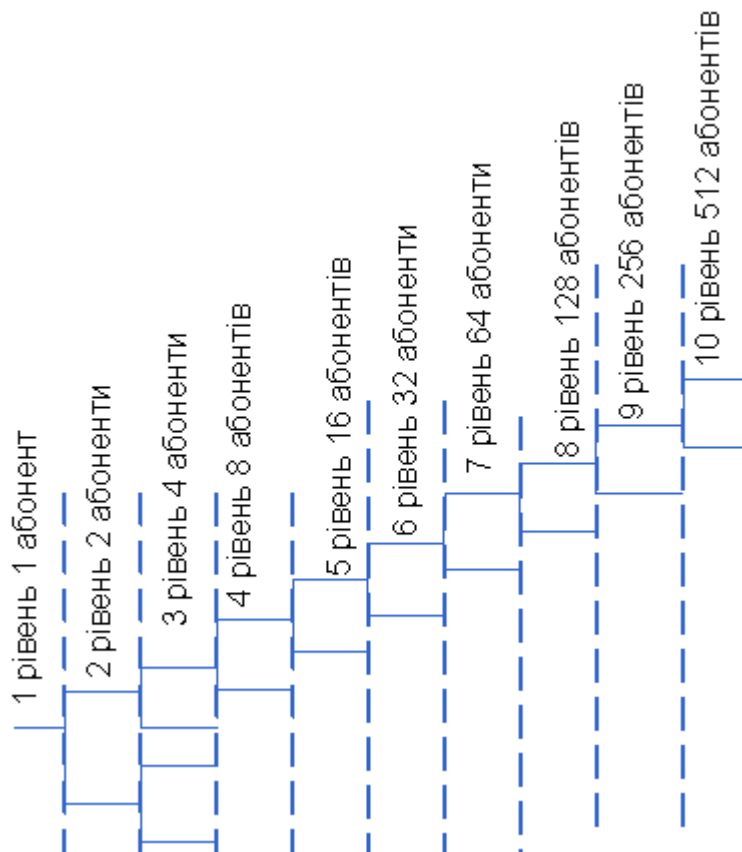


Рис.11.5 Поділ абонентів на рівні

В прямому каналі зв'язку використовується 8 рівнів (від 3-го до 10-го

рівня), тобто кількість абонентів буде становити від 4 до 512 абонентів. Аналогічно, в зворотному каналі зв'язку використовується 7 рівнів (від 3-го до 9-го рівня), тобто кількість абонентів буде становити від 4 до 256 абонентів.

Якщо швидкість передачі розділити порівну між всіма абонентами одного рівня, то швидкість передачі V_m для абонента m -го рівня буде становити:

$$V_m = \frac{3840}{N_m} \text{ (Кбіт/с)} \quad (11.2)$$

З врахуванням залежності (11.2) в таблиці 11.2 приведені теоретичні значення швидкостей передачі для різних коефіцієнтів розширення (або для різної кількості абонентів).

Таблиця 11.2 Швидкість передачі символів

Коефіцієнт розширення	Швидкість передачі символів ($\times 10^3$ символ/с)
512	7.5
256	15
128	30
64	60
32	120
16	240
8	480
4	960
4 при 3 паралельних кодах	2880

Примітка. Базова станція може надати одному користувачі декілька, до 6, паралельних кодованих каналів (в таблиці 11.2 приведені дані для 3-х паралельних кодованих каналів).

Зауважимо, що в системі можуть бути одночасно на зв'язку абоненти

різних рівнів, але для них повинна виконуватись умова:

- сума наданих швидкостей всіх рівнів не повинна перевищувати 3840 Кбіт/с;
- сума наданих швидкостей на кожному рівні визначається за формулою:

$$S_m = N_m \cdot V_m \quad (11.3)$$

Після закінчення тривалості кадру абонент, при необхідності, може пересуватись деревом рівнів (рис. 11.5). Наприклад, в прямому каналі системи може бути один абонент 3 рівня з наданою швидкістю 960 Кбіт/с та 192 абоненти 9 рівня з наданою кожному швидкістю передачі 15 Кбіт/с.

Виділені фізичні канали

Перед визначенням швидкостей передачі в прямому та зворотному каналах необхідно попередньо розглянути деякі канали системи, які визначають швидкості передачі трафіку [8].

Фізичні канали являються середовищем передачі всіх повідомлень між АС та БС. Розрізняють два типи фізичних каналів:

- загальні, які доступні в обслуговуваній комірці багатьом АС та через які передаються короткі пакети даних;
- виділені канали, які використовуються тільки одною АС та призначені для передачі довгих пакетів даних.

До виділених фізичних каналів відносяться:

- Канал передачі даних DPDCH.
- Канал управління DPCCCH.

На рис. 11.6 приведено канали, призначені для передачі довгих пакетів даних в прямому каналі.

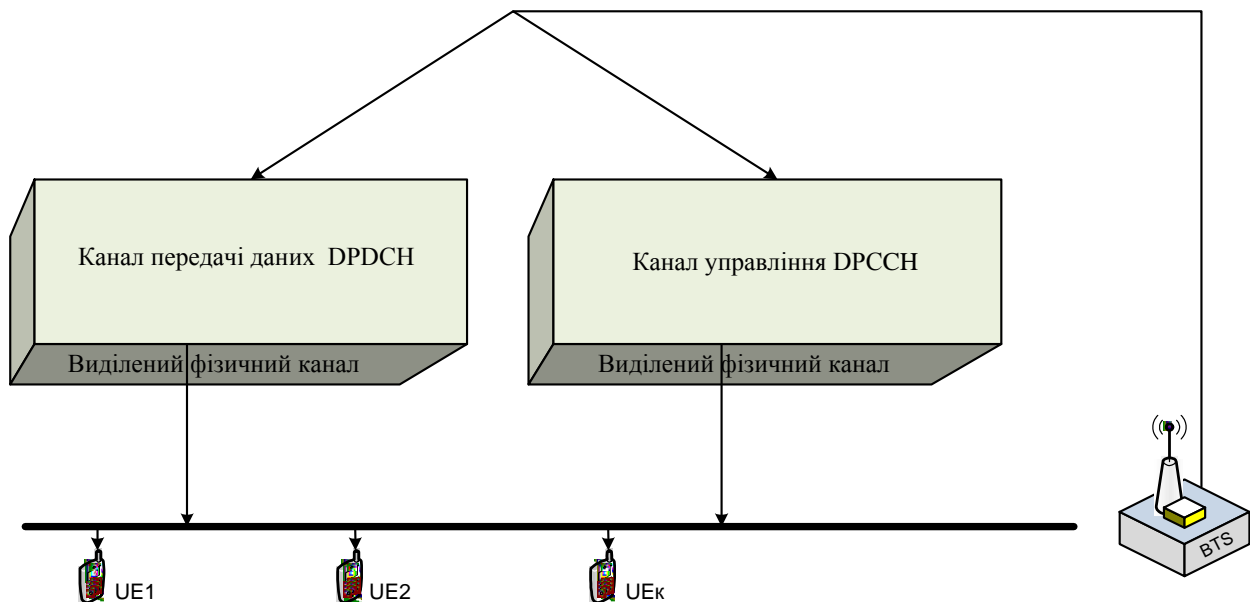


Рис.11.6 Передача даних в прямому каналі

Швидкість передачі в прямому каналі з врахуванням кодування

В прямому каналі використовується кодер з певною швидкістю кодування (найбільш часто використовується кодер із швидкістю $\frac{1}{2}$). При використанні такого кодера швидкість передачі корисної інформації зменшиться в два рази, порівняно з швидкістю передачі символів. В результаті, з врахуванням даних таблиці 11.2, в таблиці 11.3 приведені значення швидкості передачі даних в прямому фізичному каналі.

Таблиця 11.3 Швидкість передачі даних в прямому каналі, канал DPDCH

Коефіцієнт розширення в каналі DPDCH	Швидкість передачі даних в каналі DPDCH Кбіт/с	Максимальна швидкість передачі даних користувача при швидкості кодування $\frac{1}{2}$ (наближено), Кбіт/с
256	15	7,5
128	30	15
64	60	30
32	120	60
16	240	120
8	480	240

4	960	480
4, з 6 паралельними кодами	5740	2300

Якщо необхідні більш високі швидкості передачі, то використовуються паралельні кодові канали. Система дозволяє використовувати до 6 кодів паралельно, збільшуючи швидкість передачі даних в каналі до 5740 Кбіт/с. Тому, можна забезпечити передачу даних користувача з швидкістю 2 Мбіт/с, навіть після повторення передачі.

Швидкість передачі в зворотному каналі з врахуванням кодування та модуляції

З точки зору визначення швидкості передачі зворотній канал має дві основні відмінності порівняно з прямим каналом:

- коефіцієнти розширення знаходяться в межах від 4 до 512;
- використовується QPSK модуляція, яка приводить до збільшення швидкості передачі даних користувача в 2 рази порівняно з BPSK модуляцією.

З врахуванням згаданих відмінностей в таблиці 11.4 приведені швидкості передачі при їх наближеному визначенні.

Таблиця 11.4 Швидкість передачі символів і бітів в зворотному каналі

Коефіцієнт розширення	Швидкість передачі символів в каналі Кбіт/с	Швидкість передачі біт, Кбіт/с	Діапазон швидкостей в каналі DPDCH, Кбіт/с	Максимальна швидкість передачі даних користувача при кодуванні із швидкістю $\frac{1}{2}$, Кбіт/с
-----------------------	---	--------------------------------	--	--

512	7,5	15	3...6	1...3
256	15	30	12...24	6...12
128	30	60	42...51	20...24
64	60	120	90	45
32	120	240	210	105
16	240	480	432	215
8	480	960	912	456
4	960	1920	1872	936
4 при 3 паралельних кодах	2880	5760	5616	2300

Бачимо, що в зворотному каналі також може використовуватись декілька кодів паралельно, з метою збільшення швидкості передачі.

Примітка. Швидкість в стовпці 4 менша за швидкість в стовпці 3 за рахунок наявності додаткових “службових” бітів, які зменшують швидкість передачі корисної інформації.

Кількість абонентів, обслуговуваних однією БС

Кількість абонентів рівна коефіцієнту розширення (11.1). Тобто, для прямого каналу одна БС може одночасно обслужити від 4 до 256 абонентів (таблиця 11.3), надаючи їм відповідні швидкості передачі інформації (від 480 Кбіт/с до 7,5 Кбіт/с). Чим вищий номер m рівня розташування абонента, тим кількість абонентів більша, їхня швидкість передачі стає меншою. Аналогічно для зворотного каналу одна BTS може одночасно обслужити від 4 до 512 абонентів (таблиця 11.4), надаючи їм відповідні швидкості передачі інформації (від 936 Кбіт/с до $1\div 3$ Кбіт/с).

Отримані результати швидкостей передачі корисної інформації та кількості абонентів приведені на рис. 11.7.

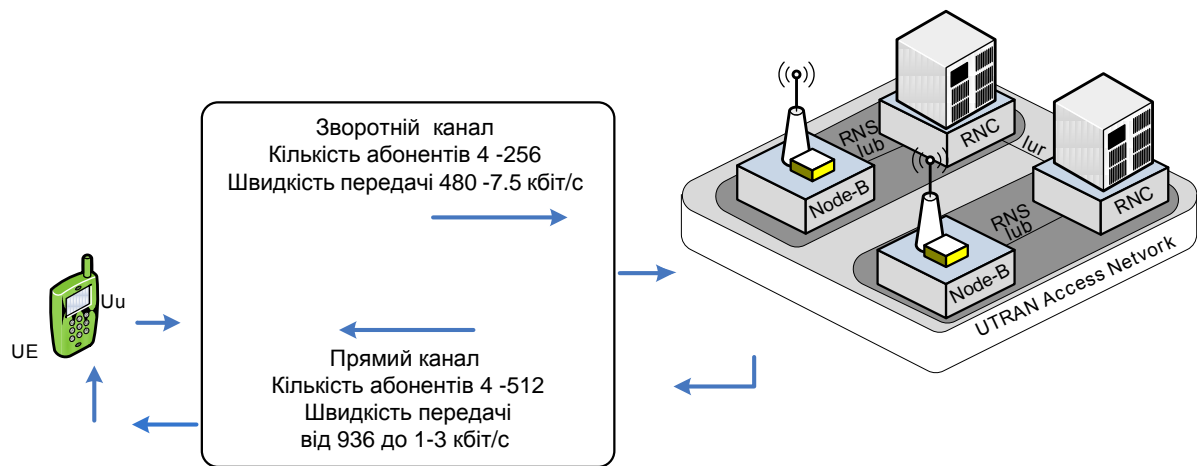


Рис.11.7 Кількість абонентів та швидкість передачі даних користувача

Принципи ідентифікації абонентів

Розглянемо, як здійснюється передача даних, призначених для будь-якого з абонентів (наприклад, абонента 1) від базової станції до даного абонента (рис. 11.8).

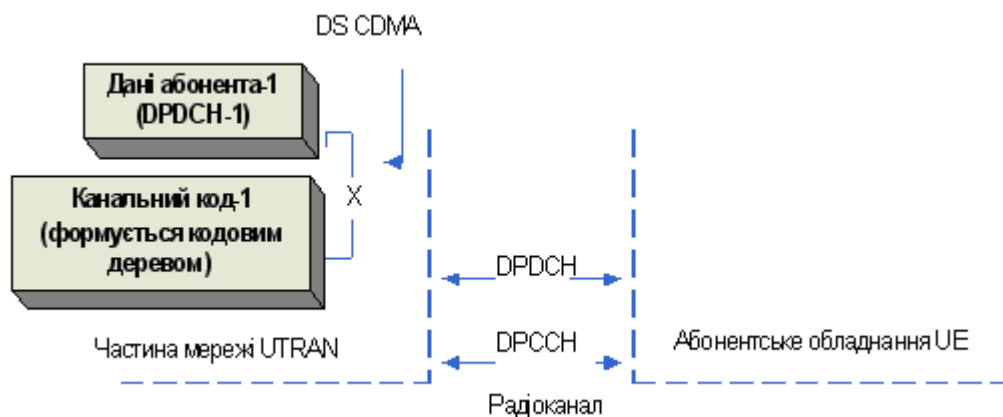


Рис.11.8 Ідентифікація абонентів

На базовій станції до даних, призначених для абонента 1, вноситься каналний код-1, властивий тільки абоненту 1. Отримані таким чином сигнали від усіх абонентів сумуються, причому до отриманого сумарного сигналу вноситься код скремблювання даної базової станції (наприклад, BTS-1). Таке формування сигналу на BTS здійснюється у вигляді послідовних кадрів, тривалістю 10 мс, причому можливе також формування суперкадру, тривалістю

720 мс (п.6. таблиці 11.1). Далі, отриманий сигнал передається антеною в зону обслуговування BTS-1. На приймальному кінці, на основі відомого коду скремблювання, здійснюється дескремблювання. Далі, аналогічно, на основі відомого каналного коду-1, з сумарних даних усіх абонентів виділяються тільки дані потрібного абонента 1. Таким чином, в загальному, розглянуто передачу даних для потрібного абонента (ідентифікацію каналу) в мережі.

Отже, характерною особливістю технології WCDMA являється кодове розділення каналів (абонентів) в загальній частотно-часовій області. При цьому використовується метод прямого розширення спектру DS-SS, який передбачає (рис. 11.10) перемноження даних (інформації) на каналний (розширюючий) код. Для ідентифікації каналів застосовуються каналні (каналноутворюючі) коди з спеціальними властивостями, які забезпечують їх ефективне “розпізнавання”, або розділюваність. Такі властивості забезпечуються ортогональними кодами.

Для забезпечення ідентифікації базових станцій (комірки, сектору) також застосовуються так звані коди скремблювання. В кожній комірці використовується один код скремблювання, як її ідентифікатор. В кожному коді скремблювання наявна група каналноутворюючих кодів. Важливо також відмітити, що в цілому для кодового розділення каналів в широкій смузі частот в технології WCDMA використовується один код розширення, який визначається наступним чином:

код розширення = код скремблювання × каналноутворюючий код.

Тобто, якщо каналноутворюючі коди не використовуються - коду розширення відповідає код скремблювання.

Формування каналних кодів

Кожному абоненту будь-якого рівня (рис. 11.5) треба надати свій

індивідуальний код доступу до системи. Такими кодами в технології UMTS є каналні коди.

В технології UMTS здійснюється розширення спектру радіосигналу з перемінним коефіцієнтом OVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor). Що приводить до необхідності використання при передачі даних каналоутворюючих кодів різної довжини і забезпечує адаптацію системи до різних швидкостей їх передачі. Каналоутворюючими кодами являються коди OVSF, які забезпечують ортогональність між різними фізичними каналами користувачів. Каналоутворюючі коди однозначно визначаються у вигляді $C_{SF,k}$, де SF – коефіцієнт розширення коду, k – номер коду $0 < k < SF-1$ і формуються у відповідності з кодовим деревом, показаним на рис. 11.9, та відповідають матриці Адамара в дещо іншому виді представлення.

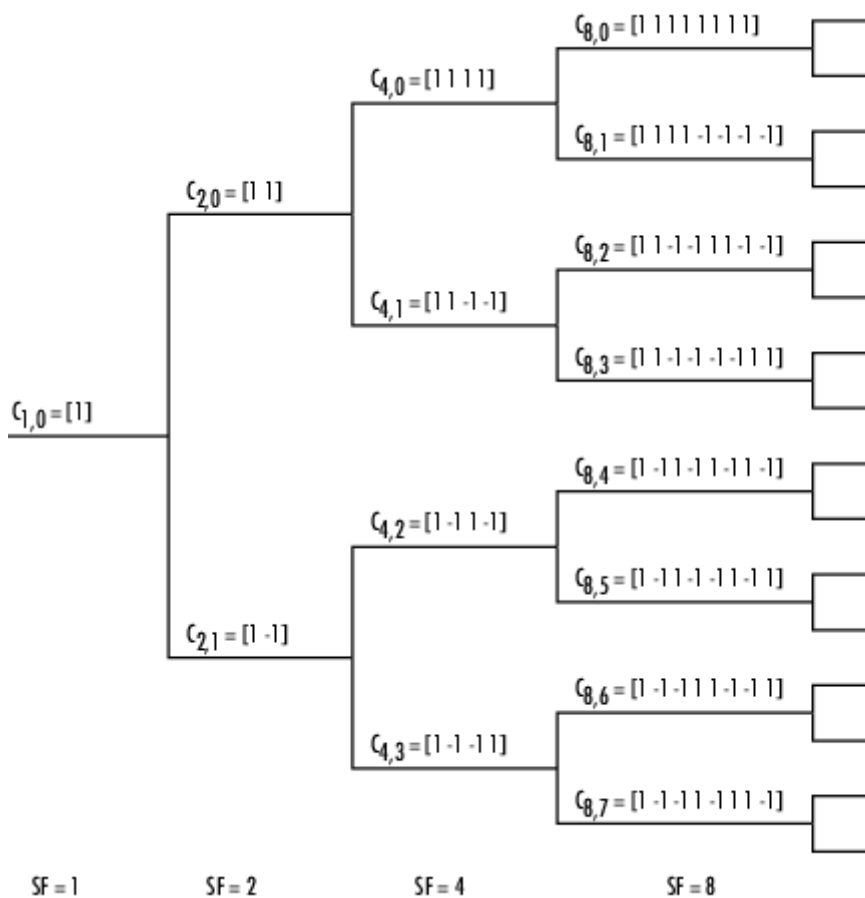


Рис.11.9 Дерево каналоутворюючих кодів

Кожен рівень кодового дерева визначає кодові слова довжиною $SF=2^n$. В

прямому каналі використовується 8 рівнів (від 3-го до 10-го рівня), що відповідає коефіцієнту розширення SF від 4 до 512. Аналогічно, для зворотного каналу використовується 7 рівнів (від 3-го до 9-го рівня), що відповідає коефіцієнту розширення SF від 4 до 256.

Таким чином, ансамбль кодів OVVSF не являється фіксованим і залежить від коефіцієнту розширення SF, тобто від швидкості передачі в каналі.

Важливо відмітити, що не всі кодові слова з розглянутого дерева можуть бути одночасно використані в одній і тій же комірці. Код не може бути вибраним для використання, якщо на шляху від нього до кореня дерева існує хоча би один вже використаний код. Таке обмеження забезпечує ортогональність кодів. В загальному випадку для кодового дерева встановлено чітке правило: якщо користувачу, наприклад, виділено код 8.0, то другим користувачам заборонено займати будь-які коди справа, оскільки вони втрачають властивість ортогональності. Теоретично можна мати одного “великого абонента АС - з великою швидкістю передачі” на коді 8.0 та 192 “малих абонентів АС - з малою швидкістю передачі” на кодах 256.64 – 256.255. Важливою особливістю являється можливість “пересування” користувачів вправо і вліво вздовж кодового дерева з швидкістю 10 мс, що забезпечує дуже гнучку організацію фізичних каналів.

На основі даних, приведених в таблиці 11.3, таблиці 11.4 можна зробити наступні висновки:

- в прямому каналі коди OVVSF дозволяють забезпечити теоретично 4 користувачів з високою швидкістю передачі, 512 користувачів з низькою швидкістю передачі, або будь-яку їх комбінацію згідно даних приведених в таблиці 11.3 (крім того базова станція може надати одному користувачі декілька, до 6 паралельних кодованих каналів);
- в зворотному каналі коди OVVSF дозволяють забезпечити теоретично 4 користувачів з високою швидкістю передачі, 256 користувачів з низькою швидкістю передачі, або будь-яку їх комбінацію згідно даних приведених

в таблиці 11.4 (крім того абонентська станція може аналогічно надати одночасно користувачеві декілька, до 6, паралельних кодованих каналів).

Призначення та типи скремблюючих кодів

Коди скремблювання використовуються, як в прямому, так і в зворотному каналах. В останньому випадку цей код призначається для розділення користувачів (абонентських терміналів), тобто використовується як каналоутворюючий код. Скремблюючі коди повторюються в кожному 10-мілісекундному кадрі. Порівняння за призначенням каналоутворюючих та скремблюючих кодів приведено в таблиці 11.5.

Таблиця 11.5 Порівняння каналоутворюючих та скремблюючих кодів

Порівняння показників	Каналоутворюючий код	Код скремблювання
Використання	Лінія “вверх”: розділення каналів DPDCH і DPSSCH одного користувача. Лінії “вниз”: розділення каналів передачі даних до різних користувачів в одній соті	Лінія “вверх”: розділення користувачів. Лінія “вниз”: розділення БС (сот, сектора)
Довжина	Лінія “вверх”: 4...256 елементів. Лінії “вниз”: 4...512 елементів	Лінія “вверх”: 38400 елементів (чіпа) на часовому інтервалі 10 мс (довгий код) або 265 елементів на часовому інтервалі 66,7 мс (короткий код). Лінія “вниз”: 38400 елементів на часовому інтервалі 10 мс
Число кодів	Число кодів під одним скремблюючим кодом	Лінія “вверх”: декілька мільйонів. Лінія “вниз”: 512

	рівне коефіцієнту розширення SF	
Сімейство кодів	Ортогональний код із змінним коефіцієнтом розширення (OVSF)	Довгі коди: 10 мс “Золоті” коди. Короткі коди: сімейство розширених S(2) кодів
Розширення	Збільшує ширину смуги сигналу	Не впливає на ширину смуги сигналу

В прямому каналі можуть бути використані два типи скремблюючих кодів:

- короткі коди у вигляді комплексних послідовностей $C_s = C_i + j \cdot C_g$, де C_i, C_g - розширені коди Касамі, кожен довжиною 256 символів;
- довгі коди, в яких послідовності $C_s = C_i + j \cdot C_g$, представляють собою фрагменти коду Голда довжиною 40960 символів (їх використовують для розділення базових станцій, або секторів).

В зворотному каналі може бути сформовано всього $2^{18} - 1 = 262143$ кодів скремблювання, але не всі з них використовуються. Коди розділені на 512 груп в кожній з яких наявний первинний код скремблювання та 15 вторинних кодів.

Первинні коди містять $n = 10 \cdot i$ кодів, де $i = 0 \dots 511$; i -а група вторинних кодів складається з кодів $16 \cdot i + k$, де $k = 1 \dots 15$. Між кожним первинним кодом i 16 вторинними кодами встановлена однозначна відповідність. Отже, наявні $k = 0, 1, \dots, 8191$ кодів скремблювання. Група первинних скремблюючих кодів, в свою чергу, ділиться на 64 кодові групи, кожна з яких складається з 8 первинних кодів скремблювання. J -та група кодів скремблювання визначається наступним чином: $168 \cdot j + 16 \cdot k$, де $j = 0, i, k = 0, \dots, 7$.

Як вказувалось раніше, кожній комірці відводиться тільки один первинний код скремблювання, який використовується в загальному фізичному каналі управління. Таким чином, передачу через інші фізичні канали в лінії “вниз” можна здійснювати або з первинним скремблюючим кодом, або з вторинним кодом з групи, що відповідає первинному кодові даної комірки. Допускається

використання первинних і вторинних скремблюючих кодів для одного кодованого складного транспортного каналу. Дані кожного абонента поступають від транспортного каналу після відповідної обробки (кодування, мультиплексування). Згадана обробка розглядається в наступному розділі.

11.3. Формування кодованого потоку даних

Дані, які поступають на БС від зовнішніх мереж, наприклад телефонної лінії, попередньо формуються в кодований потік даних. Отриманий кодований потік передається через прямий канал до АС. Аналогічні процеси здійснюється в АС, при формуванні кодованого потоку для передачі через зворотний канал.

Повна процедура формування кодованого потоку даних містить декілька етапів (рис. 11.10):

- каналне (завадостійке) кодування;
- узгодження швидкостей;
- міжкадрове переплітання;
- мультиплексування окремих каналів.

Формування кодованого потоку даних в каналі “вверх”

Після отримання транспортного блоку від вищого рівня (рис. 11.11) виконується перша операція кодування надлишковим циклічним кодом (приєднується CRC). Перевірочна комбінація коду (CRC) використовується для перевірки на помилки в транспортних блоках на приймальному кінці. Довжина CRC має чотири різні значення: 8, 12, 16 и 24 біт. Фізичний рівень здійснює індикацію помилок при перевірці з допомогою CRC при доставці транспортного блоку на високий рівень.

Після приєднання CRC транспортні блоки зчіплюються разом, або сегментуються на різні кодові блоки в залежності від того, чи відповідає розмір транспортного блоку наявному розміру кодового блоку (кової комбінації).

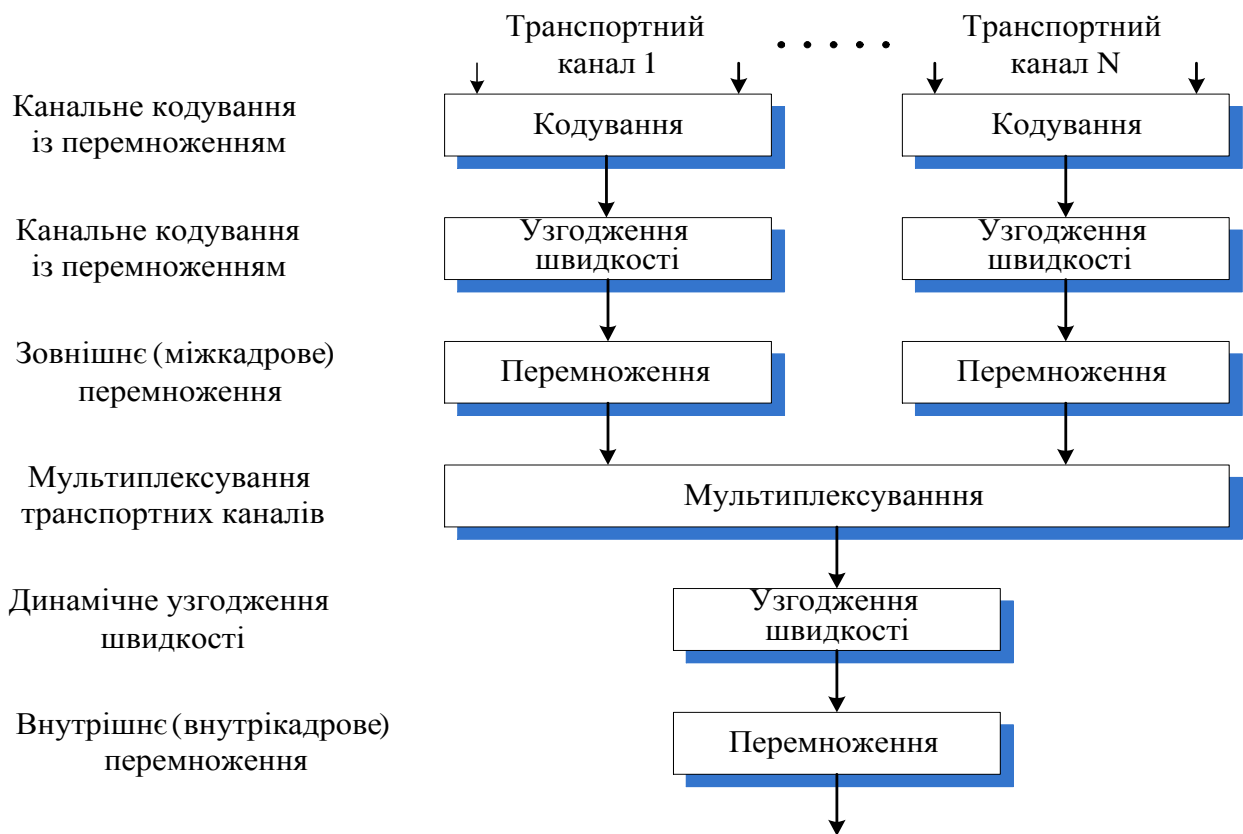


Рис.11.10 Формування кодованого потоку даних

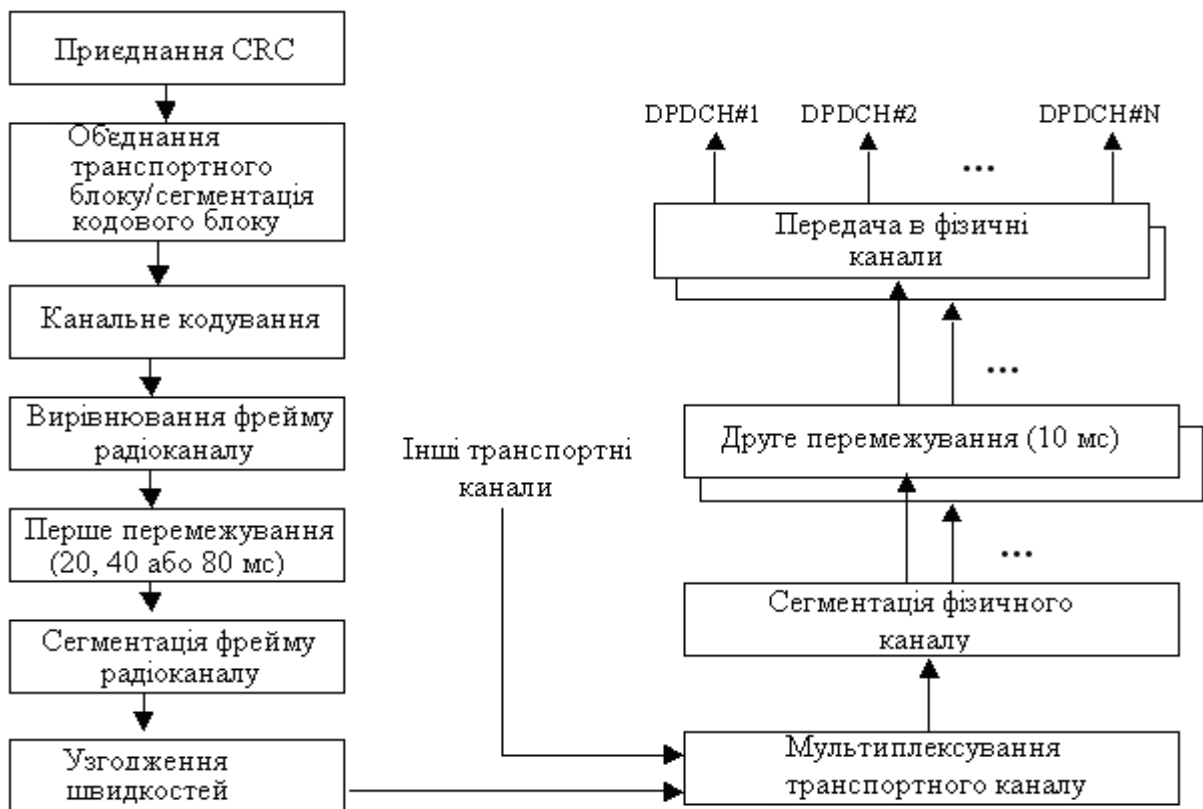


Рис.11.11 Мультиплексування в каналі “вверх” і послідовність каналного кодування.

Якщо розмір транспортного блоку з приєднаним CRC не відповідає розміру максимального наявного кодового блоку, він буде розділений на декілька кодових блоків.

Канальне кодування проводиться на кодових блоках після операції приєднання або сегментації. Для деяких послуг, або бітових класів канальне кодування не застосовується (мовні дані з кодексу AMR). В цьому випадку обмеження розміру кодового блоку відсутнє, оскільки фактичного ніякого кодування на фізичному рівні не виконується.

Функція вирівнювання фреймів радіосигналу призначена для того, щоб поділити дані на рівні блоки при їх передачі більш, ніж в одному фреймі радіосигналу тривалістю 10 мс. Ця операція здійснюється шляхом доповнення необхідного числа бітів до даних для отримання блоків однакового розміру на кадр.

Перше перемішування, або міжфреймове перемішування використовується тоді, коли бюджет по затримці дозволяє мати перемішування тривалістю більше 10 мс. Тривалість першого перемішування між рівнями визначена величинами 20, 40 і 80 мс.

Узгодження швидкостей досягається або шляхом проріджування, або шляхом повторення символів. При цьому враховується число бітів, які поступають з інших транспортних каналів, що являються активними в даному кадрі. Узгодження швидкостей у низхідному каналі являється динамічною процедурою, яка змінюється від кадру до кадру (через 10 мс).

Різні транспортні канали мультиплексуються разом з допомогою операції мультиплексування транспортних каналів. Це просте послідовне мультиплексування за принципом кадр за кадром. У випадку, коли використовується більше, ніж один фізичний канал (код розширення спектру), застосовується сегментація. Під час виконання цієї операції просто проводиться ділення даних порівну по наявних кодах розширення спектру.

Друге (внутрішньокадрове) застосовується окремо для кожного фізичного каналу в тому випадку, якщо використовується більш ніж один кодовий канал.

Кількість бітів, які передаються у фізичний канал на цьому етапі, точно відповідає кількості бітів, які можуть передаватися при коефіцієнті розширення даного часового кадру.

Формування кодованого потоку даних в каналі “вниз”

Послідовність операцій при мультиплексуванні в низхідному каналі багато в чому подібна на послідовність операцій у висхідному каналі, але має ряд відмінностей в порядку виконання узгодження швидкостей і сегментації (рис. 11.12).

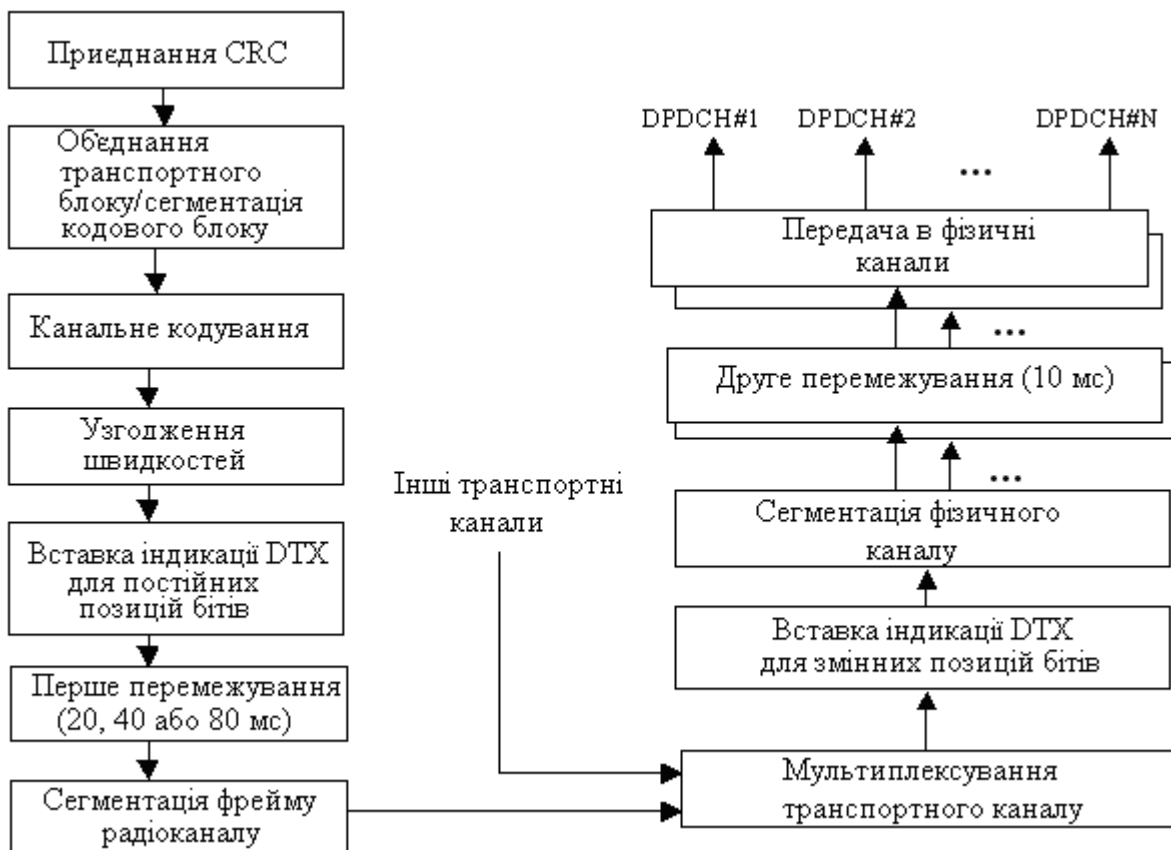


Рис.11.12 Послідовність мультиплексування та каналного кодування в низхідному каналі

Введення індикації передачі з перериванням (DTX) встановлює, які бітові позиції використовуються в кадрі (фіксовані, або гнучкі). Причому, біти індикації DTX через радіоканал не передаються і лише вводяться для

інформування передавача, на якій бітовій позиції його необхідно вимикати (в паузах). Вони не потрібні на лінії “вверх”, де узгодження швидкості здійснюється більш оперативно, завжди заповнюючи кадри, коли є дані, призначені для передачі через канал DPDCH. Застосування фіксованих позицій означає, що для даного транспортного каналу завжди використовуються одні і ті ж символи (позиції).

Формування кодованого потоку даних в суміщеному каналі

Передача даних з максимальною швидкістю для циклу з низькою активністю в низхідному каналі швидко приводить до того, що коди передачі під одним кодом скремблювання починають швидко витратитися. Щоб уникнути цієї проблеми існує два варіанти: використовувати додаткові коди скремблювання, або загальні канали. Підхід з використанням додаткових кодів скремблювання приводить до втрати переваги - передачі від одного джерела є ортогональними. Використання ресурсу суміщених каналів зберігає вищезазвану перевагу і в той же час приводить до зменшення витрати кодових ресурсів в низхідному каналі. Оскільки таке сумісне використання ресурсів не може дати 100% гарантій наявності ресурсу фізичних каналів у будь-який момент часу, його застосування на практиці обмежується послугами з передачі пакетів даних.

З метою забезпечення неперервної передачі інформації про управління потужністю випромінювання в UTRAN визначено, що суміщений низхідний канал DSCH завжди використовується разом з виділеним низхідним каналом DCH. Крім інформації про управління потужністю DCH забезпечує вказівку терміналу, коли йому слід декодувати DSCH і який код розширення застосовувати при цьому. В даному випадку можливі два варіанти: або TFCI фрейм за фреймом, або сигналізація високого рівня, яка базується на тривалішому періоді призначення. Особливістю при цьому являється те, що не забезпечується підтримування коефіцієнту розширення рівного 512.

У низхідному каналі DSCH користувачеві можуть бути призначені різні

швидкості передачі даних, (які змінюються від кадру до кадру) наприклад 384 Кбіт/с з коефіцієнтом розширення 8, а потім 192 Кбіт/с з коефіцієнтом розширення 16. Канал DSCH може бути також використаний для мультикодової передачі пакетів. Наприклад, три коди з коефіцієнтом розширення 4 забезпечують можливість передачі даних в каналі DSCH з швидкістю 2 Мбіт/с.

Узгодження швидкостей пакетної передачі даних

Як було вказано раніше при мультиплексуванні пакетних даних в мережі UTRAN вимагається узгодження змінної швидкості мультиплексованого потоку з швидкістю передачі даних в фізичному каналі [7]. Розрізняють два види узгодження швидкостей:

- статичний;
- динамічний.

Статичне узгодження використовується для змінити швидкість кодованого транспортного каналу таким чином, щоб виконувались задані вимоги щодо якості обслуговування та при цьому витрачались мінімальні ресурси системи. Необхідно відмітити, що хоча статичне узгодження швидкостей завжди здійснюється перед операцією мультиплексування транспортних каналів, швидкості в різних транспортних каналах повинні бути взаємопов'язані (узгоджені). Якщо швидкості джерел повідомлень перевищують максимальну швидкість транспортного каналу, то необхідне узгодження швидкостей.

В каналі “вниз” статичне узгодження швидкостей використовується для можливого зменшення швидкості передачі потоку даних до швидкості в найближчому фізичному каналі, який розташований нижче (одразу ж після підвищенням коефіцієнту розширення), уникаючи тим самим надлишкового розподілу ортогональних кодів та зменшуючи ризик обмеження пропускнуої здатності через дефіцит кодів на лінії “вниз”. Статичне узгодження швидкості

використовується для паралельних транспортних каналів таким чином, щоб транспортний канал задовольняв вимоги щодо якості передачі при орієнтовно, однаковому відношенні сигнал/завада (SIR) в каналі, тобто статичне узгодження швидкості також виконує функцію узгодження SIR.

Технічно статичне узгодження швидкостей реалізується шляхом періодичного виключення кожного j -го символу та n -го повторення символів. Використовується достатньо рідко, переважно кожен раз, коли транспортний канал додається до мережі, або вимикається.

Динамічне узгодження каналів здійснюється після операції мультиплексування і дозволяє узгодити миттєву швидкість групового транспортного каналу з пропускною здатністю фізичного каналу. Виконується в кожному кадрі тривалістю 10 мс з повторенням символів таким чином, щоб миттєва бітова швидкість транспортного каналу точно співпала з бітовою швидкістю фізичного каналу. Динамічне узгодження швидкостей застосовується тільки на лінії “вверх”. На лінії “вниз” використовується передача з перериванням в кожному слоті, коли миттєва швидкість транспортного каналу точно не співпадає з бітовою швидкістю фізичного каналу.

Розподілення пакетів в мережі UTRAN

Функція розподілу пакетів полягає в сумісному використанні наявної пропускної здатності радіоінтерфейсу всіма користувачами. Розподіл пакетів в мережі UTRAN здійснює розподільувач пакетів (PS), який міститься в контролері RNC, де розподіл може ефективно збільшуватись для множини комірок з врахуванням з'єднань при м'якому передаванні управління. Розподільувач пакетів може вирішувати проблему, пов'язану з призначенням швидкостей передачі даних і тривалістю призначення користувачу ресурсу мережі. До його функцій відносяться такі:

- розподіл наявної пропускної здатності радіоінтерфейсу між джерелами/

отримувачами даних;

- рішення про використання відповідного транспортного каналу для передачі даних кожного користувача;
- контроль за розподілом пакетів і навантаженням мережі в цілому.

Розподіл пакетів даних дозволяє каналам-носіям в нереальному часі динамічно використовувати загальні, виділені та сумісно використовувані канали. При цьому призначається швидкість для каналу-носія i , як правило, змінюється під час активного з'єднання. Якщо навантаження перевищує задане значення, розподілювач пакетів може зменшувати його шляхом зменшення швидкостей передавання в пакетних каналах-носіях; якщо ж навантаження менше, ніж задане значення, він може збільшувати його шляхом виділення більшого ресурсу мережі для даного каналу.

Розділення (ущільнення) каналів

Виділення більшого ресурсу мережі для даного каналу в UTRAN можна здійснити двома способами (рис. 11.13):

- за допомогою кодового розділення;
- за допомогою часового розділення.

Кодове ущільнення. При кодовому ущільненні всім користувачам при необхідності надається канал, швидкість передачі даних в якому при наявності декількох користувачів нижча, порівняно з часовим ущільненням, якщо наявні декілька користувачів пакетної передачі, які вимагають для себе пропускну здатність. Затримки при встановленні та завершенні з'єднань спричиняють менші втрати пропускну здатності внаслідок більш низької швидкості передачі даних та більш тривалого часу передачі.



Рис.11.13 Розділення каналів: а) кодове, б) часове

Розподіл пакетів при кодовому ущільненні може бути статичним, або динамічним. При статичному розподілі призначена швидкість підтримується фіксованою на протязі всього сеансу. Такий спосіб подібний до з'єднання з комутацією каналів і потребує точної оцінки призначеної швидкості передачі. Для точного визначення необхідної швидкості передачі при нерівномірному та важко прогнозованому пакетному трафіку необхідні буфери пам'яті з великою ємністю. В багатьох випадках такий підхід являється нераціональним і необхідний спосіб забезпечення зміни (збільшення або зменшення) вже призначеної швидкості передачі, тобто спосіб динамічного кодового ущільнення. Така зміна швидкості передачі може базуватися на результатах оцінки кількості даних в буфері пам'яті. В таблиці 11.6 приведено порівняння розподілу пакетів даних при розглянутих способах їх ущільнення.

Часове ущільнення. Велика кількість користувачів може мати одночасно канал з низькою швидкістю передачі. Коли число користувачів, які бажають скористатися пропускнуою здатністю мережі зростає - швидкість передачі кожного користувача зменшується. При плануванні з часовим розділенням пропускна здатність забезпечується для одного користувача, або лише для декількох користувачів в кожен момент часу. Таким чином, користувач може мати дуже високу швидкість передачі, але може скористатися нею тільки в

короткий проміжок часу (протягом тривалості кадру, рівної 10 мс). Коли число користувачів збільшується при часовому ущільненні, кожен користувач повинен стояти в черзі на обслуговування більш тривалий час.

При визначенні швидкості передачі пакетних даних користувача, розподілювач пакетів враховує якість радіозв'язку. Високі швидкості передачі даних в UTRAN переважно вимагають менших енергетичних затрат на біт передачі, виражених у вигляді відношення сигнал/шум E_b/N_0 на вході приймача. Тому розподіл пакетних даних з часовим ущільненням має перевагу в сенсі отримання більш низьких значень необхідного відношення E_b/N_0 порівняно з кодовим ущільненням.

Таблиця 11.6 Порівняння розподілу пакетів даних при різних способах ущільнення

Порівняння показників	Часове ущільнення	Кодове ущільнення
Кількість часових передач пакетів на комірку в радіоінтерфейсі	Невелика	Висока (20÷50)
Миттєва швидкість передачі даних для користувача пакетів сервісу	Висока (<100 Кбіт/с)	Низька (<50 Кбіт/с)
Переваги	Більш коротка повна затримка пакетів; Потрібне менше відношення E_b/N_0	Більш висока дальність зв'язку у зворотному каналі із-за низької швидкості передачі даних; Менші вимоги до пропускної здатності абонентського терміналу

Недоліком часового ущільнення являється порівняно короткий інтервал

наданого часу для передачі пакетів (не більше декількох кадрів). В цей період часу фізичні ресурси базової станції (канальні модулі, лінії сигналізації), а також коди розширення “прив’язані” до сеансу, можуть не використовуватись. Тобто, при часовому ущільненні відсоток часу, коли фізичні ресурси не використовуються є вищий, порівняно з відсотком часу при кодовому ущільненні. Часове ущільнення використовується, як правило, в суміщених і, рідше, у виділених каналах.

11.4. Структура кадрів UTRAN

Для кожного фізичного каналу визначена відповідна часова структура в якій розташовані пакетні дані згідно чітко встановленого порядку. Як вказувалось раніше в UMTS виділено один кадр довжиною 10 мс, в якому швидкість передачі чіпів становить 38400 Кчіп/с. Кожен кадр розділяється на 15 слотів тривалістю $10/15=0.666$ мс, в кожному з яких міститься $38400/15=2560$ чіпів. Типова структура слоту для виділеного каналу “вверх” (рис. 11.14) містить 4 поля бітів:

- пілотних;
- вказівників транспортних форматів (TFCI);
- управління потужністю випромінювання (TPC);
- інформації оберненого зв’язку (FBI), які використовуються в тому випадку, коли в низхідному каналі застосовується рознесення передачі.

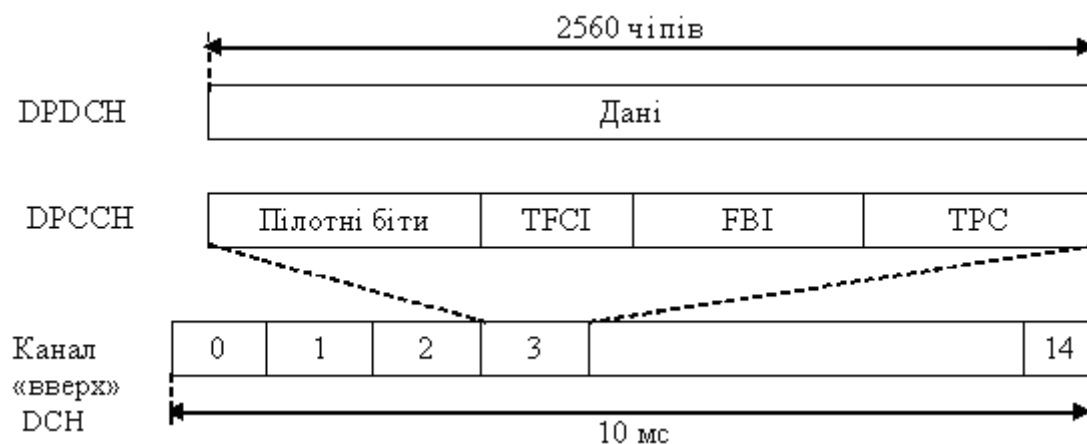


Рис.11.14 Структура кадрів каналу “вверх”

В каналі “вниз” управління DPCCN біти FBI не передаються і в каналі, крім пілотних бітів, наявний загальний пілот-канал (PILOT), який може використовуватись при оцінці якості каналу.

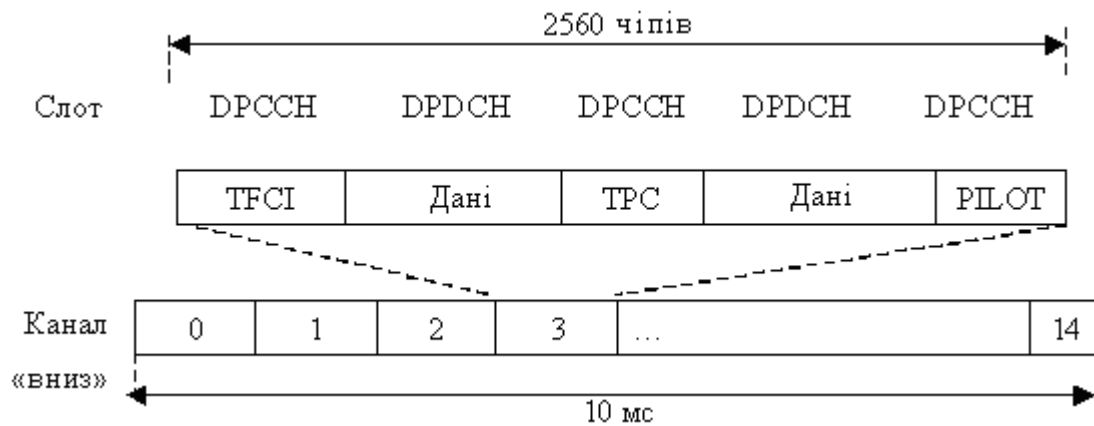


Рис.11.15 Структура кадрів каналу “вниз”

11.5. Системна архітектура мережі UMTS

На рис. 11.16 представлена системна архітектура мережі UMTS з переліком інтерфейсів, які використовуються.

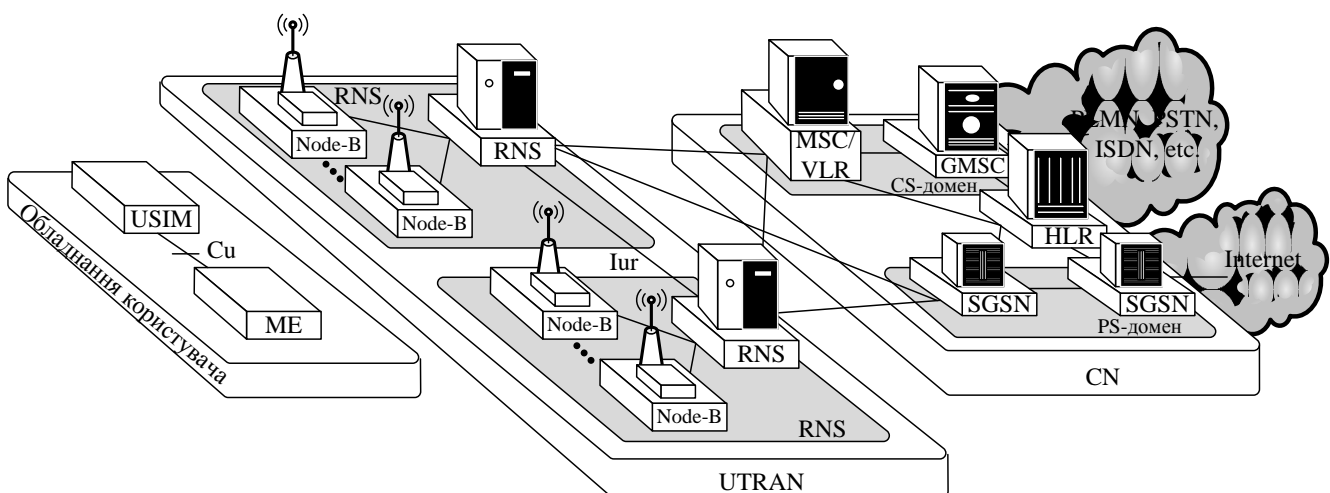


Рис.11.16 Структурна схема мережі UMTS з переліком інтерфейсів

Базові станції Node B здійснюють організацію радіоканалів за викликом мобільних абонентів, або за своєю ініціативою при поступленні зовнішнього

виклику. Основною функцією Node B являється реалізація радіоінтерфейсу (обробка радіосигналу, модуляція та демодуляція, і т.д.), в тому числі виконання деяких операцій з розподілу радіоресурсів мережі (управління потужністю випромінювання, здійснення хендовера).

Контролер мережі радіодоступу RNC здійснює управління базовими станціями, з якими він утворює підсистему RNS і взаємодіє з центром комутації мережі MSC/VRL.

Мобільний центр комутації мережі MSC/VRL являється центральним елементом мережі. Він може обслуговувати велику групу Node B і забезпечує всі види з'єднань, в яких виникає потреба для рухомої абонентської станції. MSC/VRL здійснює обмін в мережі UMTS, з'єднуючи між собою різні мережеві елементи, зокрема елементи підсистеми RNS. MSC/VRL забезпечують з'єднання з другими MSC, зокрема із зональними GMSC і другими службами. Суміщена база даних переміщення елементів (VRL) містить копію списку наданих послуг зв'язку для візитних абонентів, а також точну інформацію про місцеположення базової станції в рамках системи, що обслуговується.

Призначення інших вузлів наступне:

- Зональний центр комутації (GMCS) здійснює комутацію між мережею UMTS і зовнішніми CS-мережами.
- База даних місцезнаходження елементів (HRL) представляє собою довідкову базу даних про абонентів які постійно перебувають в мережі.
- Сервісний опорний вузол вирішує завдання ідентифікації абонента і управління мобільністю.
- Шлюзовий опорний вузол являється інтерфейсом між базовою мережею GPRS і зовнішніми мережами, виконуючи роль маршрутизатора підсистем.

Необхідно відмітити, що описаний варіант архітектури мережі UMTS являється базовою мережевою архітектурою, визначеною в рамках 3GPP в блоці стандартів Release 99. Архітектури мережі являється достатньо гнучкою

та універсальною, що допускає можливість конфігурації мережі на вибір оператора.

12. СИСТЕМИ WCDMA TDD

12.1. Концепція побудови

В 1998 р. для розробки загального стандарту широкопосмугової CDMA була створена робоча група, яка отримала назву 3GPP (англ. 3rd Generation Partnership Project - проект з партнерства систем третього покоління). Результатом роботи цієї групи став стандарт UMTS (Universal Mobile Telecommunication System – UMTS). Далі він увійшов в групу стандартів IMT-2000 (рис. 12.1), як стандарт широкопосмугової CDMA (WCDMA). Цей стандарт передбачає передачу даних в режимах FDD і TDD з рознесенням несучих частот на 5 МГц.

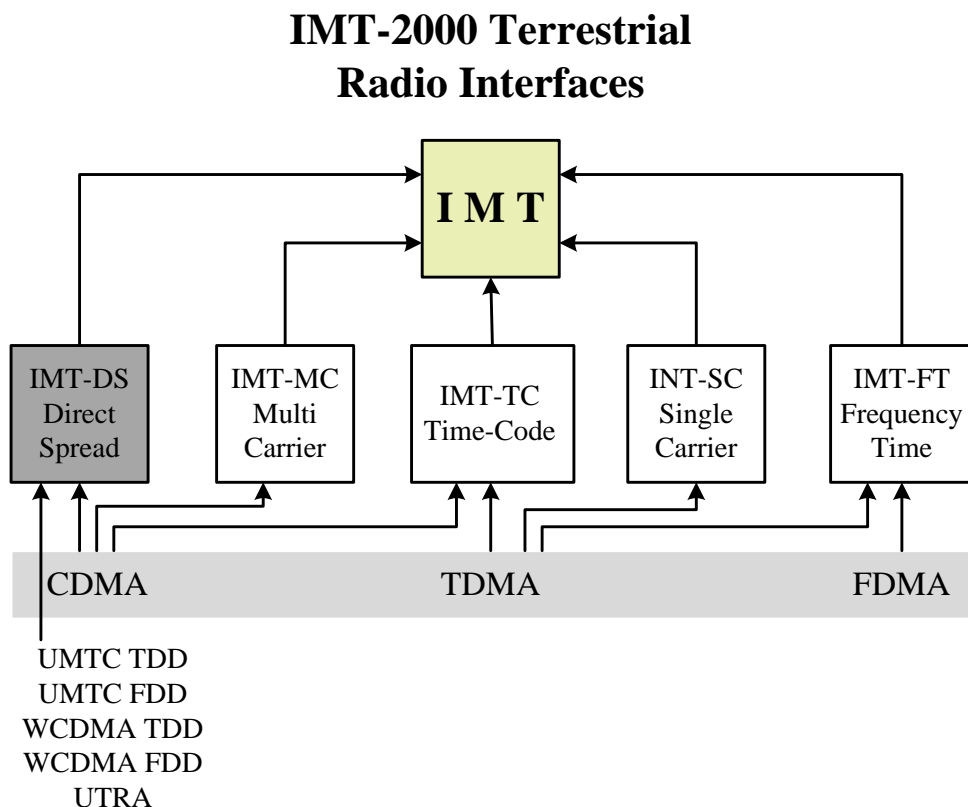


Рис.12.1 Радіоінтерфейси IMT-2000

Для згаданого стандарту також використовується назва UTRA (англ. UMTS Terrestrial Radio Access - наземний радіодоступ UMTS), або назва IMT-DS (Direct Spread Spectrum - пряме розширення спектру).

Найбільшого поширення стандарт UMTS здобув в Європі [7].

12.2. Режим UTRA TDD

Розглянемо режим UTRA TDD. Основні параметри цього режиму наведені в таблиці 12.1.

Таблиця 12.1 Основні параметри інтерфейсів WCDMA

Параметр	UTRA FDD	UTRA TDD
Метод множинного доступу	CDMA	TDMA/CDMA
Метод дуплексної передачі даних	FDD	TDD
Спектральна ширина каналу	5 МГц	
Чіпова швидкість	3,84 Мчп/с	
Довжини кадру	10 мс	
Структура кадру	15 слотів в кадрі	
Способи зміни швидкості	Багатокодовий, багатослотовий і OVSF	Багатокодовий і OVSF
Спосіб розширення в прямому каналі	OVSF послідовності для розділення каналів, вкорочені послідовності Голда ($2^{18}-1$) для розподілу сот та користувачів	
Спосіб розширення в зворотному каналі	OVSF послідовності, вкорочені послідовності Голда ($2^{25}-1$) для розподілу користувачів	
Коефіцієнт розширення	$4 \div 512$	$1 \div 16$
Канальне кодування	Згорткове кодування ($R=1/2, 1/3, K=9$); турбо-кодування (восьмирівневе PCCC, $R=1/3$); кодування обумовлене послугою	

Перемежування	Міжкадрове перемежування (10, 20, 40, 80 мс)	
Модуляція	QPSK	
Форма імпульсів	Фільтр з характеристикою у вигляді припіднятого косинуса з коефіцієнтом згладжування 0,22	
Детектування	Когерентне, на основі пілотних символів	Когерентне, на основі навчальної послідовності в середній частині пакета
Тип пакетів	-	Пакети з мовними даними, пакети синхронізації і пакети випадкового доступу
Регулювання потужності виділеного каналу	Швидка закрита петля, 1500 Гц	“Вверх”: відкрита петля (100 або 200 Гц) “Вниз”: закрита петля (≤ 800 Гц)
Хендовер на одній частоті	М'який	Жорсткий
Хендовер зі зміною частоти	Жорсткий	
Динамічне виділення каналів	не треба	швидко та повільне
Зменшення завад всередині соти	можливе спільне детектування	можливі удосконалені приймачі в базових станціях

Відмітимо, що багато параметрів режимів FDD й TDD збігаються, що приводить до подібності двох режимів передачі й спрощенню рухомих станцій. Нагадаємо, що частина спектру, виділеного системі UMTS, представлена у вигляді непарних діапазонів. У цих діапазонах робота в режимі FDD виключена, тому застосовується режим TDD. Дуплексна передача даних з

часовим поділом дозволяє асиметрично розподілити час між двома напрямками передачі даних. Цей поділ може динамічно підстроюватися під поточний вид трафіку. Легко може бути реалізована передача з різними швидкостями. Ще одна цікава властивість передачі даних у режимі TDD - взаємність каналів (англ. channel reciprocity). Оскільки для передачі даних в двох напрямках використовується та сама ділянка спектру, вимірювання проведені при передачі даних в одному напрямку, можуть бути використані і для зворотного напрямку передачі, якщо характеристики каналу не змінюються швидко в часі [8].

На рис. 12.2 зображений формат кадру в режимі UTRA TDD. Він триває 10 мс і так само, як у режимі FDD, розділений на 15 часових слотів. Фізичний канал задається несучою частотою, часовим слотом кадру і розширювальним кодом, який використовується. Можуть бути отримані кілька різних швидкостей передачі даних шляхом виділення з'єднанню відповідної кількості фізичних каналів.

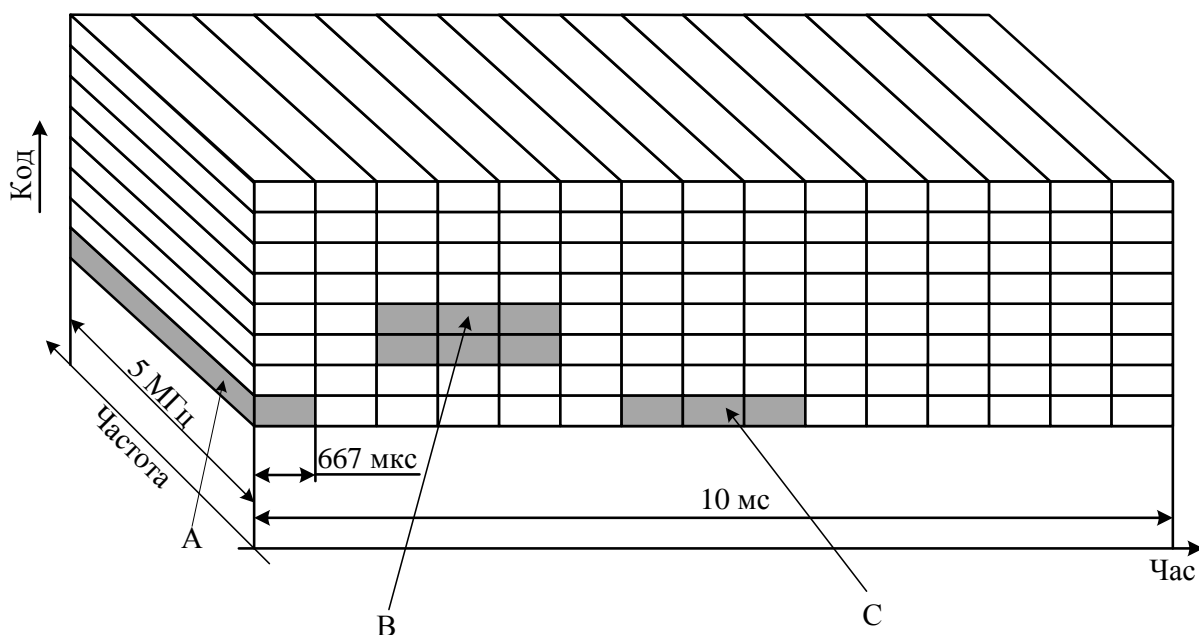


Рис.12.2 Виділення ресурсів з'єднанням з різними швидкостями передачі даних

Розширювальні ПВП, які використовуються в тому самому слоті, взаємно ортогональні. Вони вибираються із сімейства кодів OVVSF. Окремі канали синхронізовані один з одним. Кадр, що складається з 15 слотів, поділений між

двома напрямками передачі. Виділення слотів може бути симетричним з багаторазовим перемиканням між зворотним та прямим каналами передачі у межах одного кадру. Розподіл також може бути асиметричним з багаторазовим перемиканням, або симетричним/асиметричним з однією зміною напрямку передачі даних у кадрі. Головне, щоб в 15-слотовому кадрі хоча б один слот був виділений для прямого каналу, і хоча б один для зворотного.

Транспортні й фізичні канали, які використовуються в режимі UTRA TDD, аналогічні каналам в режимі FDD. Відображення транспортних каналів на фізичні, представлено на рис. 12.3.

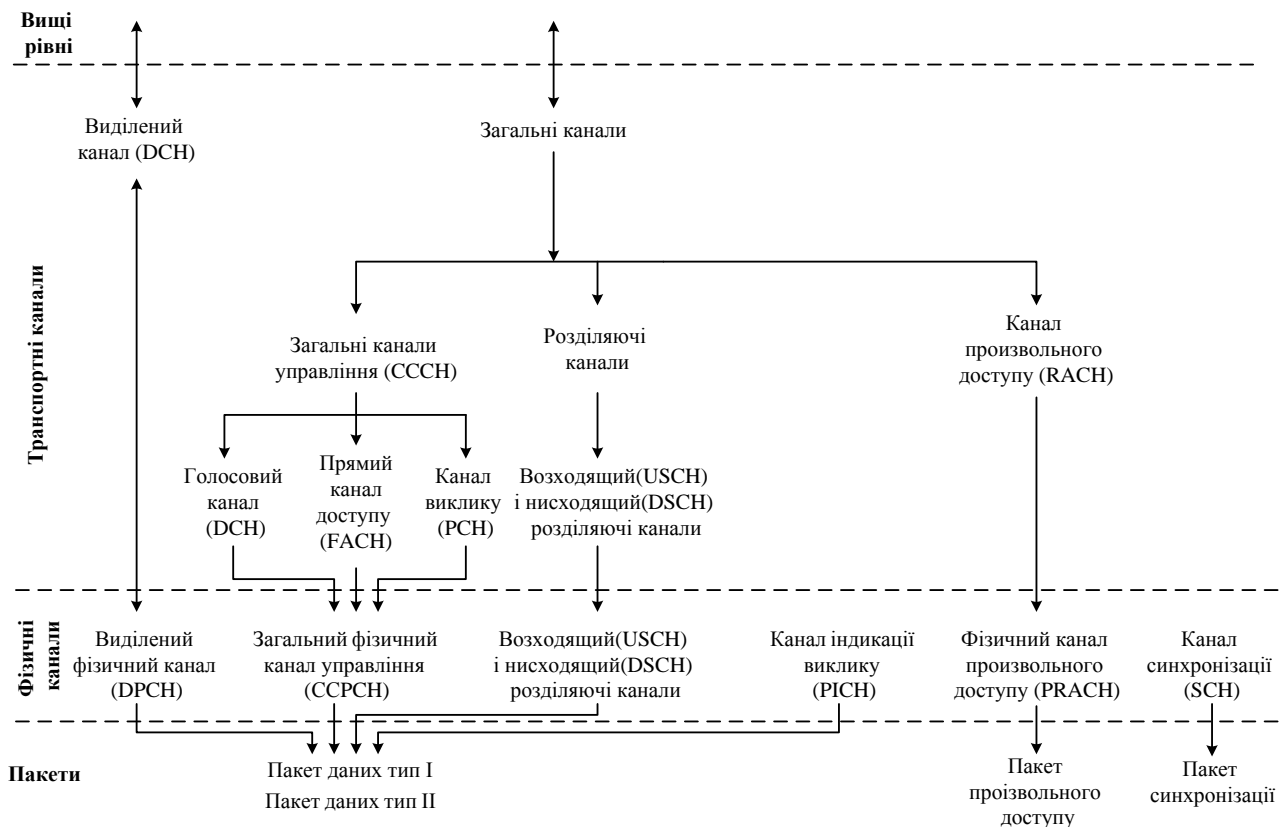


Рис.12.3 Транспортні та фізичні канали в режимі TDD

12.3. Призначення та структура пакетів в режимі UTRA TDD

Тривалість кожного часового слоту відповідає часу передачі 2560 чіпів. Фізичні канали передаються у вигляді пакетів. Є три основних типи пакетів, що розрізняються за внутрішньою структурою й довжиною захисних інтервалів. Кожен пакет містить два поля з даними, навчальною послідовністю між ними, і

завершується захисним інтервалом. Пакети даних (англ. traffic bursts) також можуть містити індикатор транспортного формату (англ. Transport Format Combination Indicator - TFCI) і біти керування потужністю передачі (англ. Transmission Power Control - TPC). Передача полів TFCI і TPC узгоджується під час фази встановлення з'єднання. Поле TPC конкретного користувача передається тільки один раз за кадр. На рис. 12.4 наведені структури пакета даних і пакета довільного доступу.

Пакет даних типу I використовується для передачі даних у зворотному напрямку. Застосування навчальної послідовності великої довжини дозволяє оцінити до 16 імпульсних відгуків каналу.

Пакет даних типу II в основному використовується для передачі даних у прямому напрямку, але може використовуватися і у зворотному напрямку, якщо кожен часовий слот займають чотири і менше користувачів. Навчальні послідовності пакета, які використовуються в тій самій соті, є циклічно зсунутими версіями тої самої базової кодової ПСП. У різних сотах використовуються різні кодові послідовності.

12.4. Передача даних в режимі UTRA TDD

Дані, які будуть передаватися розширюються в полях даних. Так само, як і в режимі UTRA FDD, розширення виконується в два етапи з використанням канало-утворюючого коду і комплексного скремблюючого коду. У виділених фізичних каналах в прямому напрямку коефіцієнт розширення спектру становить $SF=16$. Як відзначалося, високошвидкісному з'єднанню може бути виділено кілька фізичних каналів, що використовують різні канало-утворюючі коди. У випадку використання одного коду в прямому фізичному каналі, коефіцієнт розширення може бути рівним 1.

Коефіцієнт розширення для виділених фізичних каналів у зворотному напрямку приймає значення від 1 до 16. Одна рухома станція для збільшення швидкості передачі даних може задіяти не більше двох фізичних каналів на один слот.

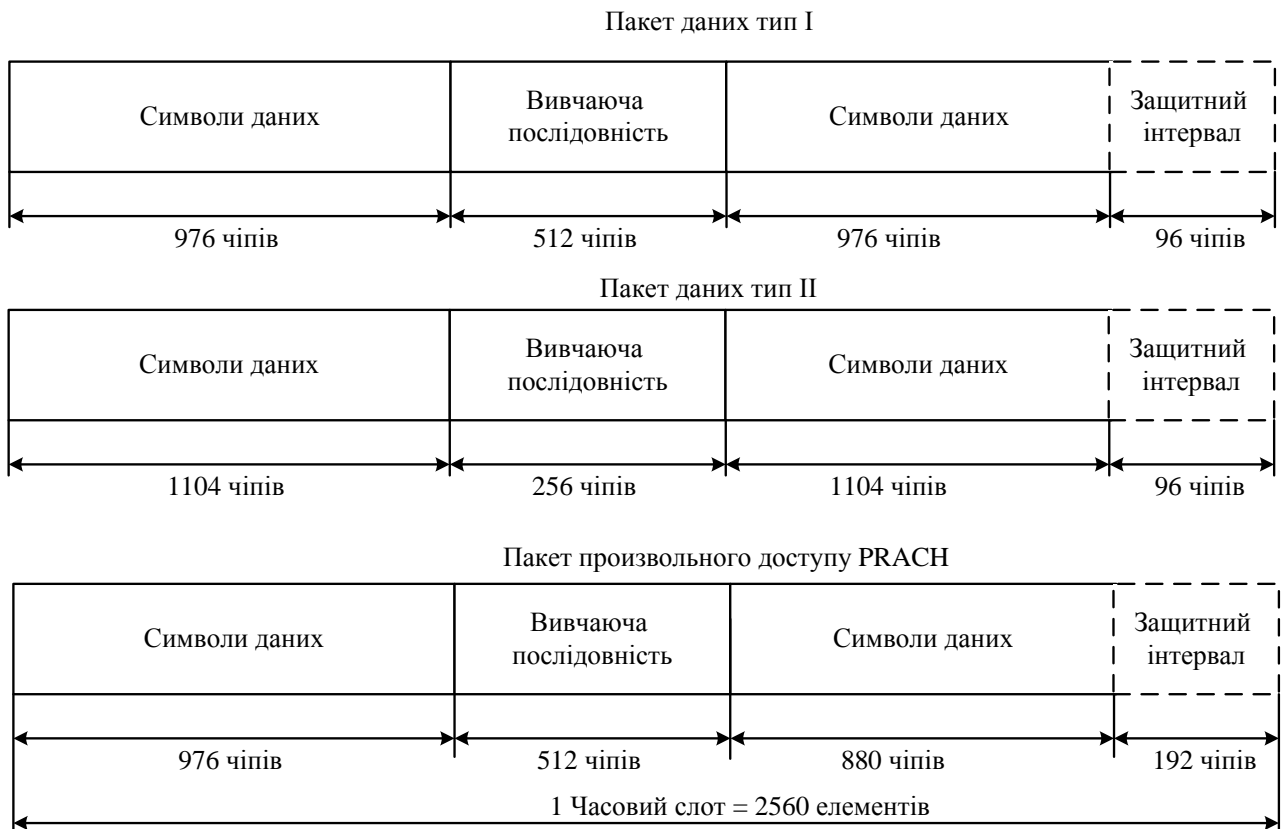


Рис.12.4 Структура пакетів даних в режимі TDD

Прості обчислення для пакетів типу II показують, що передача з коефіцієнтом $SF=16$, одним кодом і одним часовим слотом дає в результаті швидкість передачі даних, рівну 13,8 Кбіт/с. Використання 16 кодів й 13 часових слотів приведе до збільшення швидкості передачі даних до 2,87 Мбіт/с. Аналогічний результат може бути отриманий, якщо замість 16 кодів з $SF=16$ використати один код з $SF=1$.

Так само, як і в режимі FDD, в режимі UTRA TDD використовуються первинні й вторинні загальні фізичні канали керування (P-CCPCH й S-CCPCH). Канал P-CCPCH переносить транспортний канал BCH. Для цього використовуються пакети типу I з фіксованим розширенням і $SF=16$. Канал S-CCPCH переносить канал PCH і канал FACH. При цьому можуть застосовуватися пакети обох типів, однак коефіцієнт розширення залишається фіксованим і рівним 16.

Розташування каналу P-CCPCH у кадрі, тобто номер часового слоту і код розширення, вказуються в повідомленні, яке передається по каналу

синхронізації (SCH) [8]. Пакет синхронізації представлений на рис. 12.5. В кадрі можуть бути розміщені один або два синхропакети. В першому випадку пакет синхронізації передається в тому ж часовому слоті кадру, що й канал P-CCPCH. Якщо передається два пакети синхронізації, то канал синхронізації (SCH) розміщується в k -х ($k=0,1,\dots,6$) і $(k+8)$ -х часових слотах кадру, а канал P-CCPCH розташовується в k -му слоті. На рис. 12.5 зображений другий випадок при $k=0$. Канал SCH містить первинну послідовність і три вторинних, кожна довжиною 256 чіпів. Послідовності починаються з певним часовим зсувом, який вибирається з 32 можливих значень. Це дозволяє уникнути ефекту перехоплення (capturing), який може виникнути у випадку взаємної синхронізації базових станцій.

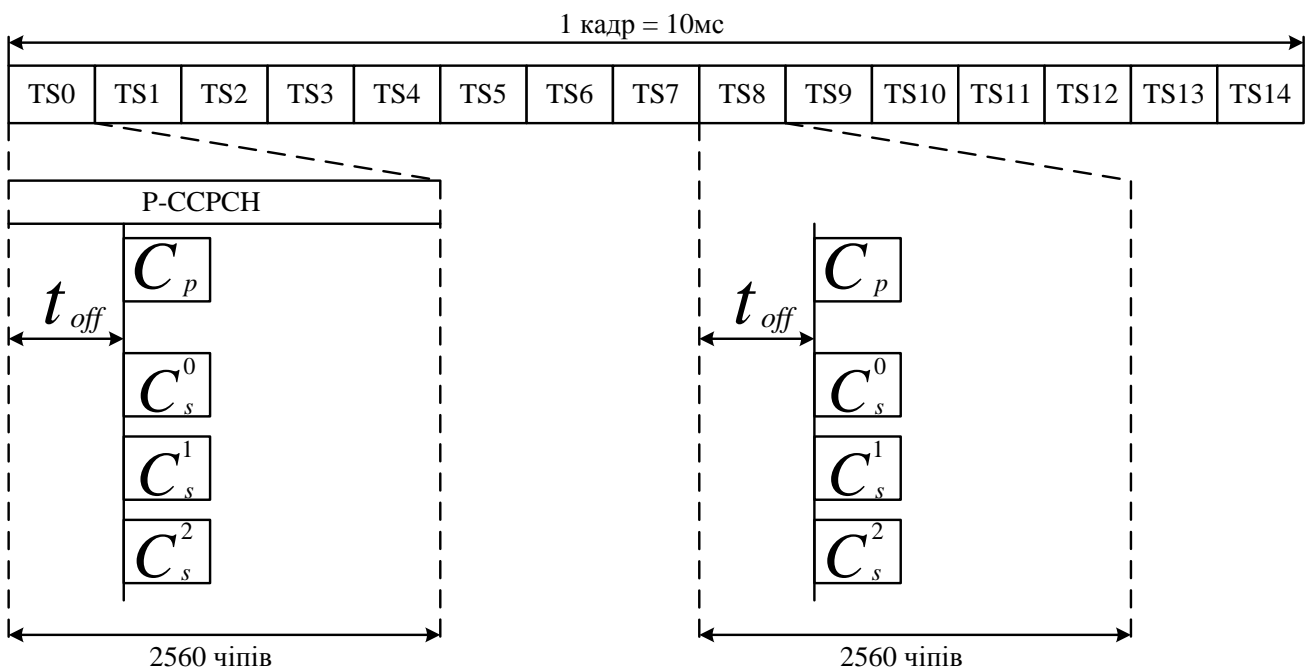


Рис.12.5 Розміщення каналу синхронізації в кадрі системи

Рухома станція надсилає запит про доступ до каналу з використанням фізичного каналу довільного доступу (PRACH). Запит передається у вигляді пакета довільного доступу, зображеного на рис. 12.4. Відмітимо, що в цьому пакеті використовується більш довгий захисний інтервал. Це дозволяє системі нормально функціонувати при різниці поширення сигналу в часі, обумовленою

довжиною шляху порядку 7,5 км. Стандартний захисний інтервал, що використовується у пакетах з даними, відповідає часу передачі 96 чіпів, таким чином допускається різниця поширення в часі сигналу до 25 мкс. Цей час поширення в свою чергу визначає радіус соти - 3,75 км без застосування процедури прискореного відправлення пакетів (англ. timing advance).

Рухома станція може бути викликана за допомогою повідомлення, яке передається вторинним каналом SSCCH, однак спочатку повинен бути задіяний канал індикації виклику PICH, що реалізується шляхом заміщення каналу S-SSCCH і переносить індикатори виклику відповідних груп рухомих станцій. Механізм виклику рухомої станції в основному аналогічний описаному вище механізму виклику в режимі UTRA FDD і не потребує додаткового опису.

Фізичні зворотний та прямий спільний канали (англ. Physical Uplink (Downlink) Shared Channel - PUSCH (PDSCH)) використовуються для встановлення й передачі параметрів, специфічних для даного абонента, таких, як керування потужністю, часові зсуви при відправленні пакетів та встановленні спрямованої антени.

Застосування режиму TDD визначає необхідність виконання жорсткого хэндоверу. Мережа направляє рухомій станції список сусідніх базових станцій, потужність сигналів яких слід виміряти, а рухома станція проводить виміри у вільних часових слотах. В режимі UTRA TDD існують ті ж типи хэндовера, що й в UTRA FDD: TDD-TDD, TDD-FDD, WCDMA- TDD-GSM.

На етапі проектування системи UTRA TDD необхідно прийняти до уваги кілька різних видів завад. Їхній детальний аналіз дозволяє зробити наступні висновки:

- базові TDD-станції одного оператора повинні забезпечувати збереження синхронізації кадрів; також бажана кадрова синхронізація базових станцій різних операторів;
- розподіл асиметричного зворотного та прямого трафіку в соті не є довільним - на практиці може виникати сильна інтерференція між напрямками передачі;

- динамічне виділення каналів (англ. Dynamic Channel Allocation -DCA) - є потужним інструментом, що дає можливість уникнути перешкод в TDD-діапазоні. Іншою можливістю є міжчастотний, або міжсистемний хэндовер;
- особливу увагу слід звернути на потенційний взаємовплив FDD і TDD систем (використання нижнього діапазону TDD і верхнього діапазону зворотного FDD).

Внаслідок заважаючого впливу один на одного передавачів абонентів припускається застосування ускладнених структур приймачів у базовій і рухомій станціях. У базових станціях можуть використовуватися приймачі із спільним детектуванням сигналу. Це є реальним рішенням, оскільки кількість користувачів, які одночасно здійснюють передачу даних в одному часовому слоті є відносно невелика, а обчислювальна складність таких приймачів буде прийнятною, особливо при впровадженні субоптимальних рішень. В рухомих станціях можна використати однокористувацькі приймачі з адаптивною компенсацією міжсимвольних перешкод і зменшенням перешкод внаслідок багатостанційного доступу (англ. Multiple Access Interference - MAI).

Метод TDMA, який використовується в режимі UTRA TDD серйозно впливає на сотове покриття, оскільки переривчастий характер цієї передачі сприяє зменшенню потужності. Для того, щоб забезпечити покриття тієї ж області, що і в режимі FDD, необхідно більше станцій, що працюють у режимі TDD. Тому система UMTS в режимі TDD залишається доповненням до системи, що працює в режимі FDD, особливо для передачі даних і встановлення асиметричних з'єднань.

Частина 3.

Системи радіодоступу стандартів IEEE 802.1x

13. ПЕРСОНАЛЬНІ МЕРЕЖІ СТАНДАРТІВ IEEE 802.15.x

13.1. Загальні зауваження

Персональні мережі (Personal area networks, PAN) – це, як правило, мережі для безпроводної взаємодії домашньої та офісної апаратури на невеликих площах. Радіус дії таких мереж становить, орієнтовно, 10 і більше метрів. Місце мереж PAN серед інших безпроводних мереж стандартів IEEE 802.xx приведено на рис. 13.1.

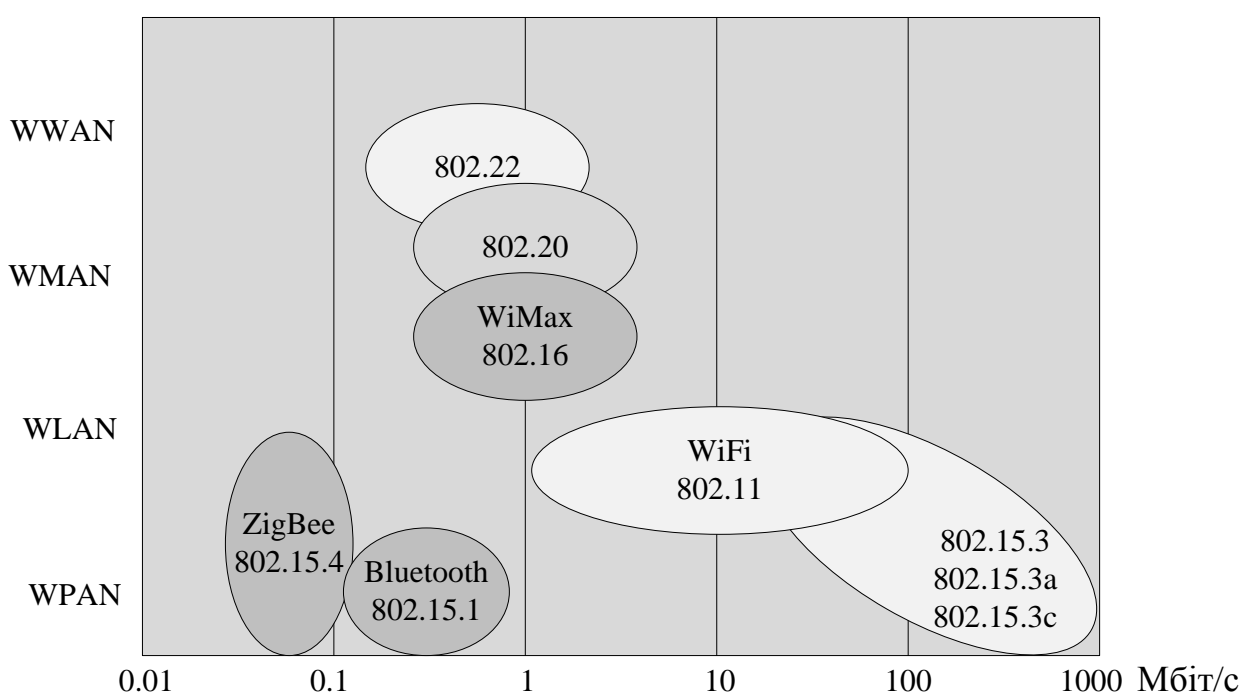


Рис.13.1 Сімейство стандартів IEEE 802 для побудови безпроводних мереж

Персональні безпроводні мережі передачі даних стали з'являтися відносно недавно – в середині 90-х років. Проте, тільки в кінці 90-х років розвиток мікроелектроніки дозволив виготовляти для таких пристроїв інтегральну елементну базу. Внаслідок перспективності безпроводних мереж практично одночасно з'явилося декілька стандартів для них. Серед них є такі стандарти безпроводного зв'язку HomeRF, сімейство стандартів IEEE 802.15 (Bluetooth, IEEE 802.15.3/4), а також технології надширококуткового зв'язку (UWB). Вони описують роботу нижніх рівнів моделі OSI/ISO: фізичний (PHysical, PHY),

канальний (Medium Access Control, MAC).

Необхідно відмітити, що стандарт HomeRF поки що не використовується масово. З однієї сторони його витісняють Bluetooth-пристрої, з іншої сторони – системи стандарту IEEE 802.11, обладнання яких суттєво подешевшало.

Тому спочатку розглянемо більш детально стандарт Bluetooth.

13.2. Стандарт 802.15.1

Призначення

Обладнання передачі даних стандарту Bluetooth призначене для реалізації низькошвидкісних з'єднань в невеликій локальній зоні. Радіус області зв'язку для пристроїв стандарту Bluetooth не перевищує 10 м. В окремих випадках дальність зв'язку може досягати до 100 м.

Пристрої з технологією Bluetooth забезпечують швидкість передачі інформації в каналі від 720 Кбіт/с до 3 Мбіт/с. Такої швидкості вистачає для більшості застосувань. При цьому забезпечується суттєво менше енергоспоживання, порівняно з пристроями стандарту 802.11. Це дозволяє створювати пристрої, що забезпечують працездатність від акумуляторів на тривалість часу від декількох годин до декількох десятків годин.

Зараз радіотехнологія Bluetooth добре відома завдяки, перед усім, використанню в сучасних мобільних телефонах, КПК, електронних органайзерах і т.д. Найбільш відомим призначенням технології є низькошвидкісний зв'язок між комп'ютером і КПК; пристроєм hands-free і мобільним телефоном; різноманітними безпроводними пристроями і комп'ютером; а також низькошвидкісні локальні мережі.

Ідеологія Bluetooth - це універсальний радіоінтерфейс, що зв'язує один з одним самі різні пристрої і не потребує дорогої апаратної підтримки. Однак пристрої Bluetooth сьогодні реально використовують в основному для заміни провідних з'єднань радіоінтерфейсом, незважаючи на найширший спектр закладених у ньому можливостей. Ринок такого виду застосувань поки що в багато разів перевершує ринок дійсно мережевих пристроїв.

Історія розвитку

У лютому 1998 р. компанії Ericsson, IBM, Intel, Toshiba і Nokia вирішили об'єднати свої зусилля для створення технології безпроводного з'єднання мобільних пристроїв, організувавши спеціальну робочу групу SIG (Special Interest Group). Ім'я датського короля вікінгів Харальда I Блаатанда (в пізній транскрипції - Bluetooth, Синезубий), який жив в ранньому середньовіччі, дало назву інтерфейсу. Очевидно, свою роль зіграло і те, що основи технології були ще в 1994 р. пророблені шведською компанією Ericsson. Вже в жовтні 1998 р. з'явилася перша версія Bluetooth 0.7, що описувала лише протоколи фізичного рівня (baseband) і рівня з'єднання (Link Manager), а 26 липня 1999 р. була опублікована перша відкрита версія Bluetooth 1.0a. Вона вже містила розділ з правилами використання технології Bluetooth (включаючи правові аспекти) усім світовим співтовариством.

Вже в 2000 р. у Bluetooth SIG входили 1883 фірми. Нову технологію підтримали виробники елементної бази, програмного забезпечення, портативних комп'ютерів, стільникових телефонів, звуковідтворюючої апаратури та ін. Сьогодні стандарт Bluetooth являється загальновизнаним. У лютому 2001 р. з'явилася версія Bluetooth 1.1, що увібрала в себе доробки і виправлення, а також ряд нових розділів. Саме версія 1.1 виявилася масово підтриманою виробниками апаратури.

Однак на цьому Bluetooth SIG свою діяльність не припинив, 5 листопада 2003 р. він випустив нову версію - Bluetooth 1.2, істотно дороблену, а 15 жовтня 2004 р. з'явилася версія Bluetooth 2.0 + EDR (Enhanced Data Rate), що передбачає підвищення швидкості передачі даних з 1 до 3 Мбіт/с.

Сьогодні стандарт Bluetooth визнаний всім світовим співтовариством. Між Bluetooth SIG та IEEE була встановлена домовленість згідно якої Bluetooth увійшла до стандарту IEEE 802.15.1 (опублікований 14 червня 2002 р.) "Wireless Medium Access Control (MAC), and Physical Layer (PHY) Specification for Wireless Personal Area Networks (WPANs)" Специфікація контролю доступу

до безпроводного каналу та фізичного рівня безпроводних персональних мереж.

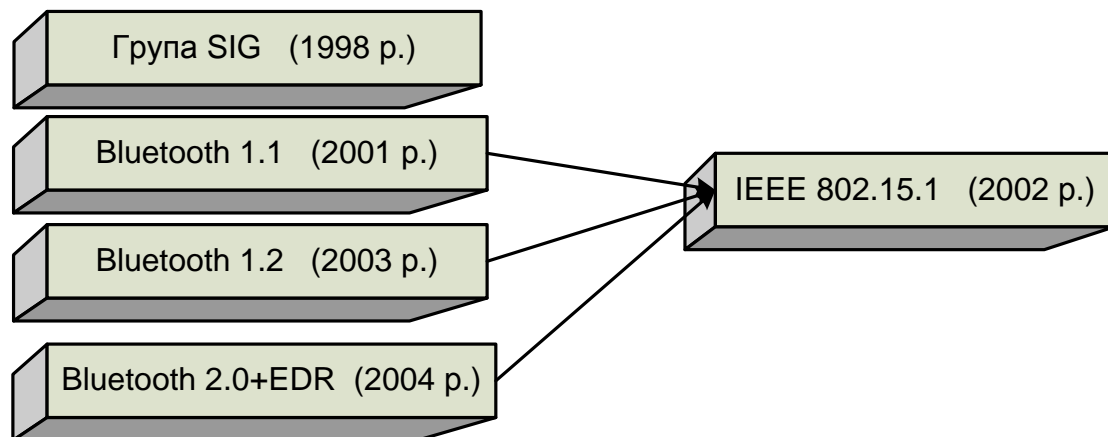


Рис.13.2 Розвиток стандарту Bluetooth

Технічні характеристики

Фізичний рівень (PHY), або радіоінтерфейс описує параметри пристроїв стандарту Bluetooth, необхідні для їх взаємодії в радіоканалі. Деякі основні параметри пристроїв стандарту Bluetooth приведені в таблиці 13.1.

Таблиця 13.1 Основні параметри стандарту Bluetooth

1. Базовий діапазон частот	Діапазон ISM: 2,4÷2,4835 ГГц
2. Рознесення каналів	1 МГц з стрибками по частоті FH (Frequency Hopping)
3. Модуляція, тип фільтру	Bluetooth 1.2: GFSK з BT = 0,5 Bluetooth EDR: $\pi/4$ QPSK; 8DPSK
4 Вихідна потужність передавачів	Class 3. Максимальна потужність 1 мВт (0 дБп) (10 м при відкритому просторі). Class 2. Максимальна потужність 2,5 мВт (4 дБп), номінальна – 1 мВт (0 дБп), мінімальна 0,25 мВт (-6 дБп), забезпечує зв'язок до 20 м.

	Class 1. Максимальна потужність 100 мВт (20 дБп), мінімальна – 1 мВт (0 дБп), зв'язок з однотипним пристроєм – близько 100 м.
5. Технологія множинного доступу	TDMA
6. Метод передачі даних	Комутація пакетів, синхронне з'єднання.
7. Символьна швидкість	1 Мс/с
8. Швидкість передачі даних користувача	Bluetooth: 1 Мбіт/с Bluetooth EDR: 2 - 3 Мбіт/с
9. Основні послуги	Мова і дані для абонентів з низькою рухливістю
10. Комерційне використання	2000 - Bluetooth 2005 - Bluetooth EDR

Діапазон частот (п.1 таблиця 13.1). Радіообмін відбувається в смузі частот 2400÷2483,5 МГц (у США і ряді інших країн – неліцензійний діапазон). В таблиці 13.2 приведені дані, що стосуються діапазону частот для різних країн та номінальних значень частоти.

Таблиця 13.2 Розділення смуги частот на підканали в стандарті Bluetooth

Країна	Діапазон, МГц	Несуча частота підканалів, МГц	Допустимі номери під каналів, k
Європа* і США	2400,8÷2488,5	2402 + k	0...79
Японія	2471,8÷2497,8	2473 + k	0...23
Іспанія	2445,8÷2475,8	2449 + k	0...22
Франція	2440,5÷2483,5	2454 + k	0...22

* Крім Іспанії і Франції.

Тип модуляції (п.3 таблиця 13.1)

В базовій версії використовується дворівнева частотна модуляція з фільтром Гауса (GFSK) та індексом модуляції $h = 2fT = 0.3$. У версії стандарту Bluetooth + EDR наявний розширений набір швидкостей передачі даних завдяки використанню багатопозиційних видів модуляції $\pi/4$ QPSK, 8DPSK.

Приклади застосування Bluetooth

Сьогодні нам просто необхідний мобільний зв'язок як на роботі, так і удома. Бізнес по всьому світу став по-новому відноситися до робочого середовища: тепер це і літаки, автомобілі, домашні офіси, готелі. Виникла гостра необхідність доступу до даних далеко від офісу, підтримки нового класу мобільних співробітників, які можуть звертатися до інформації у будь-який час в будь-якій точці планети. Безпроводна технологія Bluetooth має широкий спектр застосувань, причому деякі приклади застосувань приведені нижче.

Прозора синхронізація. Завдяки малим розмірам, вазі і низьким рівнем споживання енергії, росте популярність кишенькових комп'ютерів. Раніше для зв'язку з ними було потрібне фізичне, або інфрачервоне з'єднання. Bluetooth не вимагає кабельного з'єднання пристроїв, або прямої видимості ІЧ-приймача. Синхронізація даних відбувається просто в радіусі 10÷100метрів від вашого комп'ютера, PDA, або мобільного телефону.

Підключення до мереж через точки доступу Bluetooth. Точки доступу Bluetooth - це міст між провідною мережею і мобільними пристроями Bluetooth. У радіусі дії такої точки доступу будь-який пристрій Bluetooth може підключитися до ресурсів звичайної мережі, включаючи мережеві сервери, принтери, електронну пошту і Інтернет. Це дозволяє прозоро інтегрувати персональні пристрої в корпоративну мережу: синхронізація з мережевою інформацією здійснюватиметься миттєво, непомітно і автоматично. Ця модель використання особливо ефективно працює при доступі до баз даних в торгових залах, корпоративних офісах, медичних установах.

Випадковий доступ. В режимі визначення пристрої Bluetooth можуть встановлювати динамічні тимчасові з'єднання. Якщо користувачі дозволяють такий зв'язок, їхні 2÷8 пристроїв зможуть взаємодіяти, формуючи довільну персональну мережу (PAN). Для встановлення сеансу між невідомими пристроями з різних PAN необхідне втручання користувачів. Це може відбуватися, наприклад, для обміну електронними візитками на виставках і конференціях.

Доступ до корпоративної мережі та Інтернету в дорозі. Для підключення до обчислювальних систем підприємства за допомогою безпроводних з'єднань, мобільним співробітникам зазвичай надається переносний комп'ютер, мобільний телефон і кабель для їх з'єднання - це стандартне устаткування в сьогоdnішньому світі. Якщо ж кабель для зв'язку втрачений, або розірваний, підключитися до мережі не вдасться. Пристрої Bluetooth звільняють мобільних користувачів від цих проблем, оскільки вони автоматично зв'язуються використовуючи безпечний безпроводний радіоканал: користувачі можуть відправляти електронні листи, переглядати Інтернет-сторінки і мати доступ до корпоративної мережі.

Безпроводний зв'язок з периферійними пристроями. Мобільні співробітники часто забезпечують свої ноутбуки мишею і клавіатурою для зручності роботи в офісі. Більшість ноутбуків мають стандартний порт для підключення миші, але іноді вони вимагають застосування дорогих повторювачів клавіатурного порту. Bluetooth не вимагає фізичного підключення миші і клавіатури: безпроводний радіоканал зв'язує їх з комп'ютером автоматично. Отже Bluetooth забезпечує гнучкий і економічний зв'язок між пристроями.

Безпроводне сумісне використання інформації. Bluetooth спрощує

сумісне використання інформації. Наприклад, наскільки зручно провести презентацію, не підключаючи відеокабелі до проектора, або навіть безпосередньо передавати її на портативні комп'ютери слухачів безпроводним каналом зв'язку. Цифрові камери Bluetooth можуть передавати відзняті фотографії на ноутбук для зберігання і монтажу, або ж на принтер для друку. А за допомогою мобільного телефону Bluetooth можна відправити фотографії з будь-якого місця за кордоном.

Безпроводні гарнітури і системи hands-free. Різні види телефонних гарнітур і систем hands-free забезпечують користувачеві мобільність і зручність, а водієві дозволяють не відволікатися від дороги при вхідних і вихідних дзвінках. Фірмою Sony-Ericsson створена система Bluetooth Car Hands-free HCB-30, яка автоматично розпізнає мобільний телефон і взаємодіє з більшістю автомобільних аудіосистем. Під час вхідного дзвінка система вимикає звук автомагнітоли, і голос людини, що дзвонить транслюється через автомобільні колонки. Для вихідних дзвінків може використовуватися голосовий набір. Оскільки всі вироби Bluetooth сумісні між собою, вони можуть підбиратися для використання в автомобілі, незалежно від моделі, виробника і операційної системи.

Системи оплати. З використанням безпроводної технології Bluetooth можливе безпроводне з'єднання мобільних телефонів та інших видів портативних пристроїв, наприклад, з бензонасосом, що дозволяє замовляти необхідну кількість бензину певної марки. При цьому вартість бензину автоматично знімається з рахунку кредитної карти через телефон покупця. Безпроводна технологія Bluetooth може бути використана так само для оплати проїзду залізницею, метро, та інших видів громадського транспорту; при купівлі товарів в супермаркеті, квитків в кінотеатр, відвідання виставок, в музеях, оплати за паркування. При цьому економиться час покупців.

Організація відеоконференцій. При використанні безпроводної технології Bluetooth, організація відеоконференцій дуже спрощується, оскільки відпадає потреба в встановленні і комутації спеціального устаткування. Пристрої Bluetooth автоматично виявляють один одного і встановлюють безпроводне з'єднання.

13.2.1 Фізичний рівень Bluetooth 1.1, 1.2

Розширення спектру (п.2 таблиця 13.1)

У радіотракті використовується метод розширення спектру за допомогою частотних стрибків (Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS, або Псевдовипадкове Перестроювання Робочої Частоти - ППРЧ). При цьому загальна смуга частот ділиться на 79 фізичних підканалів шириною 1 МГц. Перестроювання частоти здійснюється шляхом зміни несучої частоти з одного підканалу на інший у відповідності із заданою в стандарті псевдовипадковою послідовністю.

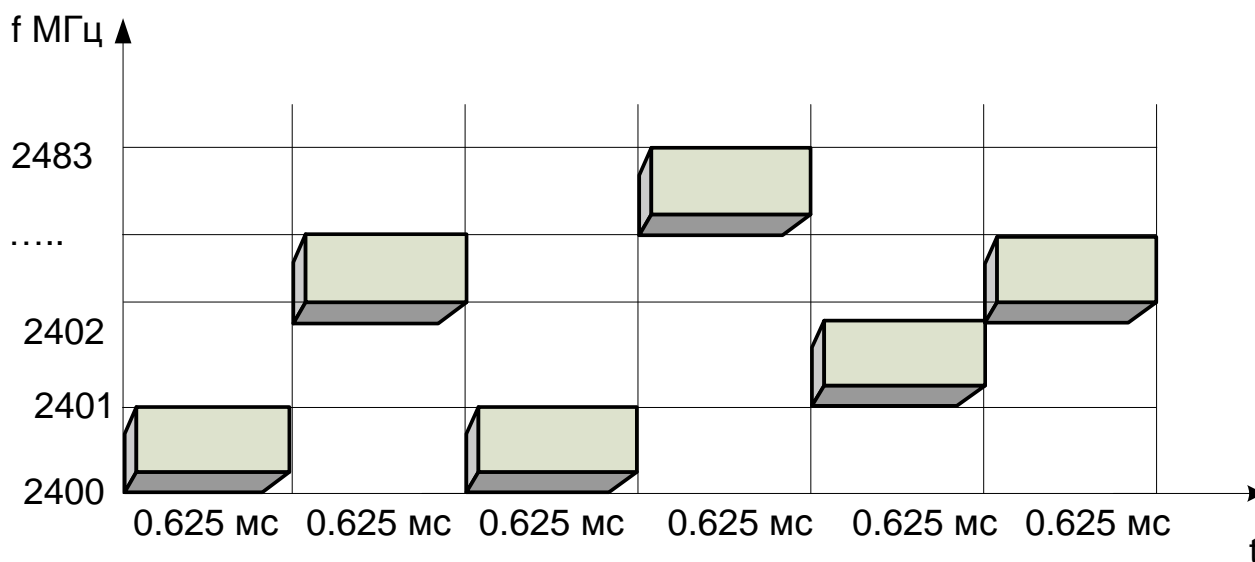


Рис.13.3 Використання методу FHSS в стандарті Bluetooth

Пристрої однієї пікомережі використовують загальну псевдовипадкову послідовність перестроювання частоти. Кожна послідовність задає свій фізичний канал. Тривалість передачі сигналу на одній частоті становить 0.625

мс. В цьому часовому вікні (слоті) здійснюється передача пакету даних. Швидкість зміни частотних підканалів становить $1/0.625 = 1600$ раз/с.

Для розділення мереж використовуються різні послідовності перестроювання частоти. Такий метод забезпечує конфіденційність і завадозахищеність передачі. Завадозахищеність забезпечується зміною підканалу передачі інформації для роботи на іншій частоті.

Типи логічних з'єднань

Протокол Bluetooth підтримує з'єднання типу “точка-точка” так і “точка-багатоточка”. Два, або більше пристроїв, які використовують один і той же канал утворюють пікомережу (piconet). Один з пристроїв працює як основний (master), а інші - як підлеглі. У одній пікомережі може бути до семи активних підлеглих пристроїв, при цьому решта підлеглих пристроїв знаходиться в стані "парковки", залишаючись синхронізованими з основним пристроєм.

Взаємодіючі пікомережі утворюють “розподілену мережу” (scatternet). У кожній пікомережі діє тільки один основний пристрій, проте підлеглі пристрої можуть входити в різні пікомережі. Крім того, основний пристрій однієї пікомережі може бути підлеглим в іншій рис.13.4.

Таким чином, в розподілену мережу можуть об'єднуватися максимально 256 Bluetooth-пристроїв, логічні зв'язки можуть утворюватися так, як це потрібно, і у разі потреби можуть змінюватися як завгодно. Проте, різні пікомережі, що входять в одну розподілену мережу, повинні мати різні канали зв'язку, тобто працювати на різних частотах і мати різні послідовності частотних стрибків. Частотні стрибки - це регулярна зміна частот, що відбувається в певній послідовності. У специфікації передбачено 10 варіантів таких послідовностей. В одній пікомережі всі пристрої синхронізовані по часу і частоті. Послідовність стрибків є унікальною для кожної пікомережі і визначається адресою і часом її основного пристрою. Довжина циклу псевдовипадкової послідовності – 227 елементів.

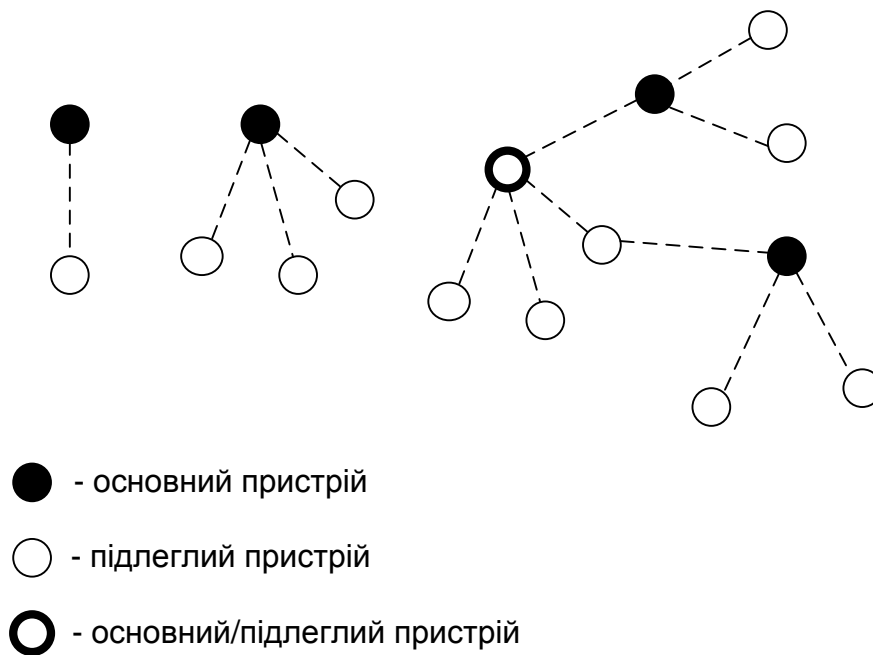


Рис.13.4 Можливі топології пікомережі Bluetooth

Автоматичне встановлення з'єднання між Bluetooth-пристроями, що знаходяться в межах досяжності є однією з найважливіших особливостей Bluetooth, тому перше, з чого починається робота Bluetooth-пристроїв в незнайомому оточенні - це пошук інших пристроїв Bluetooth. Для цього відсилається запит, і відповідь на нього залежить не тільки від наявності в радіусі зв'язку активних Bluetooth-пристроїв, але і від режиму в якому знаходяться ці пристрої. На цьому етапі пристрої можуть працювати в кількох режимах:

- виявлення - пристрої, що знаходяться в цьому режимі завжди відповідають на всі отримані ними запити.
- виявлення з обмеженнями - у цьому режимі знаходяться пристрої, які можуть відповідати на запити тільки обмежений час, або повинні відповідати тільки при дотриманні певних умов.
- без виявлення - пристрої, що знаходяться в цьому режимі, не відповідають на нові запити.

Якщо процес виявлення пристроїв пройшов нормально, то новий

Bluetooth-пристрій отримує набір адрес доступних Bluetooth-пристроїв, після чого з'ясовує імена всіх доступних пристроїв із списку. Кожний пристрій повинен мати свою глобально унікальну адресу, але на рівні користувача, зазвичай, використовується не ця адреса, а ім'я пристрою, яке може бути будь-яким, і йому не обов'язково бути глобально унікальним. Ім'я Bluetooth-пристрою може бути завдовжки до 248 байт, і використовувати кодову сторінку відповідно до Unicode UTF-8 (при використанні UCS-2, ім'я може бути скорочене до 82 символів).

Ще однією з найважливіших особливостей Bluetooth є автоматичне підключення Bluetooth-пристроїв до служб, що надаються іншими Bluetooth-пристроями. Тому, після формування списку імен і адрес, виконується пошук доступних послуг, що надаються різними пристроями. Для пошуку можливих послуг використовується спеціальний протокол виявлення послуг (Service Discovery Protocol - SDP).

Розділення дуплексних каналів (TDD) та множинний доступ з часовим розділенням каналів TDMA (п.5 таблиця 13.1)

У стандарті Bluetooth передбачено дуплексну передачу на основі часового розділення дуплексних каналів (Time Division Duplex - TDD). Основний пристрій передає пакети в непарні сегменти часу, а підлеглий пристрій - в парні (рис. 13.5).

Пакети залежно від довжини можуть займати до п'яти часових сегментів. При цьому, частота каналу не міняється до закінчення передачі пакету (рис. 13.6).

Синхронні та асинхронні канали

Протокол Bluetooth може підтримувати асинхронний канал даних, до трьох синхронних (з постійною швидкістю) голосових каналів, або канал з одночасною асинхронною передачею даних і синхронною передачею голосу [9]. Швидкість кожного голосового каналу - 64 Кбіт/с в кожному напрямі,

асинхронного в асиметричному режимі - до 723.2 Кбіт/с в прямому і 57.6 Кбіт/с в зворотному напрямках, або до 433.9 Кбіт/с в кожному напрямі в симетричному режимі.

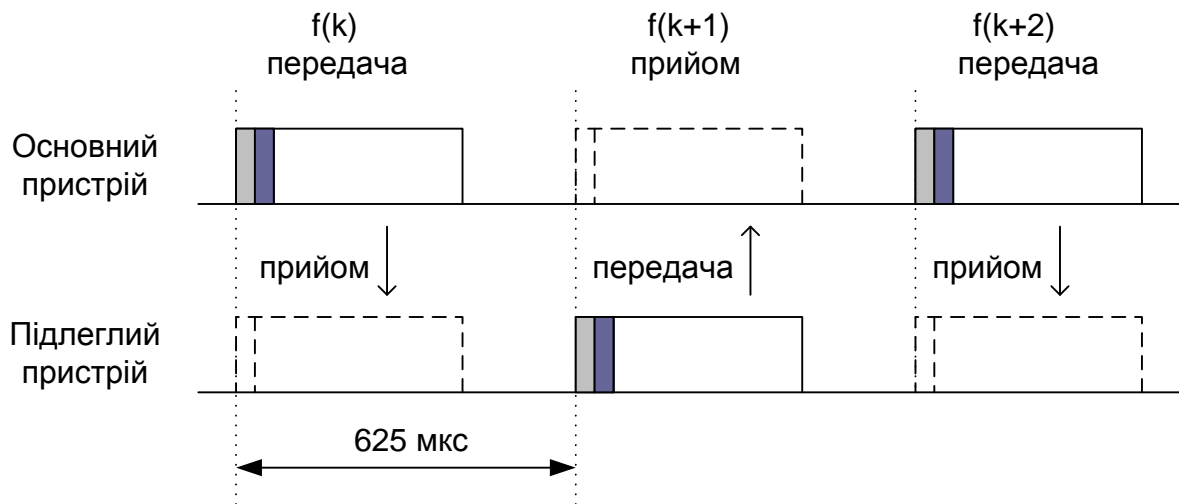


Рис.13.5 Дуплексна передача з часовим розділенням

Синхронне з'єднання (SCO) можливе тільки в режимі точка-точка. Такий спосіб зв'язку застосовується для передачі інформації, яка є чутлива до затримок, - наприклад, голосу.

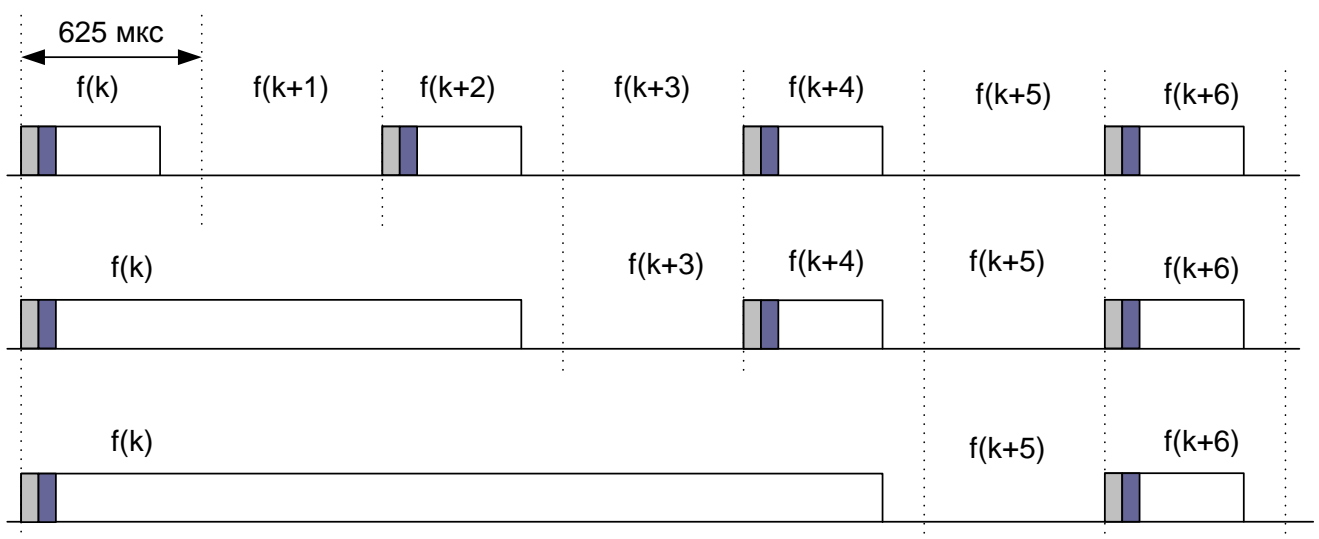


Рис.13.6 Передача пакетів різної довжини

Основний пристрій підтримує до трьох синхронних з'єднань, підпорядковане - до трьох синхронних з'єднань з одним основним пристроєм, або до двох - з різними основними пристроями. При синхронному з'єднанні основний пристрій резервує часові сегменти, які слідують через, так звані, SCO-інтервали. Навіть якщо пакет прийнятий з помилкою, повторно при синхронному з'єднанні він не передається.

При асинхронному зв'язку (ACL) використовуються часові сегменти, не зарезервовані для синхронного з'єднання. Асинхронне з'єднання можливе між основним і всіма активними підлеглими пристроями в пікомережі. Основний і підлеглий пристрої можуть підтримувати тільки одне асинхронне з'єднання. Оскільки в пікомережі може бути декілька підлеглих пристроїв, конкретний підлеглий пристрій відправляє пакет основному, тільки якщо в попередньому часовому інтервалі на його адресу прийшов пакет від основного пристрою. Якщо в адресному полі ACL-пакету адреса не вказана, пакет вважається "широкомовним" - його можуть приймати всі пристрої. Асинхронне з'єднання дозволяє повторно передавати пакети, прийняті з помилками.

В пакетах ACL використовуються різні формати даних. Можливі три варіанти: 80, 160 і 240 біт, решту біт використовується для корекції помилок. Через це варіант з 80 бітами є найнадійніший. При цьому дані повторюються три рази ($80 \cdot 3 = 240$). Фактично застосовується той же спосіб, що і у випадку заголовка. Поле даних пакету SCO завжди має 240 біт. Оскільки підлегли вузли можуть використовувати тільки непарні часові інтервали, їм дістається 800 інтервалів в секунду, стільки ж отримує і головний вузол. При 80 бітних даних в пакеті підлеглий вузол може передати їх із швидкістю 64 Кбіт/с. Цього цілком достатньо для мовного обміну. При самому ненадійному варіанті (240 біт даних в пакеті) можна мати три повнодуплексних мовних зв'язки. Це і обмежує максимальне число SCO з'єднань.

Структура пакету

Стандартний пакет Bluetooth містить код доступу довжиною 72 біти, 54-

бітовий заголовок та інформаційне поле довжиною не більше 2745 біт (рис. 13.7).

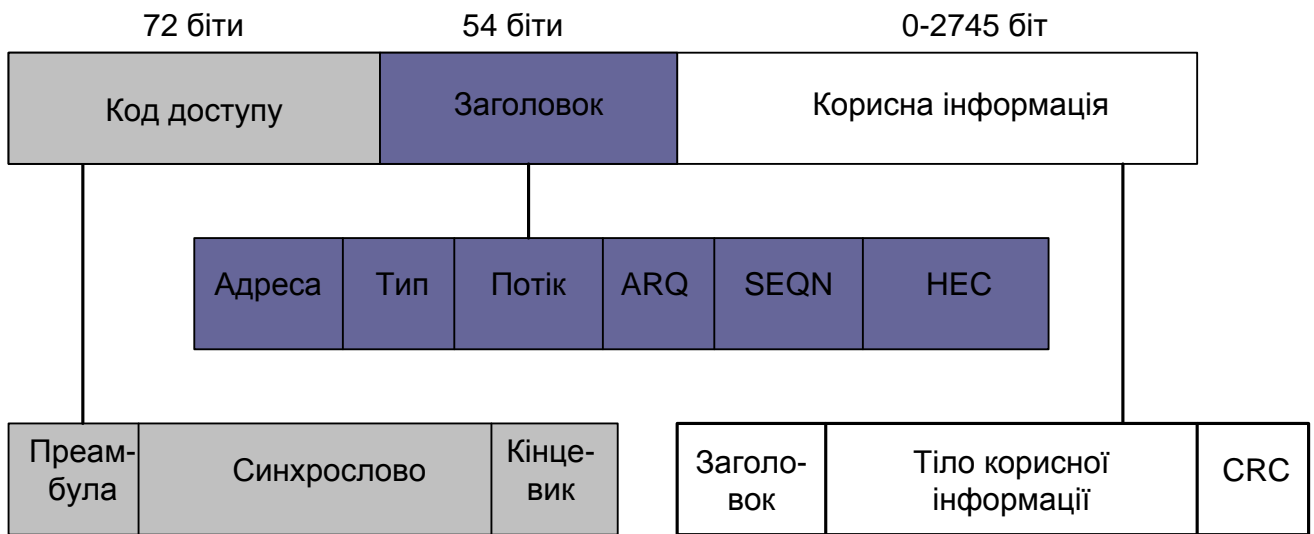


Рис.13.7 Структура пакету Bluetooth

Проте, пакети можуть бути різних типів. Наприклад, пакет може складатися тільки з коду доступу (у цьому випадку його довжина рівна 68 біт), або коду доступу і заголовку.

Код доступу ідентифікує пакети, що належать одній пікомережі, а також використовується для синхронізації і процедури запитів. Передбачено три типи кодів доступу: **CAC** (Channel Access Code - код доступу до каналу), **DAC** (Device Access Code) і **IAC** (Inquiry Access Code). Код доступу до каналу CAC ідентифікує пікомережу, тоді як DAC використовується для запитів з'єднання і для їх відгуків (paging). IAC служить для інформаційних запитів. Поле синхрослова (64 біти) складається з 24-бітової адреси вузла - ініціатора з'єднання (paging). Алгоритм його обчислення забезпечує велику відстань Хеммінга між різними синхрословами, що гарантує неможливість сплутання ідентифікаторів різних пристроїв навіть у разі прийому їх з помилками. Поле кінцевик служить для забезпечення балансування сигналу по постійному струму і синхронізації.

Заголовок. 8-бітовий заголовок кадру повторюється тричі ($18 \cdot 3 = 54$ біта),

він містить в собі прапорці підтвердження і нумерації, а також засоби управління потоком. Заголовок містить інформацію для управління зв'язком і складається з шести полів:

- адреса (MAC-адреса 3 біти) - адреса активного елемента, вказує один із восьми вузлів, якому призначений пакет;
- тип (4 біти) - код типу даних, характеризує тип пакету, який передається (ACL, SCO, опитування, або пустий пакет);
- потік (1 біт) - управління потоком даних, показує готовність пристрою до прийому;
- ARQ (1 біт) - підтвердження правильного прийому, якщо встановлена 1, пакет правильний;
- SEQN (1 біт) - служить для визначення послідовності пакетів, для кожного пакету цей біт інвертується. Даний протокол дозволяє очікування, тому одного біта виявляється достатньо;
- НЕС (8 біт) - контрольна сума, приймальна сторона аналізує всі 3 прийняті копії біт за бітом, і значення біта визначається мажоритарною схемою (2, або 3 однакових біти визначають правильний біт).

Корисна інформація. Завершальною частиною загального формату пакету є корисна інформація. У цій частині є два типи полів: поле голосу (синхронне) і поле даних (асинхронне). ACL пакети мають тільки поле даних, а SCO пакети - тільки поле голосу. Виключенням є пакет даних і голосу (Data Voice - DV), який має обидва поля. Поле даних складається з трьох сегментів: заголовку корисної інформації, тіла корисної інформації та можливе використання CRC коду.

- Заголовок корисної інформації (8 біт). Тільки поля даних мають заголовок корисної інформації. Він визначає логічний канал, управління потоками в логічних каналах, а також має вказівник довжини корисної інформації.

- Тіло корисної інформації (0÷2721 біт). Тіло корисної інформації включає призначену для користувача інформацію. Довжина цього сегменту вказується в полі довжини заголовку корисної інформації.
- CRC (16 біт). В інформації, яка передається, обчислюється 16-бітний циклічний надлишковий код (CRC), після чого він прикріплюється до інформації.

Специфікація Bluetooth 1.2

Все вищесказане відноситься до базової специфікації Bluetooth 1.1, прийнятої наприкінці лютого 2001 року. Проте, вже 5 листопада 2003 року з'явилася версія Bluetooth 1.2. Вона містила ряд змін і доповнень, серед яких є:

- пришвидшене встановлення з'єднання;
- адаптивна схема перемикання каналів (можна задавати менше ніж 79, але не менш 20 каналів, між якими відбувається переключення при FHSS);
- розширені синхронні з'єднання (з'являється режим розширення синхронних з'єднань eSCO, у якому за виділеним вікном для синхронного з'єднання треба додаткове вікно для повторної передачі);
- удосконалені алгоритми виявлення помилок, контролю потоків і поліпшені схеми синхронізації.

Протоколи верхніх рівнів

Протоколи верхніх рівнів реалізуються програмно. Основні протоколи взаємодії, які входять в Bluetooth (рис.13.8):

- протокол управління з'єднанням (Link manager protocol), використовується для встановлення зв'язку, управління та захисту інформації;
- протокол управління логічним з'єднанням та адаптації (Logical link control and adaptation protocol L2CAP), забезпечує мультиплексування сегментацію пакетів;
- протокол визначення служб (SDP), дозволяє встановити тип і

характеристики пристрою;

- протокол RFCOMM базується на стандарті ETSI TS 07.10, підтримує інтерфейс RS-232, забезпечує емуляцію послідовного порту;
- протокол управління телефонією (TCS), використовується для організації з'єднання між пристроями для передачі даних і голосу;
- протокол обміну даними OBEX є основою для роботи застосувань користувача через канал Bluetooth.

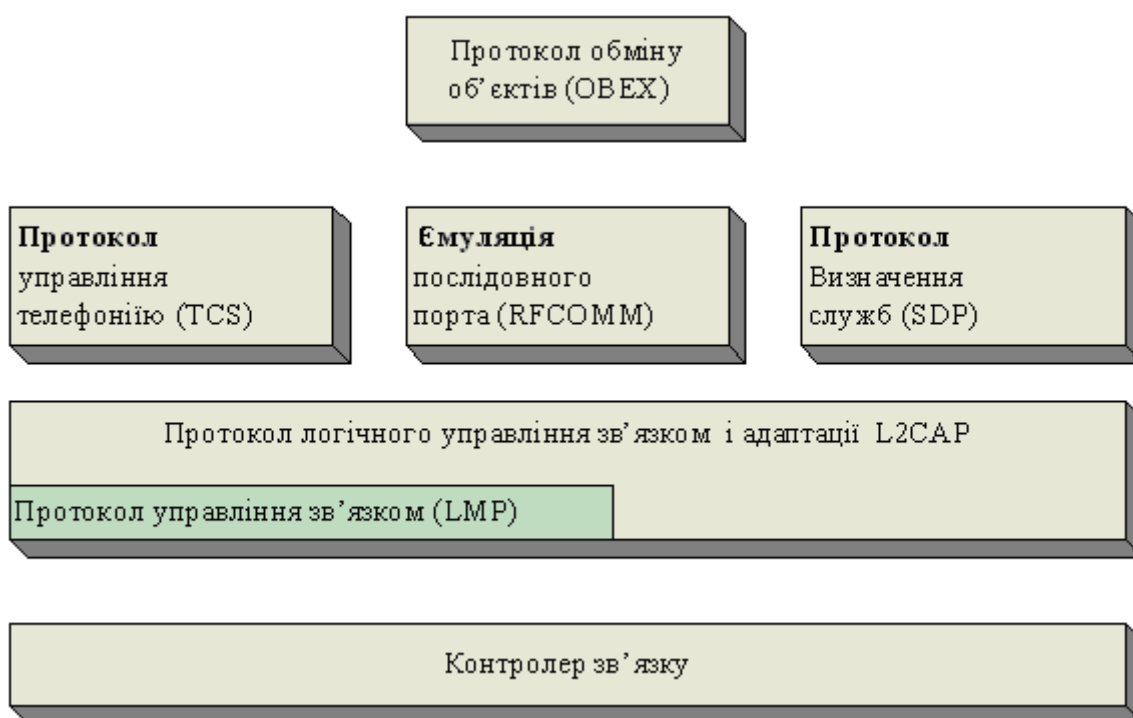


Рис.13.8 Основні протоколи Bluetooth

Безпека

Як і для всіх радіо-засобів зв'язку, проблема безпеки в Bluetooth є актуальною. Безпека протоколу забезпечується за допомогою механізму аутентифікації і шифрування даних, які передаються. Ключ авторизації має довжину 128 біт. Довжина ключа шифрування може бути в межах 8÷128 біт. Крім цього, з метою безпеки використовуються ключі з'єднання (link key), які можуть бути напівпостійними і тимчасовими. Перші зберігаються в незалежній пам'яті, другі - оновлюються при кожному з'єднанні. Пристрій може генерувати

свій ключ (unit key). Можливе формування сумісного ключа (combination key), при його обчисленні використовуються інформація від обох учасників майбутнього обміну. Особливе місце займає майстер-ключ (master key), який використовується для розсилки даних декільком вузлам одночасно (використовується замість поточного ключа з'єднання (current link key)). Для виконання аутентифікації пристрою потрібно отримати від іншого учасника випадкове число, сформувати на основі нього і свого BD_ADDR деякий код і відіслати його учаснику зв'язку, який перевіряє його коректність. Якщо загальний ключ не згенерований, формується ключ ініціалізації. Ініціатор процедури посилає іншому учаснику випадкове число, яке у поєднанні з ідентифікатором BD_ADDR останнього утворює ключ ініціалізації.

Залежно від завдань, які необхідно виконати, передбачено три режими захисту в яких може працювати пристрій Bluetooth:

- Режим захисту 1 - пристрій не може самостійно ініціювати захисні процедури.
- Режим захисту 2 - пристрій не ініціює захисні процедури поки не встановлено і не налаштовано з'єднання. Після того, як з'єднання встановлене процедури захисту обов'язкові, і визначаються типом і вимогами служб, які використовуються.
- Режим захисту 3 - захисні процедури ініціюються в процесі встановлення і налаштування з'єднання. Якщо віддалений пристрій не може задовольнити вимог захисту, це з'єднання не встановлюється.

13.2.2. Фізичний рівень Bluetooth 2.0 EDR

Нещодавно з'явилася остання версія Bluetooth 2.0 + EDR. Як видно з назви, вона складається із двох частин, які можуть підтримуватися апаратно незалежно - це оновлена версія специфікації 2.0 (не містить принципових відмінностей від 1.2) і розширений набір швидкостей передачі даних EDR (Enhance Data Rate).

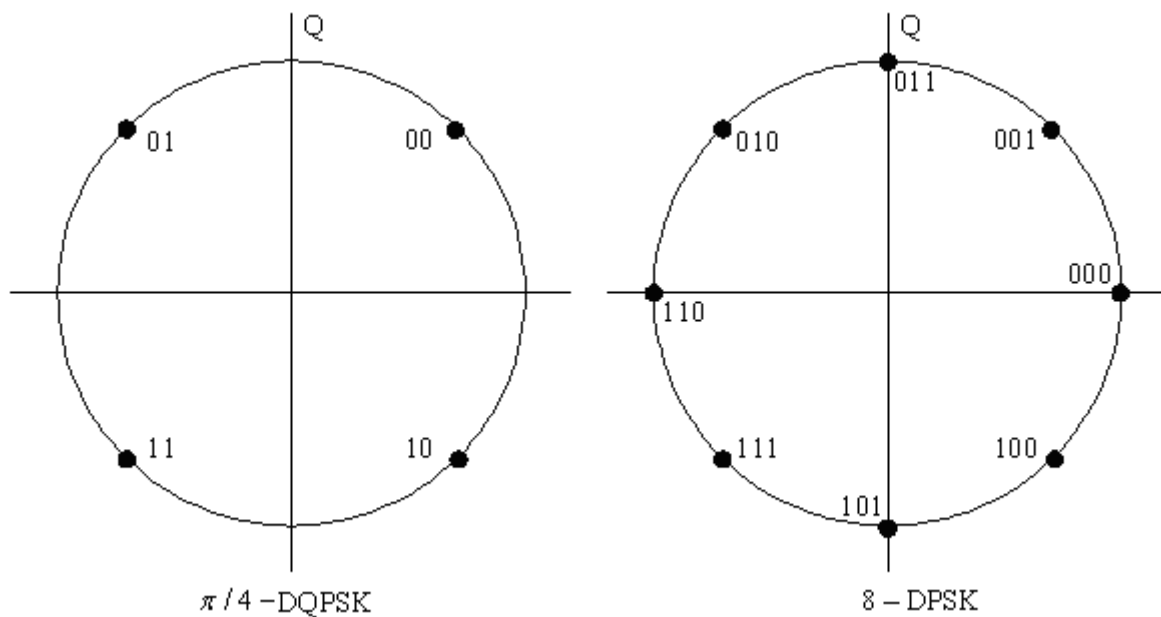


Рис.13.9 Модуляційні символи в режимі EDR

Швидкість передачі в пристроях, що підтримують базові специфікації Bluetooth (1.1., 1.2. і 2.0.) складає 1 мегабіт за секунду (Мб/с). У пристроях, що підтримують специфікацію Bluetooth 2.0. і розширення EDR, швидкість передачі може складати, у залежності від використовуваного типу модуляції, 2 чи 3 Мб/с. Відповідно, ці режими визначаються як режими основної і розширеної швидкості передачі даних.

Швидкість передачі в пристроях, що підтримують базові специфікації Bluetooth (1.1., 1.2. і 2.0.) складає 1 мегабіт за секунду (Мб/с). У пристроях, що підтримують специфікацію Bluetooth 2.0. і розширення EDR, швидкість передачі може складати, у залежності від використовуваного типу модуляції, 2 чи 3 Мб/с. Відповідно, ці режими визначаються як режими основної і розширеної швидкості передачі даних.

Нововведення Bluetooth 2.0/EDR

Коротко розглянемо ті нововведення, що дозволяють розробникам розраховувати на ріст популярності нового стандарту:

- Enhanced Data Rate (EDR). З однієї сторони є багато застосувань, яким при будь-яких обставинах вистачить швидкості 721 Кбіт/с, яку надають версії

1.x, з іншого боку - є мультимедійні задачі, які вимагають більшої швидкості передачі. Швидкість 2.1 Мбіт/с яку надає нова версія Bluetooth, все ще є низькою, але типових мультимедійних задач її майже достатньо. Потрібно враховувати, що розробники Bluetooth SIG були сильно обмежені вимогами до енергоспоживання та вартості, що були і залишаються найбільш пріоритетними для даного стандарту. У Bluetooth 1.x використовується одна з найбільш примітивних схем модуляції - GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying), простота якої була дуже приваблива для розробників у 1998 році, коли навіть швидкість 721 Кбіт/с здавалася надлишковою. У Bluetooth 2.0/EDR використовується кілька альтернативних схем модуляції, завдяки яким швидкість передачі даних зростає майже втричі. При цьому, GFSK продовжує підтримуватися для сумісності.

- Відсутність стрибків частоти. У Bluetooth версії 1.x зв'язок може здійснюватися одним з 79 частотних каналів. Щоб уникнути перешкод від інших пристроїв, що працюють у тій же діапазоні частот, канали міняються 1600 разів у секунду. Це досить просте рішення, а крім того, у 1998 році такий протокол міг розглядатися як непоганий апаратний захист зв'язку від злоумисників. До негативних рис такого механізму відносяться більш повільний зв'язок і труднощі в удосконаленні стандарту. У версії Bluetooth 2.0 для захисту від перешкод використовується більш сучасний механізм, що дозволяє повніше використовувати можливості стандарту.
- Підтримка Multi-cast. У персональних мережах часто виникає необхідність передавати ті самі дані декільком пристроям в той самий час. Bluetooth 1.x передбачав багаторазову передачу цих даних по черзі, для кожного пристрою. Це дуже ускладнювало роботу в реальному часі з такими задачами, як спільне прослуховування аудіо на декількох Bluetooth-навушниках, комп'ютерні ігри з декількома учасниками, що синхронізуються по Bluetooth. Крім того, це просто сповільнює роботу, оскільки щоразу треба заново встановлювати зв'язок з новим пристроєм,

що забирає деякий час. У Bluetooth 2.0 передбачена можливість одночасного відправлення декільком пристроям тих самих даних. Ця можливість називається "Multi-cast".

- Система QoS (Quality of Service). При використанні інтерфейсу Bluetooth для зв'язку з декількома пристроями одночасно виникають небажані затримки. Їх можна було б уникнути, якби потоки даних були краще організовані. Специфікація Bluetooth 2.0 передбачає спеціальний механізм QoS (Quality of Service), що забезпечує взаємодію пристроїв з мінімальною кількістю затримок. Пристрої, що підтримують QoS, взаємодіють між собою для узгодження вимог щодо якості зв'язку. Таким чином, без підвищення реальної швидкості передачі даних, вдається усунути ефект пригальмовування, що так дратує користувачів.
- Розподілений контроль доступу до середовища. Модель мережі в ранніх версіях Bluetooth була дуже проста. Мережа містить один головний і від одного до семи підлеглих пристроїв. Дані можуть передаватися тільки між головним ("master") і підлеглим ("slave") пристроями. При цьому, головний пристрій контролює доступ пристроїв до середовища передачі даних. Якщо головний пристрій з якоїсь вийде з ладу мережа не зможе функціонувати. У Bluetooth 2.0 з'явився новий протокол, що передбачає розподілений контроль за доступом до середовища передачі усуваючи недолік використання тільки одного головного пристрою. Крім того, у Bluetooth 2.0 максимальний розмір мережі збільшений з 8 до 256 пристроїв. У версіях 1.x для збільшення мережі передбачався досить незручний механізм об'єднання простих Bluetooth-мереж ("piconet") в одну велику мережу ("scatternet"). При цьому, один пристрій був головним в одній простій мережі і підлеглим в іншій. У версії 2.0 від 1 до 255 підлеглих пристроїв з'єднуються з одним головним.
- Посилене енергозбереження. Ріст швидкості передачі даних у Bluetooth 2.0 привів до росту споживання потужності. Однак, споживання потужності виросло не так сильно, як швидкість, тому загальні витрата

енергії на передачу того самого обсягу даних помітно скоротився. Краща організація роботи з даними також вплинула на енергоспоживання у бік його скорочення. Наприклад, використання одночасної передачі даних декільком пристроям є ощадливішою, ніж передача цих даних кожному пристрою окремо.

- Зворотна сумісність з попередніми версіями. Специфікація Bluetooth версії 2.0 передбачає повну сумісність із усіма попередніми версіями. Пристрій, що підтримує новий стандарт, здатний обмінюватися даними з пристроями усіх версій, навіть якщо вони об'єднані в одну мережу. При цьому, з новими пристроями буде йти обмін даними на підвищеній швидкості 2.1 Мбіт/с, а зі старими - 721 Кбіт/с.

У листопаді 2004 року Bluetooth SIG випустила специфікацію Bluetooth 2.0+EDR (Enhanced Data Rate). Компанії Broadcom, CSR, і RF Micro Devices зробили тестування прототипів 2.0+EDR і практично відразу ж почали серійний випуск чіпів. Однак швидкого витіснення версій 1.x з ринку не почалося. Першим пристроєм з підтримкою Bluetooth 2.0+EDR став не телефон (як можна було припустити), а ноутбук від компанії Apple.

Розробка версії Bluetooth 2.0+EDR передбачала досягнення таких цілей:

- надання більших швидкостей передачі порівняно із попередніми версіями стандарту, зручності користування персональними мережами
- використання стандарту як “універсального” - використовувати його не тільки в персональних мережах, а і для інших застосувань.

Постійний ріст кількості Bluetooth-пристроїв може викликати збільшення розміру персональних мереж, де всі пристрої можуть працювати одночасно, заважаючи один одному. Bluetooth 1.x не готовий обслуговувати потреби таких мереж. Якщо Bluetooth SIG хоче і далі представляти стандарт, що випереджає свій час, їй потрібно щось краще, ніж 1.x.

Стандарт Bluetooth 1.x зараз широко застосовується для персональних

мереж та для вирішення ряду інших задач (, сенсорів та ін.). В цих областях ринку із стандартом Bluetooth 1.x конкурує Wi-Fi і Zigbee.

Розширений набір швидкостей означає, що, крім базової швидкості 1 Мбіт/с, можливий обмін зі швидкостями 2 і 3 Мбіт/с. Збільшення швидкості передачі відбувається за рахунок зміни методів модуляції. У базовій версії використовується частотна модуляція з фільтром Гаусса (GFSK), з одним бітом на модуляційний символ. Швидкість модуляції при цьому дорівнює швидкості потоку даних і становить 1 Мбіт/с. В режимі EDR застосовується диференціальна фазова модуляція $\pi/4$ -DPSK і 8-DPSK (рис. 13.9), у яких один модуляційний символ представляє відповідно два і три біти (модуляція називається диференціальною, оскільки зміна фази відбувається щодо попереднього символу). У результаті при тій же швидкості модуляції 1 Мбіт/с швидкість передачі даних становить 2 і 3 Мбіт/с. Режим EDR можливий не тільки при асинхронному з'єднанні, але й у розширеному синхронному (eSCO).

Застосування та перспективи

У безпроводної технології Bluetooth велике майбутнє. Її інтеграція з Інтернетом може стати якісно новим етапом в розвитку мережевої інфраструктури, внаслідок таких особливостей:

- невеликий радіус дії, означає невелику потужність передавача та низьке її споживання;
- висока стійкість до завад та відсутність впливу Bluetooth-пристроїв на побутову техніку;
- низька вартість.

Незважаючи на свої переваги стандарт Bluetooth, як мережевий, сьогодні використовується дуже рідко. Причинами цього можна вважати те, що він є новою технологією та дуже універсальний (недостатня швидкість передачі для вимогливих задач, зависока вартість обладнання для простих задач).

Щоб вирішити ці протиріччя та стандартизувати персональні мережі було розроблено два нових стандарти передачі даних: IEEE 802.15.3, IEEE 802.15.4.

13.3. Високошвидкісні мережі стандартів IEEE 802.15.3/3a

Призначення

Стандарт IEEE 802.15.3 описує роботу малої БСПІ – пікомережі (piconet). Пікомережа в стандарті IEEE 802.15.3 – це так звана ad-hoc – система, в якій декілька незалежних пристроїв можуть безпосередньо взаємодіяти один з одним. Радіус зони дії одної пікомережі, як правило, не перевищує 10 м. Основні вимоги до неї – висока швидкість передачі даних, проста інфраструктура, простота встановлення з'єднання і входження в мережу, наявність засобів захисту даних і надання для визначених типів даних з'єднання з гарантованими параметрами передачі (гарантія якості передачі QoS).

Швидкість передачі для мереж IEEE 802.15.3 становить 11÷55 Мбіт/с. Специфікацію IEEE 802.15.3 не встигли затвердити (а сталося це 12 червня 2003 року), як весь телекомунікаційний світ став очікувати появу нового стандарту – IEEE 802.15.3a. Мова йде про розробку принципів побудови пікомережі зі швидкістю обміну 110÷480 Мбіт/с і вище – до 1320 Мбіт/с.

13.3.1. Мережі стандарту IEEE 802.15.3

Структура

Пікомережа (рис. 13.10) може об'єднувати декілька пристроїв, один з яких виконує функції керування (координатор пікомережі – Piconet Coordinator, PNC). Стандарт також передбачає можливість формування так званих дочірніх пікомереж і описує взаємодію між незалежними сусідніми пікомережами.

Обмін даними в мережі

В пікомережі можливий обмін як асинхронними, так і ізохронними (потоківими) даними.

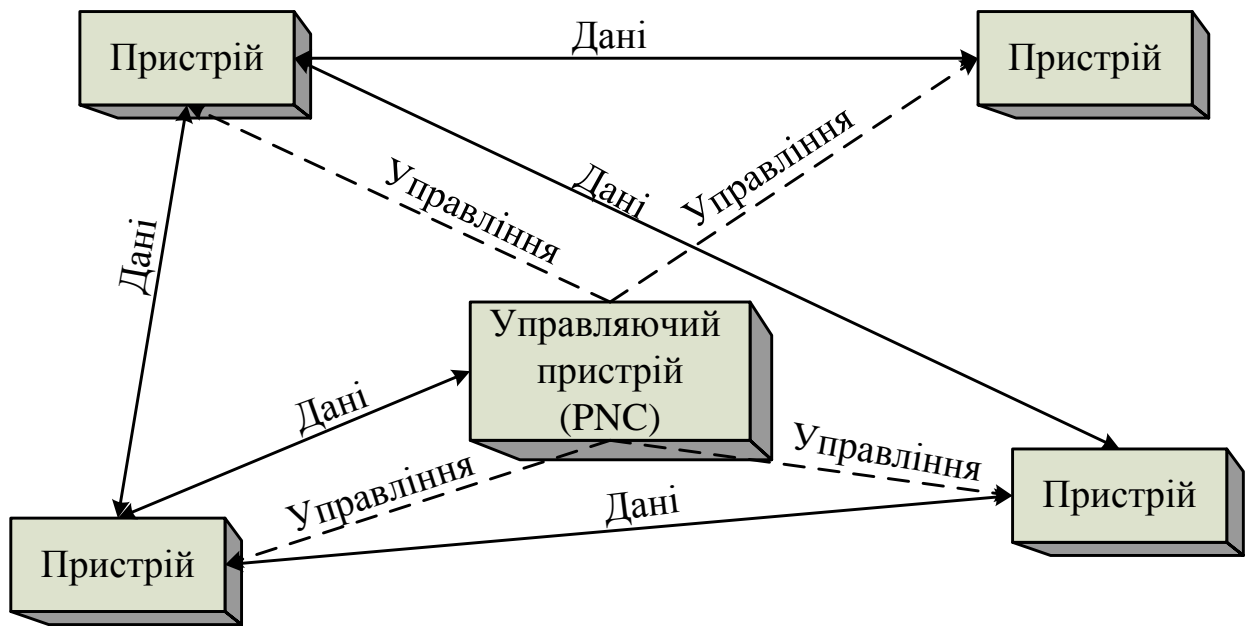


Рис.13.10 Структура пікомережі

До останніх відносяться, наприклад, звук і відео. Весь інформаційний обмін в пікомережі базується на використанні послідовності суперкадрів (superframe – термінологія стандартів IEEE 802.15). Кожен суперкадр (рис. 13.11) включає управляючий сегмент (beacon), інтервал конкурентного доступу (Contention Access Period - CAP) і набір часових інтервалів (каналів), назначених визначеним пристроям. PCN визначає границі всіх інтервалів і розподіляє канали між пристроями.

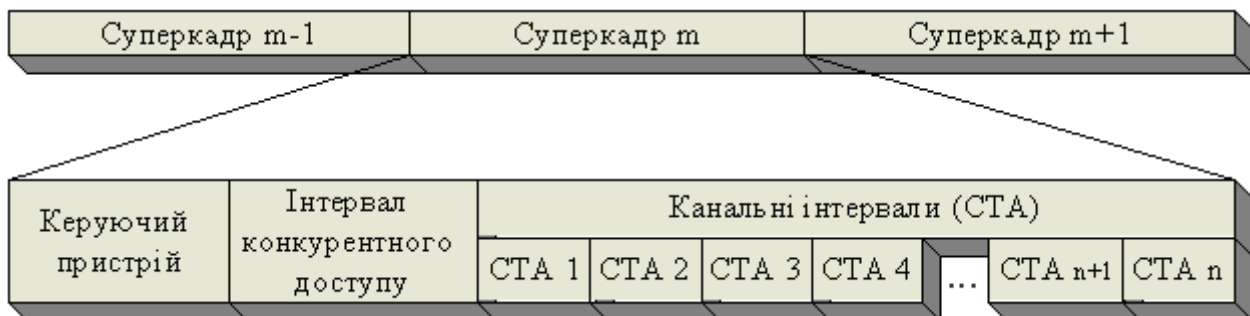


Рис.13.11 Структура суперкадру

Під час CAP доступ до каналу надається на основі механізму контролю несучої із запобіганням колізії – CSMA/CA (як і в стандарті IEEE 802.11), тобто хто перший встиг зайняти канал, той і працює. В цей період передаються

команди, або асинхронні дані.

Канальні інтервали (СТА) координатор пікомережі назначає кожному пристрою, або групі пристроїв за попереднім запитом з їхньої сторони. В керуючому сегменті задається момент початку і тривалість кожного СТА. Призначення канального інтервалу для будь-якого пристрою означає, що ніхто інший в цей момент не може працювати на передачу. СТА можуть динамічно розподілятися в суперкадрі (для асинхронних та ізохронних даних), або бути фіксованими (тільки для ізохронних даних).

Фізичний канал

Специфікація фізичного каналу в документі IEEE 802.15.3 наведена лише для діапазону 2400-2483,5 МГц. Вона передбачає п'ять допустимих швидкостей передачі (таблиці 13.3). Швидкість 22 Мбіт/с являється базовою, її повинні підтримувати всі пристрої IEEE 802.15.3. При роботі на цій швидкості дані не кодуються. В інших випадках дані перед формуванням модуляційних символів кодуються за допомогою згорткового кодера з трьохзарядним регістром зсуву (так звана модуляція посередництвом решіткового коду з вісьма станами). При цьому в кодері до вихідного набору з 1/3/4/5 біт (при QPSK/16-QAM/32-QAM/64-QAM) додається кодовий біт з виходу трьохрозрядного регістру зсуву.

Таблиця 13.3 Модуляція та швидкість передачі даних в мережах IEEE 802.15.3 в діапазоні 2.4 ГГц

Тип модуляції	Швидкість передачі даних, Мбіт/с
QPSK	11
DQPSK	22
16-QAM	33
32-QAM	44
64-QAM	55

Стандарт IEEE 802.15.3 вимагає, щоб пристрої могли працювати в будь-

якому із п'яти можливих частотних каналів (таблиця 13.4). Причому, передбачається два каналних плани – режим високої густини (чотири канали в допустимому діапазоні) і режим сумісності з мережею стандарту IEEE 802.11b (три дозволених канали). Це означає, що кожен пристрій перед початком роботи сканує діапазон, знаходить вільні канали, визначає наявність робочої мережі IEEE 802.11b.

Таблиця 13.4 Розподіл каналів в мережах IEEE 802.15.3

Номер каналу	Центральна частота, МГц	Режим високої щільності	Режим сумісності з IEEE 802.11b
1	2412	+	+
2	2428	+	
3	2437		+
4	2445	+	
5	2462	+	+

13.3.2. Мережі стандарту IEEE 802.15.3a

Досягнути високих швидкостей в даному стандарті можна тільки збільшуючи спектральну ширину каналу, переходячи в область так званого широкосмугового зв'язку (UWB). В США це стало можливим після 14 лютого 2002 року, коли федеральна комісія зв'язку (FCC) США дозволили використання надширокосмугових пристроїв всередині приміщень в діапазоні 3100÷10600 МГц при максимальній густині потужності випромінювання $7,41 \cdot 10^{-14}$ Вт/Гц (- 41,3 дБп/МГц).

В результаті в 2002 році утворилась дослідницька група Tg3a, в яку увійшли представники практично всіх найбільших напівпровідникових і телекомунікаційних фірм. Згодом з'явилися дві конкурентні пропозиції щодо технології НШС-передачі – на основі ортогональних кодів (так званий мультисмуговий множинний доступ з використанням ортогональних несучих, MB-OFDM) і шляхом розширення спектру сигналу методом прямої

послідовності (DS-UWB). Першу пропозицію підтримувало більшість фірм на чолі з гігантами Texas Instruments і Intel (в березні 2003 року було створено навіть спеціальне об'єднання MBOA – Multiband OFDM Alliance). Групу прихильників другої пропозиції очолили компанії Motorola і XtremeSpectrum. Згідно прийнятих в комітеті IEEE 802 правил, для того щоб затвердити стандарт, за запропонований варіант повинні проголосувати не менше 75% членів робочої групи. Однак, незважаючи на чисельну перевагу прихильників MB-OFDM, а в MBOA входить 170 компаній, серед яких 9 із 10 найбільших напівпровідникових компаній (крім TSMC) на попередніх голосуваннях їм не вдалось набрати необхідні 75% голосів від загального числа компаній, працюючих над 802.15.3a. Причин тут декілька. Можливо, одна із основних пов'язана із технологією MB-OFDM.

Суть її полягає в тому, що весь дозволений діапазон ділиться на смуги шириною 528 МГц. В стандартному режимі передбачено три смуги, в розширеному – сім (рис. 13.12). Кожна смуга, в свою чергу, ділиться на 128 піднесучих частот з кроком 4,125 МГц. З них використовується 122: 100 для модуляції даних, 12 піднесучих – пілотні і ще 10 – захисні. Кожна піднесуча модулюється з використанням QPSK. Один OFDM-символ включає 100, або 200 кодованих біт (100 у випадку, коли однаково модулюються дві під несучі, симетричні відносно центральної). Період передачі символів – 312,5 нс. Вище викладене стосується звичайної OFDM. Мультисмуговість означає, що наступний символ може передаватися в іншій частотній смузі по жорстко визначеній схемі для кожного логічного каналу.

Послідовність переходу з однієї смуги частот на іншу називають частотно-часовим кодом. Поки передбачено чотири таких коди (канали).

Крім переходу з частоти на частоту, передбачений режим, коли один символ може передаватися декілька разів (два, або чотири). Наприклад, код 1-2-3-1-2-3 означає, що перший OFDM-символ передається в смугах 1 і 2, другий OFDM-символ – в смугах 3 і 1, третій – в смугах 2 і 3.

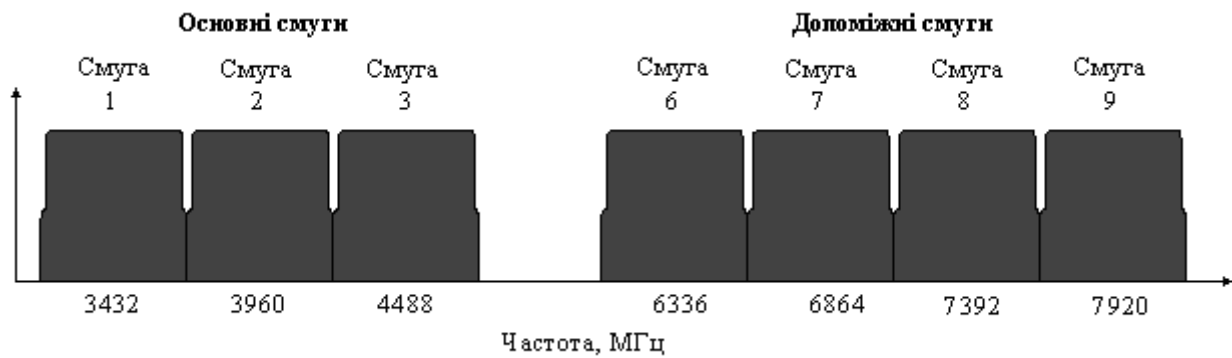


Рис.13.12 Розподіл каналів в стандарті IEEE 802.15.3a

Обмін інформацією відбувається кадрами (пакетами). Кадр складається із преамбули (набору синхронізуючих послідовностей), заголовку (керуюча інформація) і поля даних. Преамбула і заголовок завжди транслюються з найменшою із можливих швидкостей – 55 Мбіт/с. Чотири логічних канали вказують на те, що в безпосередній близькості можуть працювати в крайньому випадку чотири пікомережі. Для цього кожному логічному каналу відповідає унікальний вигляд синхропослідовності в преамбулі.

Таблиця 13.5 Частотно-часові коди

Номер логічного каналу	Режим трьох смуг	Режим семи смуг
1	1-2-3-1-2-3	1-2-3-4-5-6-7
2	1-3-2-1-3-2	1-7-6-5-4-3-2
3	1-1-2-2-3-3	1-4-7-3-6-2-5
4	1-1-3-3-2-2	1-3-5-7-2-4-6

Таким чином пропонується комбінація OFDM і відомого механізму частотних стрибків (FH). В результаті, залежно від швидкості кодування і числа повторів символів формується спектр швидкостей від 55 до 480 Мбіт/с. Змінюючи вид модуляції, можна досягнути і більших швидкостей. Так, використання 16-QAM при цій же схемі кодування дасть вже $480 \cdot 2 = 960$ Мбіт/с. Інший спосіб роботи полягає у використанні для передачі одночасно трьох діапазонів – тоді при QPSK і швидкості кодування $3/4$ досягається

швидкість $480 \cdot 3 = 1440$ Мбіт/с. Проблема в тому, що метод частотних стрибків – не найефективніший з точки зору використання спектрального діапазону. Опоненти MB-OFDM вказують, що прихильники цієї технології в своїх вимірюваннях середньої потужності випромінювання передавача усереднюють її по часовому інтервалі порядку 1 мс. Цей час відповідає довжині трьох символів. Реально ж при використанні механізму повторів (і при вимірюванні) символ в одному субканалі передається лише один раз. В результаті густина потужності випромінювання при роботі передавача може перевищувати допустиму (Федеральною комісією зв'язку США) норму – 41,3 дБп/МГц. А це вже серйозна проблема, оскільки мова іде про сигнал зі смугою вище 500 МГц.

Прихильники технології DS-UWB пропонують для розширення спектру класичний метод прямої послідовності. При цьому кожен біт замінюється спеціальною кодовою послідовністю довжиною до 24 біт. Передбачено два види модуляції – двійкова фазова BPSK (один біт на символ) і так звана QPSK-модуляція (модуляція на основі чотирьох ортогональних двійкових кодів). QPSK – фактично варіант квадратурної модуляції, один QPSK-символ містить два біти.

Весь діапазон мовлення розбитий на дві зони: $3,1 \div 4,85$ ГГц (нижній діапазон) і $6,9 \div 9,7$ ГГц (верхній діапазон). В кожному діапазоні передбачено шість каналів пікомережі (з кроком 39 МГц в нижньому діапазоні починаючи з 3,9 ГГц і з кроком 78 МГц – у верхньому починаючи з 7,8 ГГц). Лише чотири канали нижнього діапазону з центральними частотами 3939, 3978, 4017 і 4056 МГц вважаються обов'язковими для підтримки кожним пристроєм, інші канали – додаткові. Частота передачі модуляційних символів в кожному каналі рівна $1/3$ його центральної частоти. В залежності від швидкості попереднього кодування, виду модуляції і довжини кодової послідовності швидкість передачі даних може складати 28, 55, 110, 220, 500, 660, 1000 і 1320 Мбіт/с.

Відмітимо, що дебати прихильників двох підходів щодо реалізації НШС-пікомереж тривають з 2003 року. Виробники великих інтегральних мікросхем готові розпочати випуск необхідних компонентів (а деякі вже почали) і

ситуація повинна найближчим часом вирішитись. Тим більше, що вже з'являються пропозиції, об'єднати ці дві технології і без особливих витрат виготовляти двохмодові пристрої, які підтримуватимуть MB-OFDM і DS-UWB.

Недавно з'явилися перші чіпсети стандарту IEEE 802.15.3. Так Freescale Semiconductor, дочірня компанія фірми Motorola, випустила чіпсет XS110 з трьох мікросхем – трансівера з ВЧ-трактом, baseband-процесора (комунікаційний процесор, який виконує всі перетворення фізичного рівня, включаючи ЦАП/АЦП) і MAC-контролера. Максимальна швидкість, яка забезпечується модемом на основі цього чіп сету – 114 Мбіт/с (тобто мова йде про версії стандарту на основі технології DS-UWB). Енергія, яку використовує чіпсет- 750 мВт, напруга живлення – 3,3 В. Загальна потужність випромінювання в смузі частот 3,1÷10,6 ГГц – менше 1 мВт. Мікросхеми виготовлені на основі 0,18 мкм КМОП- і SiGe-технології.

13.4. Стандарт 802.15.4 (ZigBee)

Загальні зауваження

На даний момент у світі існує більше десятка різних стандартів безпроводного зв'язку. Кожен стандарт безпроводного зв'язку призначений для виконання певного кола завдань, має свої недоліки та переваги. Серед основних завдань, які намагалися вирішити розробники згаданих стандартів було обслуговування великої кількості абонентів, збільшення швидкості передачі даних та ін. Сучасні системи зв'язку розроблені для задоволення потреб телефонії, мультимедіа, надання доступу до Інтернет та інших високошвидкісних послуг. Але для промислових, або домашніх потреб достатньо мати систему передачі даних, яка повинна обслуговувати невелику територію та забезпечувати швидкість 1÷32 Кбіт. Такої швидкості достатньо для прийому даних від різних давачів, сенсорів, побутових пристроїв, обміну даними між вузлами в персональній мережі. Також є ряд пристроїв з якими відбувається обмін інформацією і вони працюють від автономного живлення. Тому була розпочата робота над створенням стандарту зв'язку з невеликими

швидкостями передачі, малим радіусом дії та підтримання пристроїв з малим енергоспоживанням.

ZigBee є назвою стандарту, який був розроблений для забезпечення надійної низькошвидкісної передачі даних на відносно невеликі відстані з дешевим обладнанням. Назва походить від двох англійських слів zigzag (зигзагоподібна траєкторія), bee (бджола), тобто робота технології ZigBee є подібною до способу обміну інформацією між бджолами який був взятий як аналогія для неї.

Стандарт дозволяє вирішувати як прості завдання наприклад, відкриття дверей гаражу, так і більш складніші. Крім цього технологію ZigBee можна використовувати для створення мережі передачі повідомлень. Завдяки продажу великої кількості чіпів та програмного забезпечення можна досягти меншої вартості та простоти вирішення різних завдань. Передбачається, що в 2007 р. чіпи будуть наявні у великій кількості за ціною біля 2\$.

Призначення стандарту ZigBee

ZigBee можна вважати надбудовою стандарту IEEE 802.15.4, який визначає фізичний та MAC рівні. Сам стандарт ZigBee визначає специфікації рівня застосувань та рівня безпеки, забезпечуючи сумісність між продукцією різних виробників.

Технологія ZigBee призначена для використання в системах збору даних та управління. Ця технологія забезпечує мале енергоспоживання, володіє хорошою надійністю передачі даних та захистом інформації, сумісна з пристроями різних виробників. ZigBee-пристрої можуть застосовуватися в різних областях. Наприклад, для промисловості - в системах збору даних і управління технологічним устаткуванням, для передачі інформації від рухомих об'єктів, об'єктів, що знаходяться під високою напругою та ін. В комунальному господарстві та інженерних будівлях бездротові пристрої ZigBee застосовуються для управління теплопостачанням, освітленням, кондиціонуванням і вентиляцією, в системах пожежної безпеки, автоматичного

пожежегасіння та ін.

Також, стандарт ZigBee використовується для створення персональних безпроводних мереж (WPANs). В останні роки активно починає розвиватися ідея цифрового дому, який містить різні пристрої керування. Ідея полягає у створенні повністю автоматизованої системи, яка дозволить надати безпеку жителям дому та надавати їм повне керування. Технологія ZigBee дозволяє втілити цю ідею в реальність.

Таблиця 13.6 Основні параметри радіоінтерфейсу стандарту IEEE 802.15.4

Смуга частот	Кількість каналів	Чіпова швидкість	Бітова швидкість	Модуляція	Розширення спектру
868÷870 МГц	1	300 Кчп/с	20 Кбіт/с	BPSK	DSSS/15
902÷928 МГц	10	600 Кчп/с	40 Кбіт/с	BPSK	DSSS/15
2.4÷2.4835 ГГц	16	2 Мчп/с	250 Кбіт/с	O-QPSK	DSSS/32

Альянс ZigBee

ZigBee організований в межах альянсу ZigBee створеного в 2002 р. (ZigBee Alliance). Метою альянсу є об'єднання зусиль в розробці найбільш ефективних протоколів і забезпечення сумісності пристроїв різних виробників. Багато компаній (більше 150) вже використовують цю технологію, для вирішення своїх цілей, а кілька компаній є керівниками альянсу. Фактично вони є "покровителями" стандарту ZigBee. Цими компаніями є: Chipcon, Ember, Freescale, Honeywell, Mitsubishi, Motorola, Philips та Samsung.

З'явилася перша версія стандарту ZigBee 1.0 з описом профілю стека НС (Home Control, який передбачав використання мережі з топологією "дерево") та профілю додатку НСЛ (Home Control Lighting) для управління освітлювальним устаткуванням у грудні 2004 р. Ведеться робота над розробкою та затвердженням профілів пристроїв різних побутових застосувань: давачів, вимикачів освітлення, лічильників та ін.

Вже зараз розглядаються питаннях синхронізації, боротьби з перешкодами

і вдосконалення механізмів захисту інформації в безпроводній мережі.

Принцип роботи

Призначення рівнів моделі ZigBee:

- Фізичний рівень та MAC рівень повністю використовують переваги радіоінтерфейсу, визначеного в стандарті IEEE 802.15.4. Стандарт 802.15.4 описує роботу радіоінтерфейсу в мережі з рівноправними вузлами. Для розширення спектру сигналів використовується технологія розширення спектру методом прямої послідовності (англ. Direct Sequence Spread Spectrum- DSSS). Завдяки використанню технології DSSS спрощується реалізація обладнання ZigBee. Для каналів, які розташовані в області частот 1 ГГц використовуються послідовності довжиною 15 чіпів, а для каналів розташованих в області 2.4 ГГц - 32 чіпи. MAC рівень не містить великої кількості примітивів, а структура кадру із змінною частиною дозволяє пристосовуватися для вирішення різних задач та працювати з різними топологіями мережі. Забезпечена підтримка 128-бітового AES-шифрування. Також стандарт IEEE 802.15.4 встановлює швидкості передачі даних, напрям, та методи модуляції, які будуть використовуватися.
- Альянс ZigBee конкретизує логічну мережу, безпеку та прикладне програмне забезпечення, яке реалізується в мікропрограмному стеці. Кожна комбінація мікроконтролер/RF чіп вимагає свій власний стек ZigBee через відмінності між мікроконтролерами та RF чіпам. Зазвичай, стек ZigBee включається в мікроконтролер, або RF чіп. Стек, може належати виробнику чіпів, надаватися продавцем чіпів від третьої сторони, або надаватися третьою стороною для специфічної комбінації мікроконтролер/RF чіп.
- Прикладний рівень визначається профілями, яких є два типи: загальні профілі - затверджені альянсом ZigBee для цілей сумісності та приватні профілі для використання в окремих замкнутих системах.

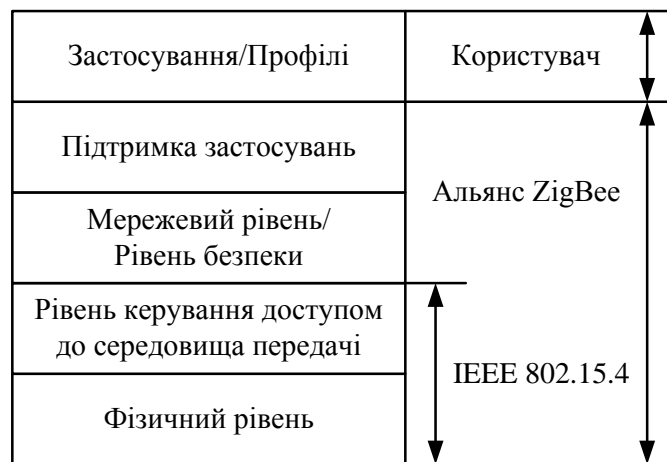


Рис.13.13 Рівні моделі ZigBee

Таким чином вузол мережі ZigBee повинен містити RF чіп (трансівер який працює на певній частоті та відповідає стандарту IEEE 802.15.4) і мікроконтролер який реалізує набір протоколів для обміну даними.



Рис.13.14 Склад платформи ZigBee з профілем ZigBee

Компанія Chipcon виготовляє ряд RF чіпів для частоти 2.4 ГГц, а Texas Instruments мікроконтролери з низьким споживанням енергії.

Спектр частот технології ZigBee

В діапазоні 2.4 ГГц (16 каналів зв'язку з кроком 5 МГц) згідно стандарту

ZigBee передача даних відбувається з швидкістю 250 Кбіт/с. Для частот 868 МГц (1 канал) та 902÷928 МГц (10 каналів з кроком 2 МГц) швидкість передачі даних складає 20 Кбіт/с та 40 Кбіт/с відповідно.

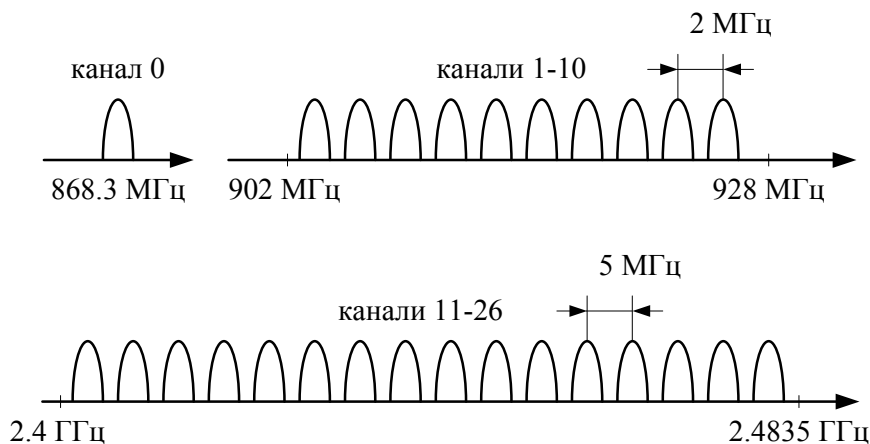


Рис.13.15 Розподіл каналів зв'язку згідно стандарту IEEE 802.15.4

Передбачається, що найбільше буде використовуватися діапазон 2.4 ГГц, оскільки в Європі на частоті 868 МГц доступний лише 1 канал, а діапазон 915 МГц дозволений в США, Канаді, Кореї та Австралії.

Структура та топологія мережі ZigBee

Мережа ZigBee складається із кількох компонентів. Найбільш простим є кінцевий пристрій. Пристрій може бути повнофункціональним (full function device - FFD), або обмеженим (reduced function device - RFD). Мережа повинна містити мінімум один FFD пристрій, який працює як координатор мережі. Структура мережі ZigBee:

- координатор PAN (FFD пристрій) - утворює мережу та підтримує таблиці маршрутизації;
- маршрутизатор (FFD пристрій) - обмінюється інформацією з іншими маршрутизаторами та координаторами для зменшення функцій кінцевих пристроїв;

- кінцеві пристрої (RFD пристрій) - довільні пристрої стандарту IEEE 802.15.4 призначені для виконання різних завдань, RFD може обмінюватися інформацією тільки з FFD пристроєм.

Є три топології мереж ZigBee:

- Топологія зірка. При використанні такої топології всі вузли мережі приєднуються до центрального, який називається координатором PAN. Обмін інформацією відбувається тільки через координатора PAN. Координатор PAN зазвичай має централізоване живлення, тоді як решта вузлів мають автономне живлення. Таку топологію краще використовувати для домашніх мереж, периферійних пристроїв PC ін.
- В сітковій (одноранговій) топології також наявний координатор PAN, але кінцеві пристрої можуть обмінюватися інформацією між собою без допомоги координатора. Така топологія забезпечує високу надійність роботи мережі завдяки передачі інформації між будь-якими пристроями та може використовуватися для промислових мереж, мереж сенсорів ін.
- Деревоподібна топологія представляє собою синтез зіркової та сіткоподібної топологій і поєднує їхні переваги. Пристрої FFD “утворюють” дерево, пристрої RFD розташовані як листочки на ньому. Мережа може містити декілька координаторів, які забезпечують послуги синхронізації, але тільки один координатор здійснює керування всією мережею.

Обмін інформацією в мережі відбувається за допомогою суперфреймів. В загальному випадку фрейм містить керуючий інтервал (beacon), інтервал конкурентного доступу (CAP) відповідно до механізму CSMA/CA і період доступу.

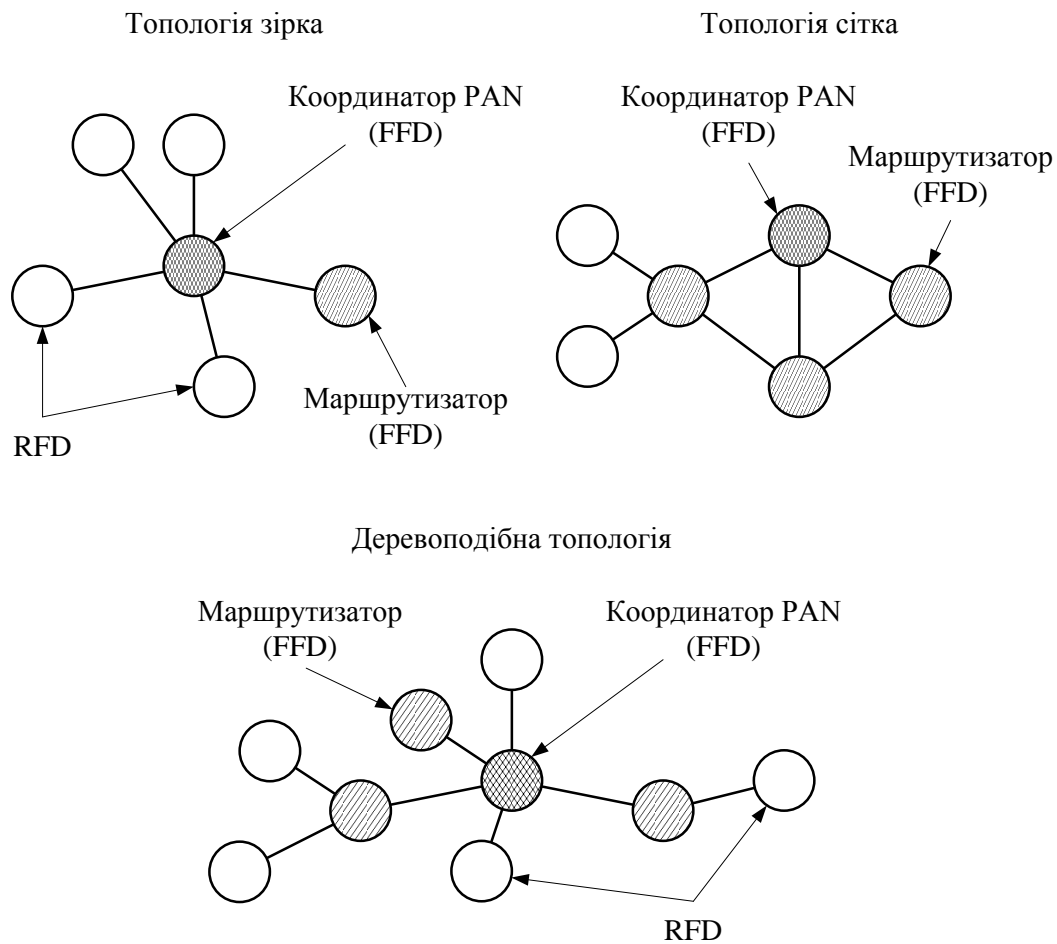


Рис.13.16 Топології мереж ZigBee



Рис.13.17 Структура фрейму даних

Останній містить набір часових інтервалів призначених певним пристроям для передачі даних. Керуючий інтервал передає тільки координатор PAN. Кожен пристрій в мережі передає дані за допомогою фреймів. Вони можуть

бути чотирьох типів – керуючі (beacon frame), фрейми даних, фрейма підтвердження прийому та фрейми команд рівня MAC.

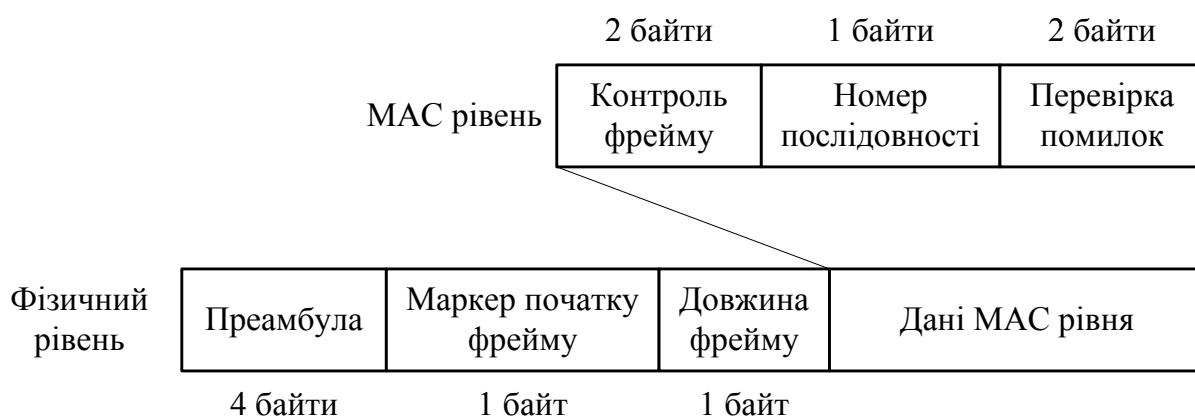


Рис.13.18 Структура фрейму підтвердження

Завдяки вбудованому програмному забезпеченню пристрої при включенні живлення можуть самі "знаходити" один одного. У випадку виходу з ладу якого-небудь приладу вони здатні "розшукати" нові маршрути для передачі повідомлень.

Споживання енергії

Щоб мінімізувати споживання енергії та забезпечити тривалу роботу від автономного живлення кінцеві пристрої можуть більшість часу знаходитися в режимі очікування, а за необхідності переходити в активний режим роботи.

Стандарт ZigBee передбачає, що маршрутизатори та координатор будуть мати централізоване живлення. Крім таких режимів роботи в технології ZigBee можуть використовуватися трансівери і мікоконтролери з низьким споживанням енергії. Наприклад, трансівер CC2420 Chipcon під час прийому споживає 18.8 мА, а під час передачі – 17.4 мА.

Типові часові затримки складають 30 мс для підключення нового пристрою до мережі, 15 мс для переходу із режиму очікування в активний режим, 15 мс для доступу до каналу. В результаті, затримки відгуку настільки малі, що людина, увійшовши до кімнати і клацнувши перемикачем

безпроводного зв'язку ZigBee, навіть не помітить, що світло з'явилося майже миттєво, тоді як затримки при підключенні пристроїв до мережі Bluetooth складає біля 3 с.

Переваги технології ZigBee

- Низька вартість. Типове обладнання ZigBee є дешевим. Ціна обладнання може бути меншою за \$12, якщо умови придбання 100 штук (оскільки 802.15.4 і стеки ZigBee зазвичай входять в цю вартість, кристали і інших дискретних компоненти відсутні). Такі ціни забезпечують економічний вигаиш застосування ZigBee.
- Стійкість мережі ZigBee. Якщо дві точки мережі не можуть обмінюватися інформацією відбувається динамічна передача повідомлень від несправного вузла до маршрутизатора, якому відомий інший шлях передачі даних до місця призначення. Здійснюється така процедура автоматично, що дозволяє вузлам мережі продовжувати працювати. Використання дешевих маршрутизаторів може також розширити розміри мережі, якщо відстань між базовою станцією і видаленим вузлом перевищує радіус дії пристрою.
- Підтримка великої кількості застосувань. Оскільки стандарт ZigBee є відкритим, надається можливість самостійного вибору продукції різних виробників. Групи альянсу ZigBee визначають профілі сумісності, яких повинні дотримуватися ZigBee пристрої, а радіоінтерфейс взаємодіятиме з будь-яким іншим радіоінтерфейсом, за дотримання того ж профілю.
- Низьке споживання енергії. Обладнання ZigBee може працювати з потужністю 1 мВт, переходити в режим очікування, що забезпечує довгий строк роботи від автономного живлення.

14 СТАНДАРТИ IEEE 802.11x

14.1. Загальні зауваження

Короткі історичні відомості

Стандарти IEEE 802.11x, як і більшість інших безпроводних стандартів з'явилися зовсім недавно та продовжують розвиватися в наші дні (рис. 14.1). Потреби споживачів, моніторинг ринку та вражаючі можливості сучасної елементної бази вносять корективи в подальші редакції стандарту. Робота над єдиним стандартом безпроводних локальних мереж почалась в 1989 р., коли була організована робоча група 11 комітету IEEE 802. В 1997 р. було опубліковано стандарт IEEE 802.11, а вже сьогодні, наприклад, щомісячно в світі продається біля мільйону адаптерів тільки стандарту IEEE 802.11b.

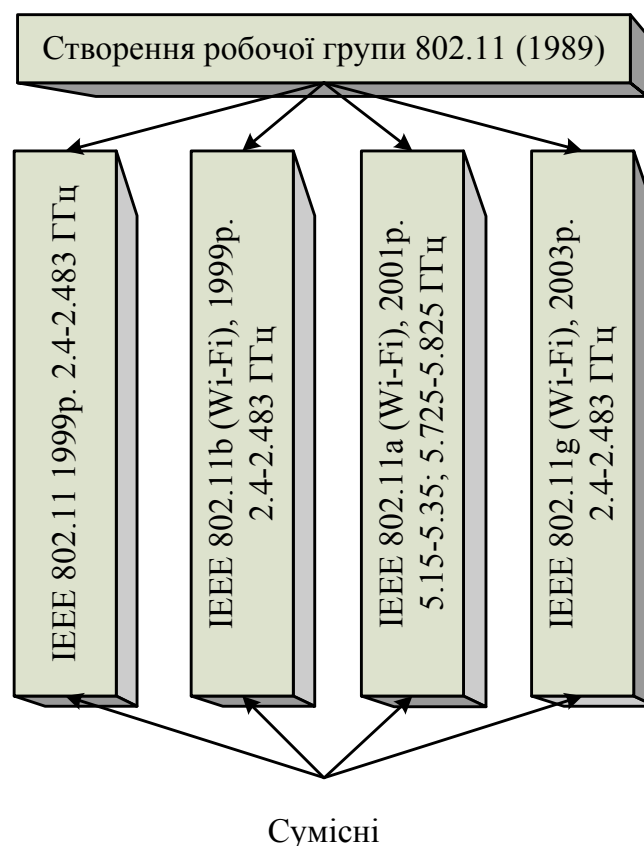


Рис.14.1 Етапи розвитку стандартів IEEE 802.11x

Що зумовило такий бурхливий попит на апаратуру, яка відповідає

згаданим стандартам? Однією з причин являється те, що стандарти спростили процес реалізації систем безпроводного зв'язку. Наприклад, маючи в наявності трансивер (приймач та передавач) діапазону 2.4 ГГц чи 5.5 ГГц розробнику раніше необхідно було самому вирішувати проблеми управління роботою мережі, арбітражу доступу до каналів і т.д., що займає багато часу та вимагає певної кваліфікації. А згадані стандарти якраз і вирішують такі питання на фізичному та каналному рівнях.

Перший стандарт IEEE 802.11, не набув широкого поширення через відносно невеликі швидкості передачі даних – до 2 Мбіт/с [40].

Другий стандарт, 802.11b, розширив діапазон швидкостей до 11 Мбіт/с і створив справжній бум на ринку безпроводних технологій та продовжує використовуватись і в наш час. Третій стандарт 802.11a розширив діапазон швидкостей до 54 Мбіт/с, що збільшило сферу застосування безпроводних мереж. Але він функціонує в іншому частотному діапазоні і не сумісний з стандартом 802.11b, який вже набув широкого поширення. Тому виникли певні проблеми при розширенні вже наявних мереж на базі стандарту 802.11b в сторону збільшення швидкості. Останній стандарт 802.11g якраз і дає можливість використовувати більш високі швидкості та забезпечує сумісність з стандартом 802.11b.

Завдяки затвердженню в 1999 році стандартів 802.11a та 802.11b технологія безпроводних локальних мереж (WLAN) стала доступною для багатьох споживачів. Сьогодні багато виробників пропонують станції-клієнти стандартів 802.11a та 802.11b та точки доступу з характеристиками близькими до характеристик Ethernet. Наявна можливість працювати без підключення до провідної мережі забезпечує можливість вільного пересування, характерну для мобільних пристроїв.

Обладнання, яке підтримує первинний варіант 802.11 зняте з виробництва. На даний момент найбільш поширеними є стандарти 802.11a, 802.11b та 802.11g, які відрізняються використанням різних частотних діапазонів методами модуляції та ін.

Призначення

Мережі стандартів IEEE 802.11 відносяться до безпроводних локальних мереж – WLAN, тобто мереж з невеликою зоною радіопокриття та швидкістю передачі даних від 1 Мбіт/с до 54 Мбіт/с.

Таблиця 14.1 Параметри мереж стандартів IEEE 802.11x

Параметри	IEEE 802.11b	IEEE 802.11g	IEEE 802.11a
Відстань та швидкість передачі даних	В закритих приміщеннях: 30 м. (11 Мбіт/с) 91 м. (1 Мбіт/с)	В закритих приміщеннях: 30 м. (54 Мбіт/с) 91 м. (1 Мбіт/с)	В закритих приміщеннях: 12 м. (54 Мбіт/с) 91 м. (6 Мбіт/с)
	Відкрите приміщення, пряма видимість: 120 м. (11 Мбіт/с) 460 м. (1 Мбіт/с)	Відкрите приміщення, пряма видимість: 120 м. (54 Мбіт/с) 460 м. (1 Мбіт/с)	Відкрите приміщення, пряма видимість: 30 м. (54 Мбіт/с) 305 м. (6 Мбіт/с)

Детальніша інформація про стандарти IEEE 802.11x представлена на рис. 14.2.

Локальні мережі забезпечують радіус дії до сотень метрів при потужності передавачів порядку 100 мВт. Такі мережі призначені для об'єднання пристроїв в межах локальної зони (будинку, підприємства і т.п.). Варто відмітити, що на основі стандартів IEEE 802.11x локальних безпроводних мереж цілком успішно часто реалізують і мережі міського масштабу.

Архітектура

Стандарт передбачає два способи організації локальних мереж:

- за принципом “рівний з рівним” (ad-hoc-мережа рис. 14.3,а);
- у вигляді структурованої мережі (Infrastructure Mode - рис. 14.3,б).

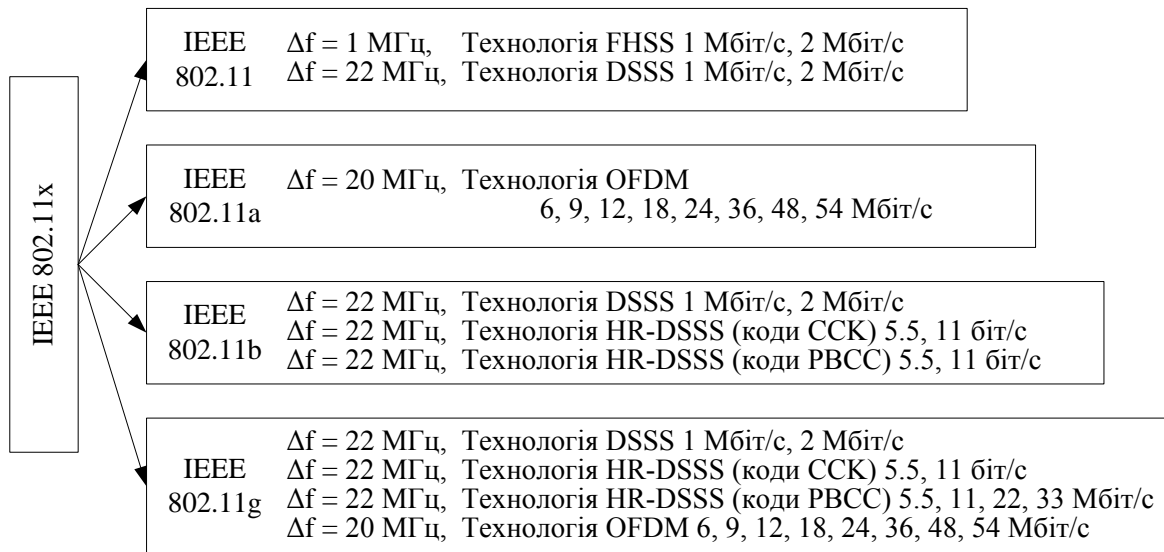


Рис.14.2 Смуга частот, вид модуляції, швидкість передачі даних стандартів IEEE 802.11x

В першому випадку зв'язок встановлюється безпосередньо між станціями. У випадку структурованої мережі (як показала практика, це основний спосіб побудови мереж IEEE 802.11), станції взаємодіють одна з одною не напряму, а через точку доступу (AP - Access Point), яка виконує в безпроводній мережі роль своєрідного комутатора (аналогічно тому, як це здійснюється в традиційних провідних мережах).

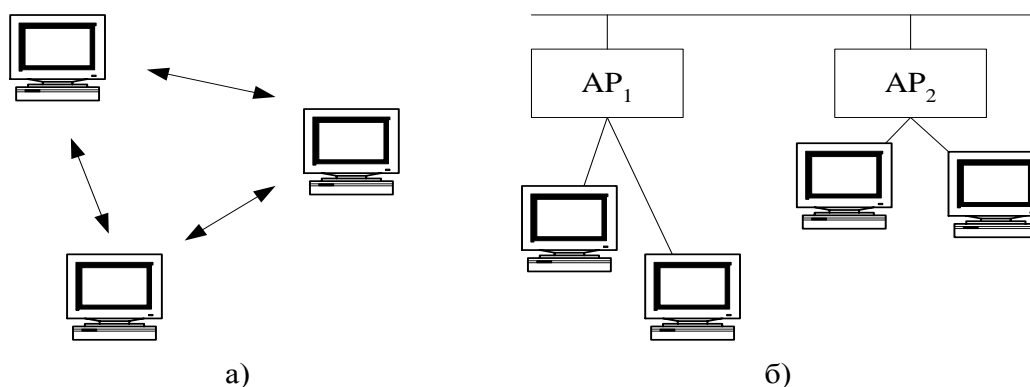


Рис.14.3. Мережі 802.11: а) ad-hoc мережа, б) структурована мережа

В мережі IEEE 802.11 може бути декілька точок доступу, об'єднаних провідною мережею Ethernet. Фактично, така мережа являє собою набір

базових станцій із зонами покриття, що перекриваються. Стандарт IEEE 802.11 дозволяє переміщення з зони однієї AP в зону другої (роумінг), забезпечуючи мобільність. Оскільки, для мобільних станцій важливим є питання ресурсу елементів живлення, в стандарті передбачено спеціальний протокол управління споживанням енергії - безпосередньо при обміні передавальний пристрій може перевести приймач в режим очікування.

14.2. Технології DSSS та HR-DSSS

Для забезпечення розширення спектру сигналів, використовуються наступні технології:

- прямого розширення спектру - DSSS;
- високошвидкісного розширення спектру HR-DSSS з використанням комплементарних кодів (ССК - Complementary Code Keying);
- високошвидкісного розширення спектру HR-DSSS з використанням двійкового пакетного згорткового кодування (PBCC - Packet Binary Convolution Coding).

Канали зв'язку

Канали зв'язку характеризуються, в основному, наступними факторами:

- кількістю каналів;
- центральною частотою;
- шириною смуги.

Безпроводні локальні мережі DSSS, HR-DSSS використовують 13 каналів з центральною частотою f_c , причому

$$f_c = 2412 + 5 \cdot N, \quad N = 0,1,\dots,12. \quad (14.1)$$

Ширина кожного каналу зв'язку становить 22 МГц. На рис. 14.4 приведена спектральна маска для одного каналу, причому потужність відраховується

відносно піків функції $\sin(x)/x$ [9].

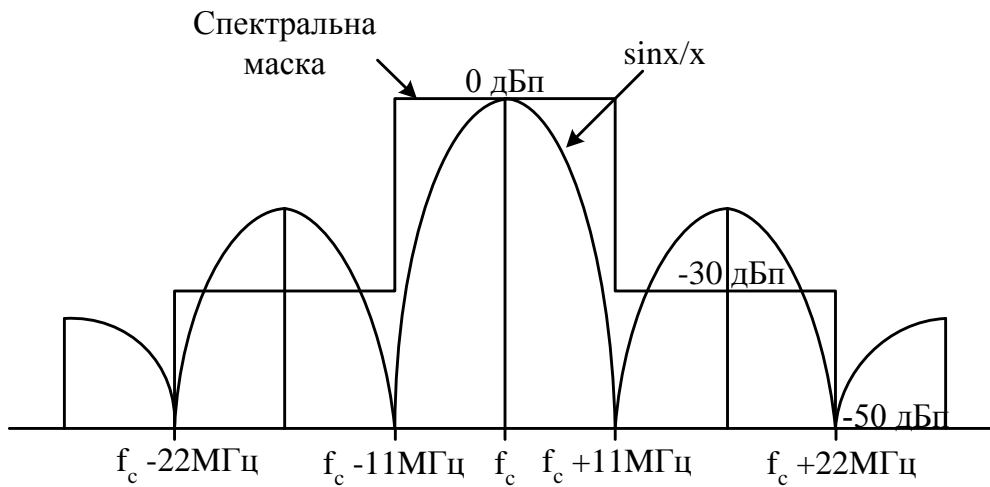


Рис.14.4 Спектральна маска каналу мережі 802.11 при використанні технології DSSS

Оскільки ширина каналу на рівні -30 дБ складає 22 МГц в смузі 83.5 МГц можна розташувати три канали (рис. 14.5).

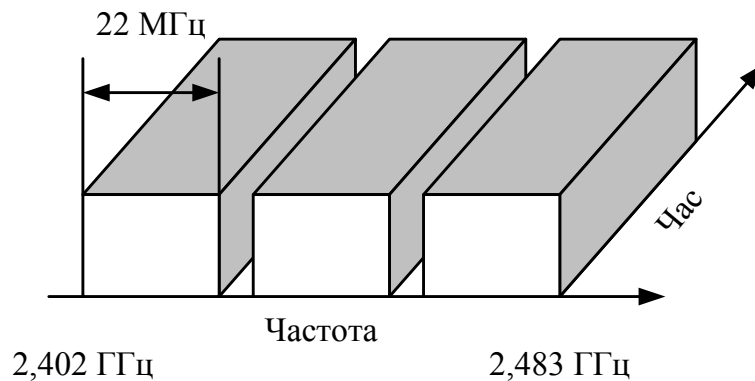


Рис.14.5 Канали, які використовуються в технології DSSS

Швидкість передачі

Більш складним є визначення швидкості передачі. При заданій смузі частот (22 МГц) вона залежить від:

- розширюючої послідовності (коди Баркера, блочні ССК, згорткові РВСС);

- виду модуляції, яка використовується (DBPSK, DQPSK, DO-QPSK).

При використанні фазової модуляції, як і амплітудної, смуга частот модульованого сигналу ΔF та швидкість модулюючого сигналу V_{mod} зв'язані наступним чином:

$$\Delta F = 2 \cdot V_{\text{mod}} \cdot \quad (14.2)$$

Отже, згідно 14.2 при заданій смузі частот 22 МГц швидкість модуляції повинна становити 11 Мбіт/с (рис. 14.6).

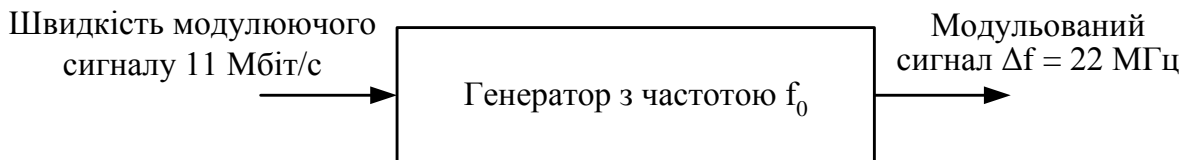
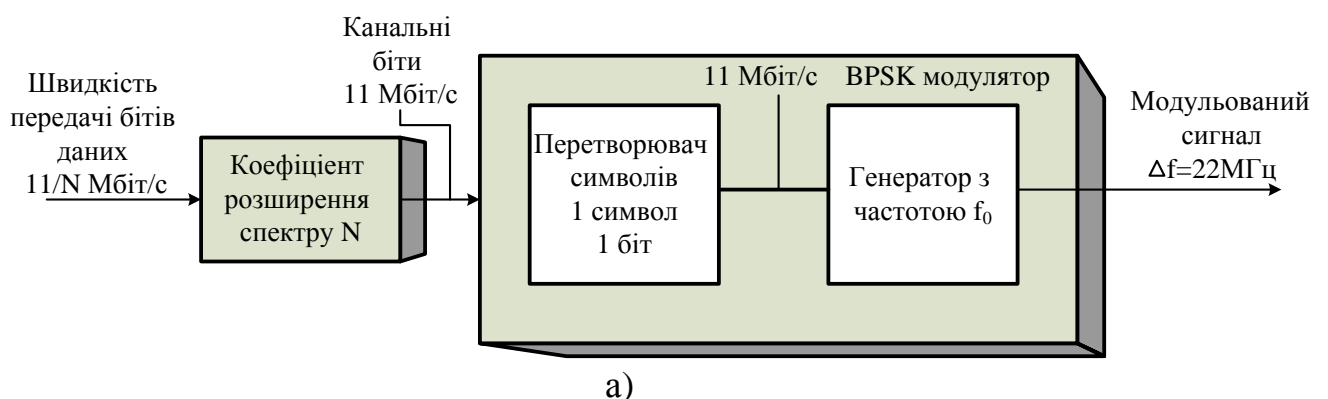


Рис.14.6 Формування модульованого сигналу

При використанні BPSK модуляції для модуляційного символу необхідний 1 каналний біт, отже швидкість каналних бітів також становить 11 Мбіт/с. При використанні дворівневої модуляції (DQPSK, DO-QPSK) для модуляційного символу необхідні вже 2 каналні біти, а отже швидкість каналних бітів може бути в 2 рази більшою тобто 22 Мбіт/с.



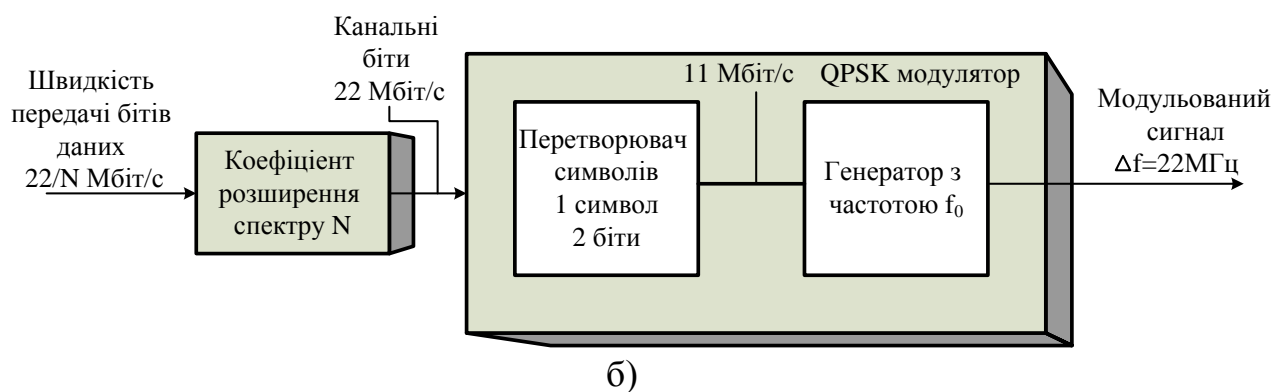


Рис.14.7 Формування швидкостей передачі даних

Реально на вхід модулятора каналні біти подаються після розширення спектру. Якщо коефіцієнт розширення спектру такої послідовності становить N (тобто замість одного вхідного біту на виході блоку розширення спектру утворюється N бітів), швидкість передачі каналних бітів зменшиться в N раз.

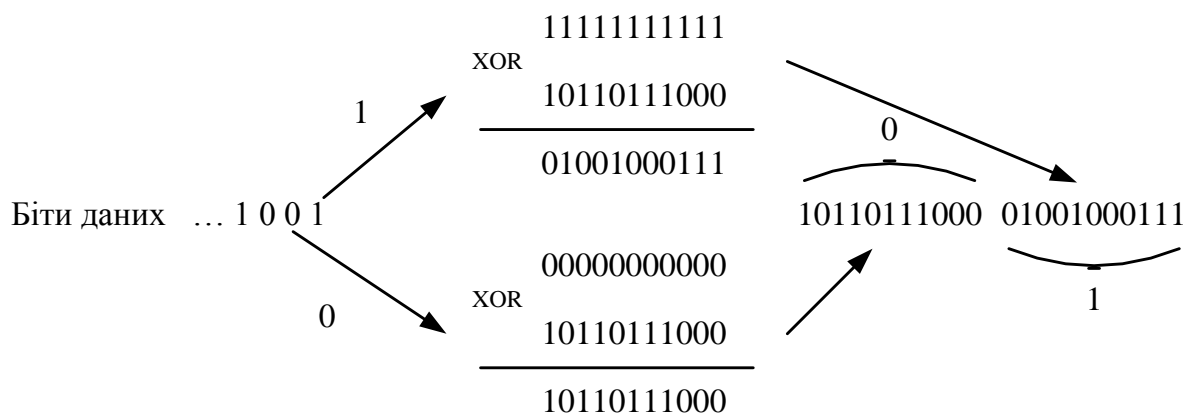
З врахуванням рис. 14.7 в таблиці 14.2 приведені швидкості для різних видів модуляції.

Таблиця 14.2 Швидкості передачі даних при використанні різних видів модуляції в стандарті IEEE 802.11

Вид модуляції	Максимальна швидкість	Вид послідовності	Коефіцієнт розширення	Швидкість, Мбіт/с
DBPSK	11	код Баркера	11	1
DQPSK	22	код Баркера	11	2
DQPSK	22	ССК	2	11
DQPSK	22	ССК	4	5.5
DQPSK	22	РВСС	2	11
DBPSK	11	РВСС	2	5.5
8PSK	33	РВСС	3/2	22

14.2.1. Код Баркера

При використанні технології DSSS потік даних з швидкістю 1 Мбіт/с, який надходить з каналного рівня перетворюється в потік елементарних сигналів, або чіпів (chip) з швидкістю 11 Мчіп/с. Вхідна інформація множиться на розширюючу послідовність (розщеплююча послідовність), в результаті чого спектр сигналу розширюється. В якості такої послідовності використовують послідовність Баркера довжиною 11 біт. Спочатку один біт “розширюється” до 11 біт, а потім подається на схему “виключно або” рис. 14.8.



Розширююча послідовність: 10110111000

Рис.14.8 Розширення бітів даних

База сигналу для кожного інформаційного символу визначається таким чином:

$$B = \frac{T_c}{\tau_0} = 11 \quad (14.3)$$

Аперіодична кореляційна функція (КФ) коду Баркера представлена на рис. 14.9а, періодична КФ на рис. 14.9, б.

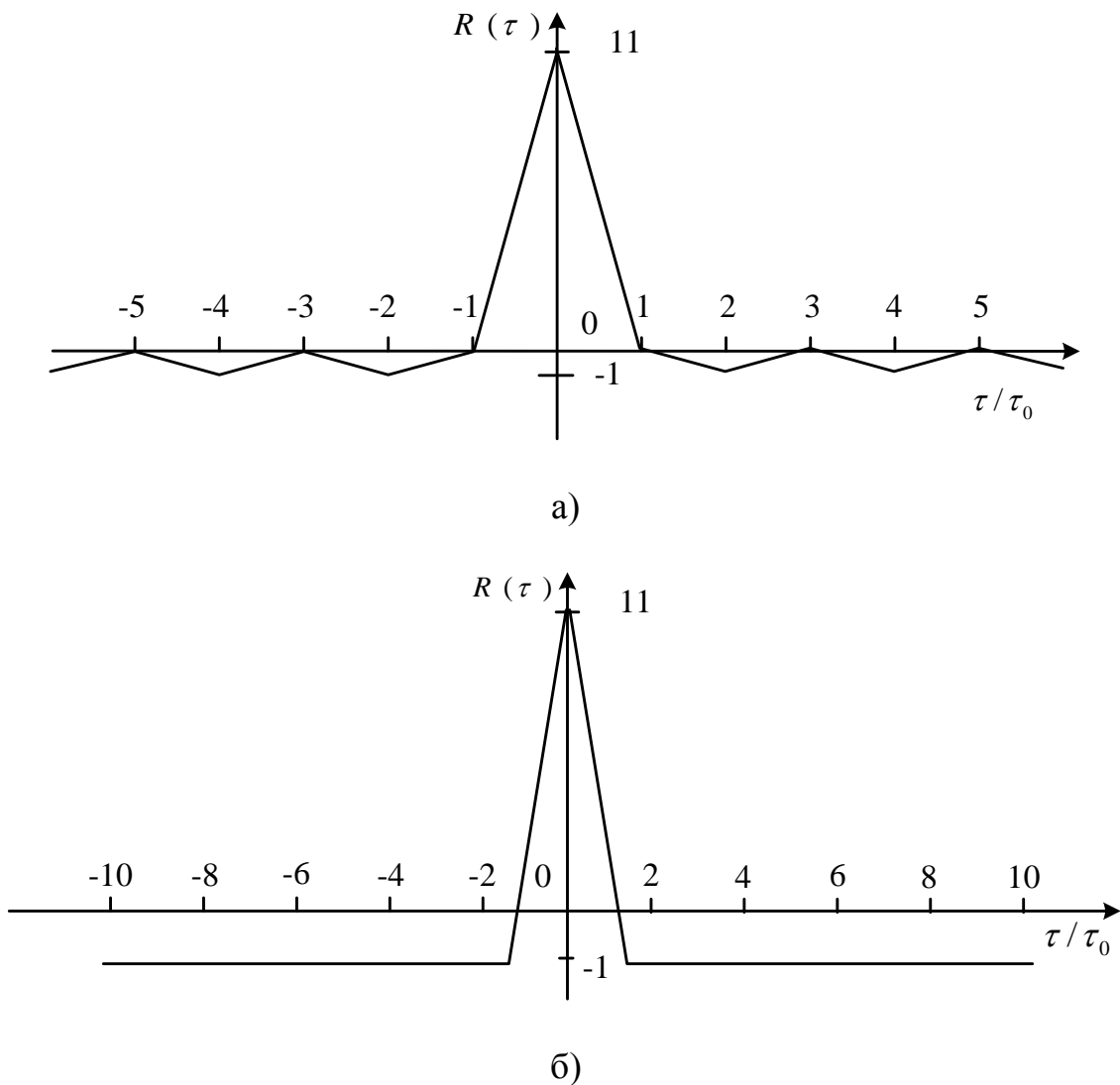


Рис.14.9 Аперіодична (а) та періодична (б) КФ послідовності Баркера

Низький рівень бокових пелюсток КФ вказує на хороші кореляційні властивості послідовності. Застосування послідовності Баркера дозволяє на приймальній стороні під час обробки сигналу отримати енергетичний вигравш пропорційний значенню бази B . Але для його отримання необхідна точна синхронізація в часі та частоті. Помилка синхронізації не повинна перевищувати 10% від тривалості елементарного символу послідовності Баркера $\Delta\tau \leq 25 \cdot 10^{-6}$.

14.2.2. Комплементарні ССК-послідовності

В стандарті IEEE 802.11b використовуються 8-чіпові комплексні

комплементарні послідовності ССК (Complementary Code Keying) та DQPSK модуляція. На відміну від 11-чіпових послідовностей Баркера, яких існує всього два варіанти (прямий та інверсний - для кодування логічного нуля та одиниці), варіантів ССК-послідовностей є значно більше. Використання різних ССК-послідовностей дозволяє кодувати в одному символі не один біт, а значно більше, тобто збільшити інформаційну швидкість передачі даних.

Вперше комплементарні коди запропонував використати М.Дж.Е. Голей (англ. M.J.E. Goley). Послідовність x довжиною N називається комплементарною з другою послідовністю y такої самої довжини, якщо для суми кореляційних функцій виконується наступна умова

$$\sum_{k=0}^{N-1} (x_k \cdot x_{k+i} + y_k \cdot y_{k+i}) = \begin{cases} 2 \cdot N, & i = 0 \\ 0, & i \neq 0 \end{cases} \quad (14.4)$$

Фізична інтерпретація автокореляції з зсувом – одночасне приймання сигналу, який поширюється прямо, та сигналу з фазовою затримкою на i елементів. Іншими словами, якщо система зв'язку, що використовує комплементарне кодування функціонує в умовах багатопроменевого поширення сигналів, в ідеалі міжсимвольна інтерференція (зумовлена накладанням сигналів з затримкою поширення) повинна бути відсутньою, оскільки сума їх автокореляційних функцій має бути рівною нулю.

Комплементарні ССК-послідовності для швидкості передачі 11 Мбіт/с

При використанні DQPSK модуляції та смузі 22 МГц можна отримати швидкість передачі даних 22 Мбіт/с (таблиця 14.2). Проте, в даному випадку вхідна послідовність розширюється в 2 рази, тобто швидкість передачі даних, згідно таблиці 14.2, становить лише 11 Мбіт/с. Суть розширення в 2 рази полягає в наступному:

- вхідна послідовність бітів групується в символи по 8 бітів [$b_8, b_7, b_6, b_5, b_4, b_3, b_2, b_1$];

- вхідні біти кожного символу, за певними правилами, перетворюються в комплексний символ з 8 комплексних чисел (комплексне число містить вже дві складові, дійсну та уявну, тобто здійснюється розширення в 2 рази).

Комплементарні ССК-послідовності для швидкості передачі 5.5 Мбіт/с

Як вказувалось вище при використанні DQPSK модуляції та смузі 22 МГц можна отримати швидкість передачі даних 22 Мбіт/с (таблиця 14.2). В даному випадку вхідна послідовність розширюється в 4 рази, тобто швидкість передачі даних, згідно таблиці 14.2, становить лише 5.5 Мбіт/с. Суть розширення в 4 рази полягає в наступному:

- вхідна послідовність бітів групується в символи по 4 бітів $[b_4, b_3, b_2, b_1]$;
- вхідні біти кожного символу, за певними правилами, перетворюються в комплексний символ з 4 комплексних чисел (комплексне число містить вже дві складові, дійсну та уявну, тобто здійснюється розширення в 4 рази).

Формування ССК послідовностей

Метод використовує DQPSK-модуляцію в радіоканалі. ССК-модуляція базується на виділенні із послідовного інформаційного потоку груп довжиною 8 біт (d_0-d_7). Ці 8 біт визначають інформаційний символ C із восьми комплексних чіпів $C = [c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7]$. Чіпи є комплексними, оскільки визначають I- та Q-квадратурні складові сигналу для DQPSK. Вісім чіпів інформаційного символу послідовно модулюють несучу з частотою 11 МГц. Фактично, кожен чіп представляє собою сигнал несучої частоти з фазовим зсувом, який визначається за формулою для всього символу.

$$C = [c_0, \dots, c_7] = \begin{bmatrix} j_1 + j_2 + j_3 + j_4; & j_1 + j_3 + j_4 & j_1 + j_2 + j_4 & -(j_1 + j_4); \\ j_1 + j_2 + j_3; & j_1 + j_3; & -(j_1 + j_2); & j_1 \end{bmatrix} . \quad (14.5)$$

Елемент j_1 входять в кожний чіп символу, тобто змінює фазу всього символу. Фазова модуляція сигналу називається диференціальною, оскільки значення j_1 поточного символу визначається відносно значення j_1 попереднього символу.

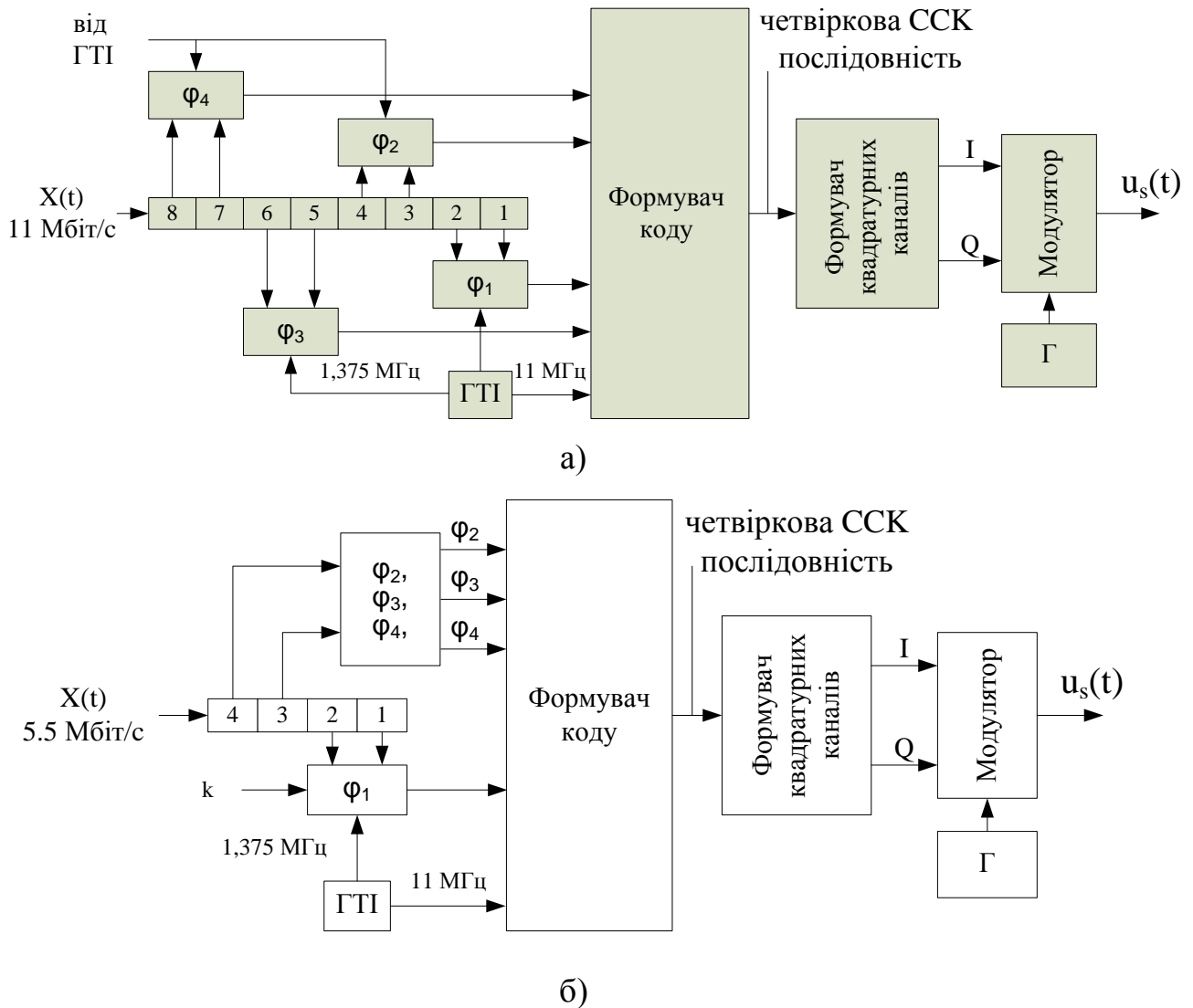


Рис.14.10 Структурна схема ССК-кодера для швидкостей 11 Мбіт/с (а) та 5.5 Мбіт/с (б)

Чіпи символу (вектору) C визначаються на основі послідовностей Уолша-Адамара. Для швидкості 11 Мбіт/с вектор вхідних даних $D = [d_0, \dots, d_7]$ можна представити у вигляді послідовності чисел $m_1 - m_4$, де $m_1 = (d_0 d_1)$, $m_2 = (d_2 d_3)$, ..., $m_4 = (d_6 d_7)$. Якщо $M = [m_1, \dots, m_4]$, тоді вектор $C = (M \times (WH + B)) \cdot \pi/2$, де WH – верхня половина матриці Уолша-Адамара:

$$\{WH\} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (14.6)$$

Вектор $\mathbf{V} = [0, 0, 0, 2, 0, 0, 2, 0]$, який відповідає повороту фази чіпів c_3 та c_6 на 180° (через знак мінус) є необхідним для покращення кореляційних властивостей кодових послідовностей. Кожна послідовність мало корелює сама з собою при фазовому зсуві, що є дуже корисним при багатопроменевому прийомі. Незважно помітити, що операційне підсилення ССК-модуляції 3 дБ (в два рази), оскільки без кодування QPSK-модульований з частотою 11 МГц сигнал може передавати 22 Мбіт/с. ССК-модуляція представляє собою блочний код, який легко реалізувати апаратно. Завдяки цим властивостям ССК-модуляція використовується в стандарті IEEE 802.11b.

Для мінімізації помилки детектування важливу роль має рівномірний розподіл символів у фазовому просторі – вони повинні бути розташовані максимально далеко один від одного. ССК-модуляція не забезпечує такого оптимального розподілу, тому було розроблено інший метод модуляції – пакетного двійкового згорткового кодування PBCC (Packet Binary Convolution Coding).

14.2.3. Згорткові коди PBCC

Метод PBCC використовується в стандарті IEEE 802.11b, як додаткова можливість. Механізм роботи PBCC був запропонований фірмою Alantro Communication, яка в 2000 р. увійшла в склад компанії Texas Instruments. Метод PBCC дозволяє забезпечувати швидкості передачі 5.5 Мбіт/с, 11 Мбіт/с та 22 Мбіт/с.

Метод PBCC базується на використанні згорткового кодування. Для швидкостей 5.5 Мбіт/с, 11 Мбіт/с потік інформаційних бітів надходить в регістр зсуву довжиною шість бітів з суматорами (рис. 14.12,а).

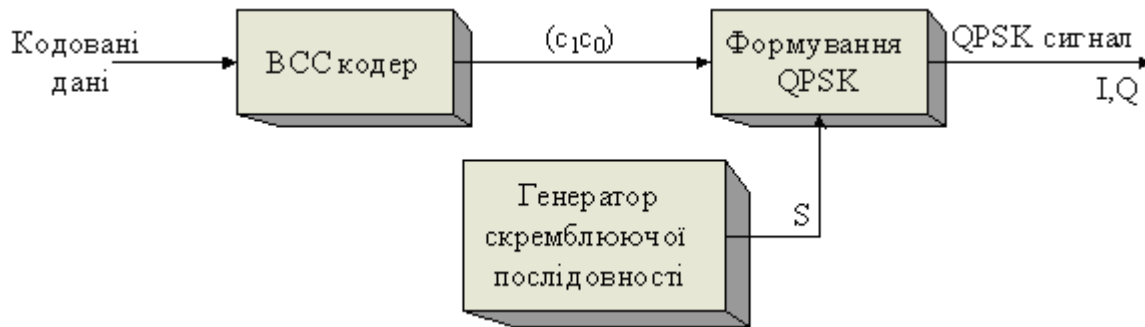


Рис.14.11 Схема PBCC-модуляції

В початковий момент часу всі розряди тригера ініціалізують нулем. В результаті кожний вихідний біт d замінюється двома бітами кодової послідовності (c_0, c_1) . Для швидкості 11 Мбіт/с c_0, c_1 задають один символ QPSK-модуляції. Для швидкості 5.5 Мбіт/с використовують BPSK-модуляцію, з послідовною передачею бітів c_0 та c_1 . Якщо необхідна швидкість передачі 22 Мбіт/с (рис. 14.12,б), три біти c_0, c_1, c_2 задають один символ 8PSK-модуляції.

Після формування PSK-символів відбувається скремблювання. Залежно від сигналу s (рис. 14.11) символ залишається без змін ($s = 0$), або його фаза збільшується на $\pi/2$ ($s = 1$). Значення s визначає 256-бітна послідовність S , яка циклічно повторюється. Вона формується на основі початкового вектору $U = 338V_{16}$ в якому кількість нулів і одиниць рівна. Послідовність S представляє собою 16 послідовних векторів U_i ($i = 0, \dots, 15$), причому кожен вектор U_i , циклічно зсунутий вліво порівняно з U_{i-1} на $3i$ розряди [9].

Якщо використовуються швидкості 11 Мбіт/с та 5.5 Мбіт/с на виході регістру зсуву можливі 64 вихідні стани. Оскільки при PBCC-модуляції інформаційні біти у фазовому просторі розташовані далше один від одного порівняно із CCK-модуляцією. Тому, порівняно із CCK-модуляцією використання PBCC-модуляції дозволяє передавати дані з більшою швидкістю при однаковому відношенні сигнал/шум та рівні помилок. Недоліком застосування PBCC-модуляції є складність апаратної реалізації даного алгоритму.

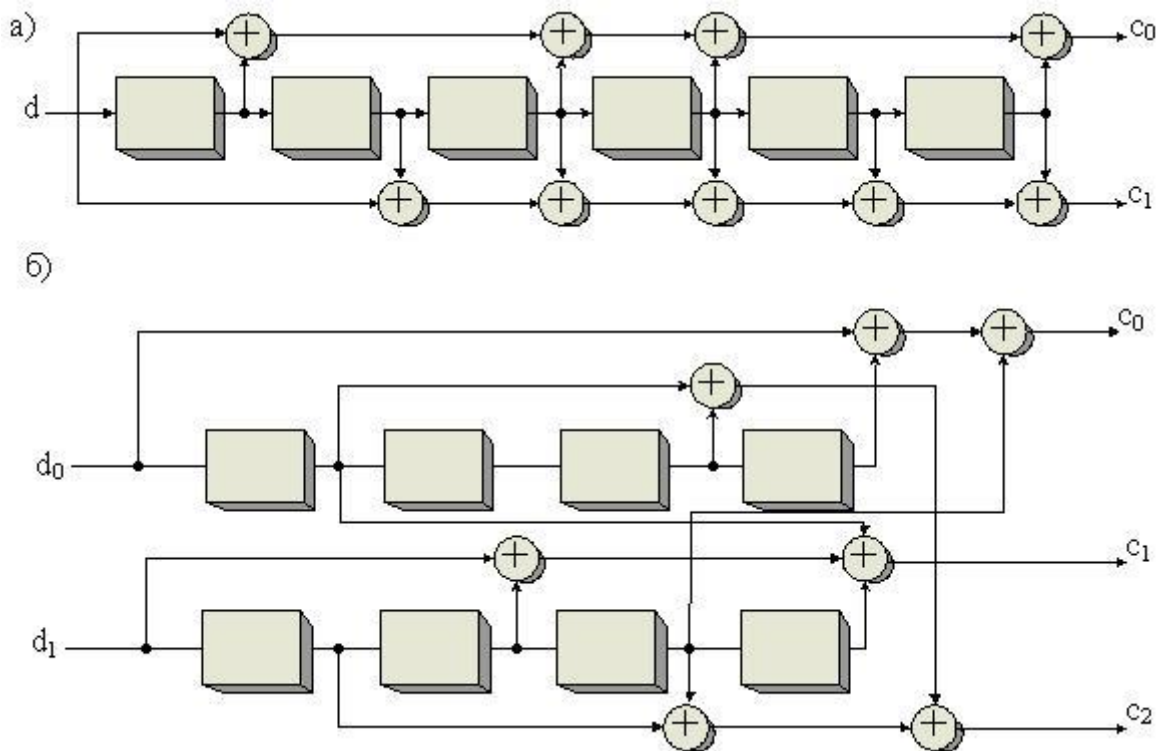


Рис.14.12 Схема згорткового ВСС-кодування

Швидкість передачі 5.5 Мбіт/с

Вхідні дані поступають з швидкістю 5.5 Мбіт/с (рис. 14.13), а згортковий кодер ($k=7, R=1/2$) збільшує їх швидкість вдвічі до 11 Мбіт/с.

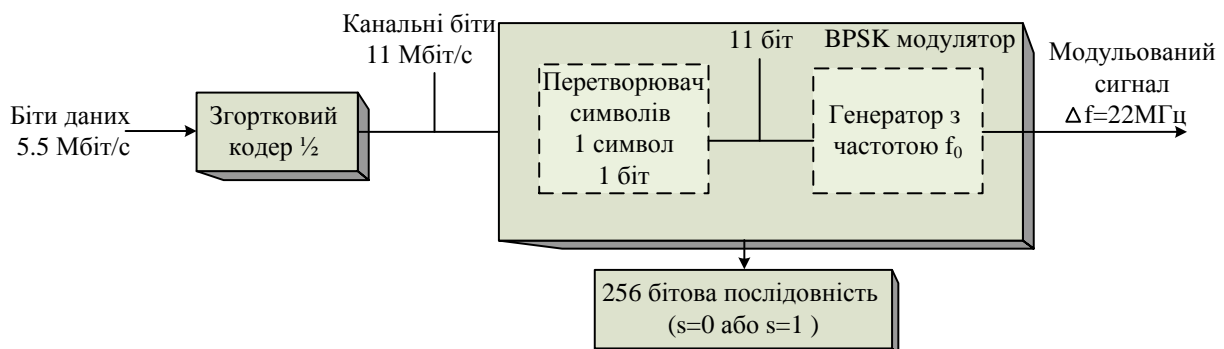


Рис.14.13 Забезпечення швидкості передачі 5.5 Мбіт/с з використанням технології PBCC

Якщо символи (symbol mapper) BPSK модулятора надходять до перетворювач з швидкістю 11 Мбіт/с, або частотою 11 МГц отримаємо смугу вихідного сигналу в два рази більшою за частоту модулюючого сигналу тобто

$$11 \cdot 2 = 22 \text{ МГц.}$$

Для формування шумоподібного сигналу на виході модулятора на нього подається шумоподібна послідовність з періодом повторення 256 біт/с. Така послідовність формується з 16 бітної базової послідовності 0011001110001011. Для того, щоб з даної базової послідовності отримати 256-бітну, використовують циклічний зсув перших трьох символів одночасно. Так отримують ще п'ятнадцять 16-бітових послідовностей, що в сумі дає одну 256-бітову. Згадана послідовність формує керуючий сигнал S (0, або 1), згідно якого вибирається один з типів сузір'я для PSK модуляції (рис. 14.14).

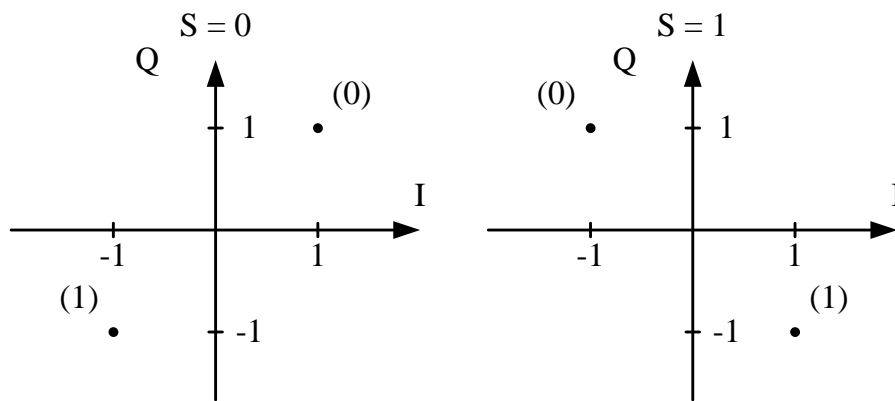


Рис.14.14 Сигнальні сузір'я РВСС при забезпеченні швидкості передачі 5.5 Мбіт/с

Швидкість передачі 11 Мбіт/с

В цьому випадку вхідні дані поступають з швидкістю 11 Мбіт/с, а згортковий кодер ($k=7$, $R=1/2$) збільшує їх швидкість вдвічі до $11 \cdot 2 = 22$ Мбіт/с. Отримана таким чином послідовність подається на перетворювач символів фазового модулятора QPSK, де кожні два біти об'єднуються в один символ. При цьому швидкість передачі зменшиться в два рази і буде становити 11 Мсим/с. При подачі на модулятор символів з даною швидкістю отримаємо, як і в попередньому випадку, смугу вихідного сигналу 22 МГц.

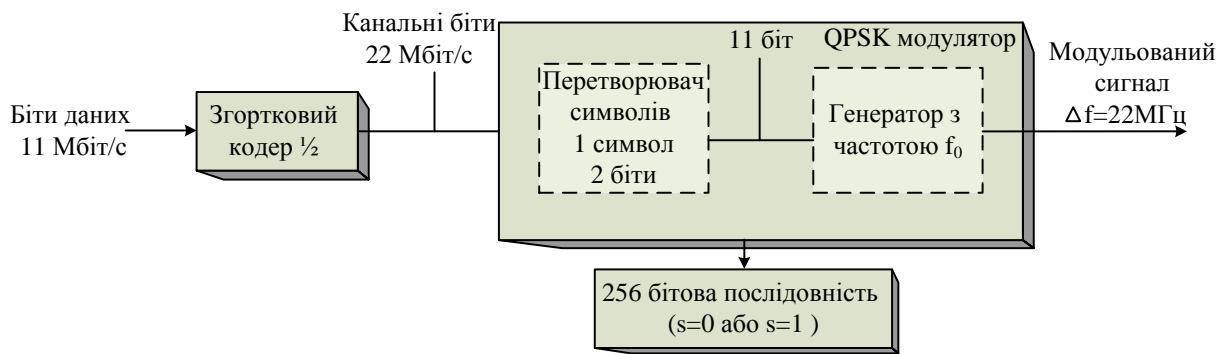


Рис.14.15 Забезпечення швидкості передачі 11 Мбіт/с з використанням технології RBCC

Для формування шумоподібного сигналу на виході модулятора на нього подається, як і в попередніх випадках, шумоподібна послідовність з періодом повторення 256 біт/с. Згадана послідовність формує керуючий сигнал S (0, або 1), згідно якого вибирається один з типів сузір'я для QPSK модуляції (рис. 14.16).

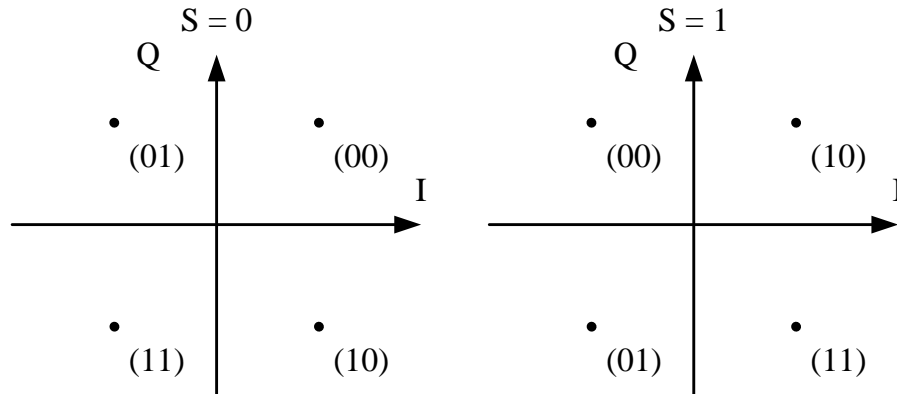


Рис.14.16 Сигнальні сузір'я RBCC при забезпеченні швидкості передачі 11 Мбіт/с

Швидкість передачі 22 Мбіт/с, 33 Мбіт/с. Кодування RBCC

При забезпеченні обох швидкостей використовується модулятор 8-PSK, на вхід якого подаються каналні біти з швидкістю 33 Мбіт/с. Далі, каналні біти подаються на перетворювач символів модулятора 8-PSK, де кожні три біти об'єднуються в один символ. При цьому швидкість передачі зменшиться в три

рази і буде становити 11 Мсим/с, що відповідає частоті 11 МГц. В результаті модуляції генератора з частотою несучого коливання f_0 , отримаємо смугу частот модульованого сигналу в два рази більшою за верхню модулюючу частоту, тобто $11 \cdot 2 = 22$ МГц.

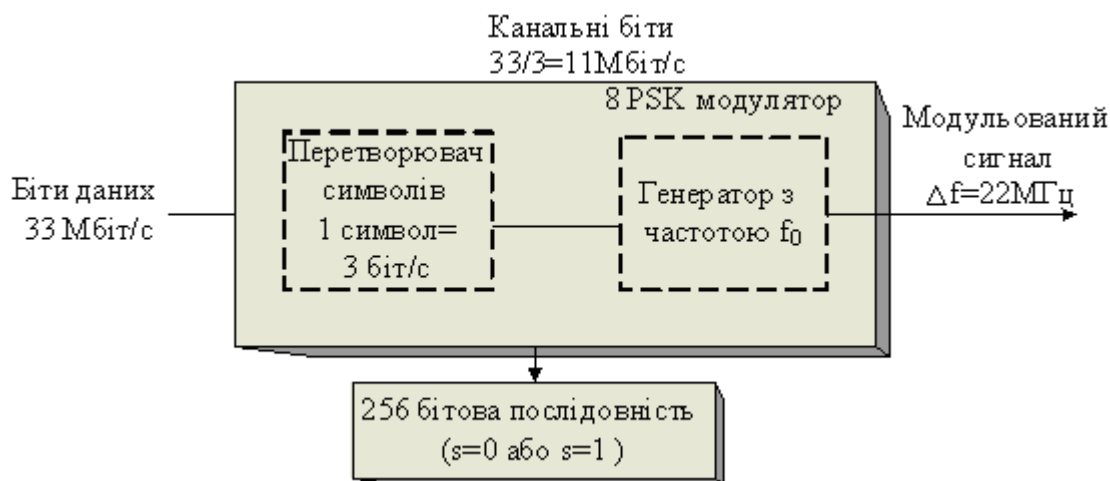


Рис.14.17 Узагальнена схема 8-PSK модулятора для швидкості 33 Мбіт/с

Для формування шумоподібного сигналу на виході модулятора на нього подається, як і передніх випадках, (в стандарті 802.11b при використанні методу RBCC для швидкостей 5.5 Мбіт/с та 11 Мбіт/с), шумоподібна послідовність з періодом повторення 256 біт/с. Згадана послідовність формує керуючий сигнал S (0, або 1), згідно якого вибирається один з типів сузір'я для 8-PSK модуляції (рис. 14.18).

Швидкість передачі 22 Мбіт/с

Вхідні дані поступають з швидкістю 22 Мбіт/с, а згортковий кодер ($k=7$, $R=1/2$) збільшує швидкість до $22 \cdot (2/1) = 44$ Мбіт/с. Далі в пунктурному кодері з швидкістю передачі $4/3$ надлишковість, утворена згортковим кодером, дещо зменшується – на кожних 4 вхідних біти передається три вихідних. В результаті швидкість потоку буде становити $44 \cdot (3/4) = 33$ Мбіт/с, яка подається на модулятор (рис. 14.19).

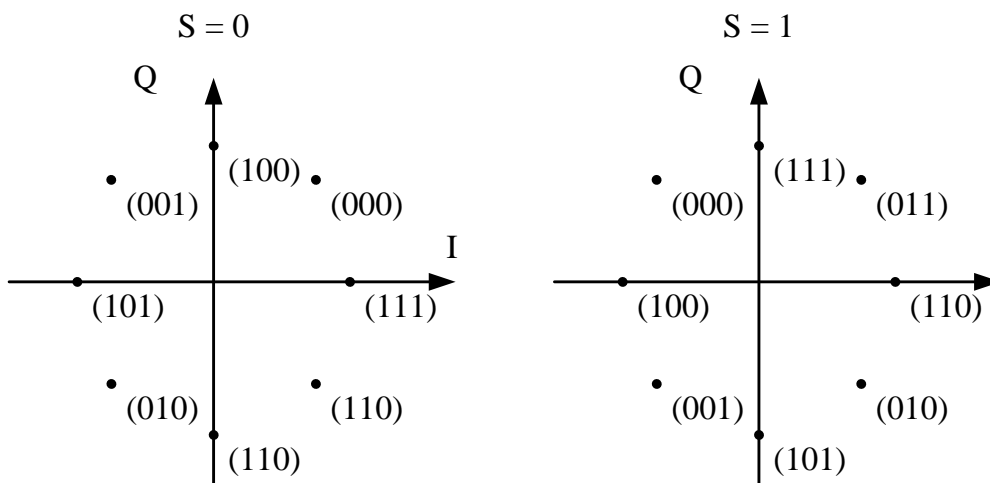


Рис.14.18 Типи сузір'їв для 8-PSK модуляції залежно від сигналу S

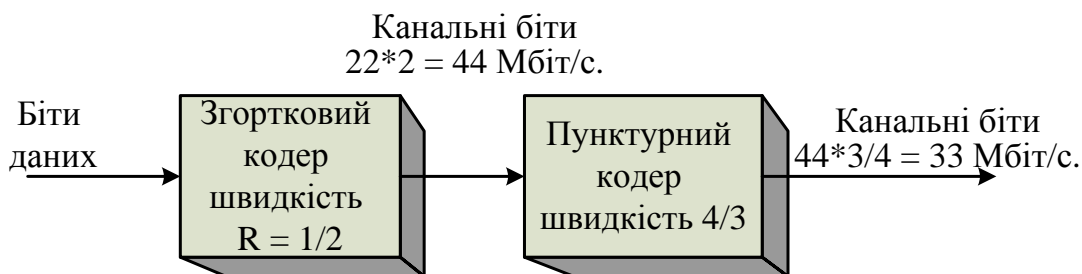


Рис.14.19 Забезпечення швидкості передачі 22Мбіт/с з використанням технології РВСС

Швидкість передачі 33 Мбіт/с

Вхідні дані поступають з швидкістю 33 Мбіт/с, а згортковий кодер ($k=7$, $R=1/2$) збільшує їх швидкість вдвічі до $33 \cdot 2 = 66$ Мбіт/с (рис. 14.20).

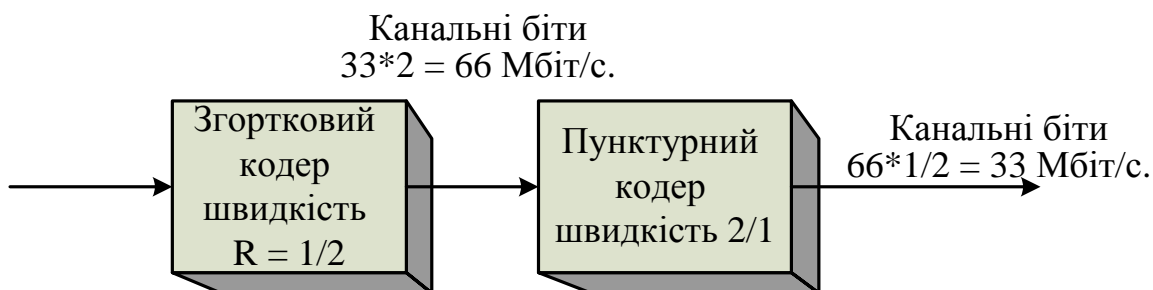


Рис.14.20 Забезпечення швидкості передачі 33Мбіт/с з використанням технології РВСС

Далі, в пунктурному кодері з швидкістю передачі 2/1 надлишковість, утворена згортковим кодером, зменшується – на кожних 2 вхідних біти передається один вихідний. В результаті швидкість потоку буде становити $66 \cdot (1/2) = 33$ Мбіт/с, який подається на модулятор.

14.3. OFDM модуляція

Для боротьби із завмираннями, викликаними багатопроменевим поширенням радіохвиль, в стандартах IEEE 802.11a,g використовуються сигнали з ортогональною частотною модуляцією (OFDM).

Стандарт 802.11a визначає вимоги до фізичного рівня (PHY) з використанням OFDM. У стандарті забезпечується передача даних з базовими швидкостями передачі 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 або 54 Мбіт/с. У OFDM сигналі використовується 52 піднесучих, чотири з яких застосовуються для передачі пілот-сигналів. Для передачі інформації використовуються 48 піднесучих. Смуга частот на одну піднесучу складає 0.3125 МГц:

$$\Delta f = \frac{\Delta F}{N}, \quad (14.7)$$

де, $\Delta F = 20$ МГц - смуга частот, яку займає OFDM-сигнал в радіоканалі; N - число піднесучих (точок перетворення Фур'є), рівне 64.

Таблиця 14.3 Швидкості передачі даних при використанні OFDM модуляції в стандарті IEEE 802.11a

Модуляція	Швидкість на виході OFDM модулятора, Мбіт/с
BPSK	6
BPSK	9
QPSK	12
QPSK	18
16-QAM	24

16-QAM	36
64-QAM	48
64-QAM	54

В стандарті 802.11g було запозичено методи OFDM стандарту 802.11a.

14.4. Фізичний рівень

Основним призначенням фізичних рівнів стандартів IEEE 802.11x є забезпечення передачі даних між MAC-рівнями безпроводних пристроїв та деяких додаткових функцій. Фізичні рівні стандартів IEEE 802.11x поділені на два підрівні:

- підрівень процедури визначення стану фізичного рівня - PLCP (Physical Layer Convergence Procedure);
- підрівень залежності від середовища передачі – PMD (Physical Medium Dependent).

Відповідність між рівнями моделі OSI/ISO та стандартів IEEE 802.11x зображена на рис. 14.21.

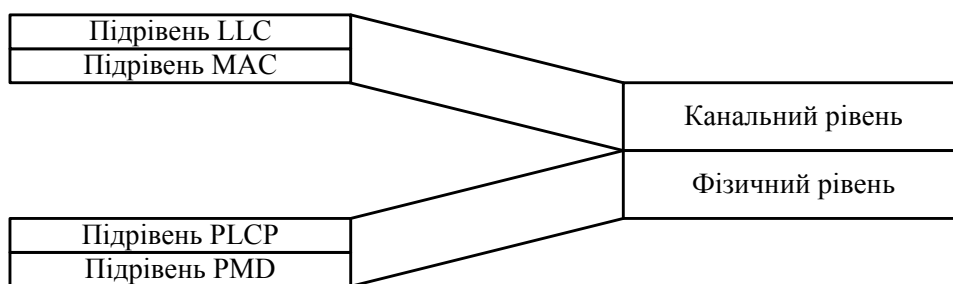


Рис.14.21 Рівні моделі OSI/ISO та стандартів IEEE 802.11x

Структура фреймів підрівня PLCP стандартів 802.11x

Після одержання даних від MAC-рівня (у вигляді фрейму), які необхідно передати через безпроводний канал, підрівень PLCP додає до нього власні поля. Дані, отримані від MAC-рівня називаються службовим елементом даних, або

PSDU (PLCP Service Data Unit).

Структура фреймів підрівня PLCP та призначення відповідних полів приведено нижче.

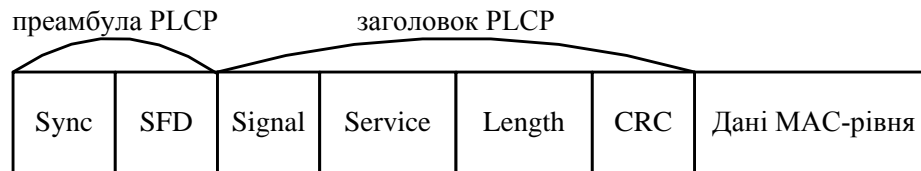


Рис.14.22 Структура фрейму підрівня PLCP технології DSSS стандарту 802.11

Призначення полів фрейму підрівня PLCP технології DSSS стандарту 802.11:

- Sync – для синхронізації приймача, 128 біт;
- SFD – таймінг (timing) для приймальної станції, 16 біт;
- Signal – міститься інформація про тип модуляції та швидкість передачі фрейму, 8 біт;
- Service – зарезервоване поле, 8 біт;
- Length – необхідний час в мікросекундах передачі частини фрейму, 16 біт;
- CRC – перевірка наявності помилок, 16 біт.

Підрівень PLCP технології HR-DSSS в стандарті 802.11b використовує фрейми двох типів: довгі, короткі. Преамбула та заголовок довгого фрейму передаються із швидкістю 1 Мбіт/с. Заголовок короткого фрейму передається із швидкістю 2 Мбіт/с, а PSDU із швидкістю 2, 5.5, 11 Мбіт/с. Структура короткого фрейму технології HR-DSSS є такою самою як і для технології DSSS в стандарті 802.11, за винятком довжини поля Sync 56 біт.

Внаслідок використання технології OFDM в стандарті 802.11a структура фрейму підрівня PLCP є іншою (рис.14.23).

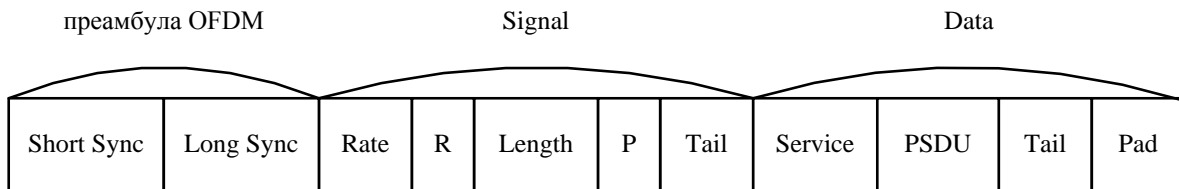


Рис.14.23 Структура фрейму підрівня PLCP технології OFDM стандарту 802.11a

Призначення полів фрейму підрівня PLCP технології OFDM стандарту 802.11a:

- преамбула OFDM містить два поля для автоматичного регулювання підсилення приймача, таймінгу, оцінки зміни частоти;
- Rate – швидкість передачі частини Data, 4 біти;
- R – зарезервовано, 1 біт;
- Length – кількість байт даних MAC-рівня, 12 біт;
- P – біт перевірки на парність полів, Rate, R, Length, 1 біт;
- Tail – містить 6 нулів;
- Service – використовується для синхронізації дескремблера приймача, 14 біт ;
- Tail – 6 нулів для повторної ініціалізації згорткового кодера приймача;
- Pad – біти доповнення.

В стандарті IEEE 802.11g є п'ять підрівнів PLCP: з довгою преамбулою, короткою преамбулою, преамбулою ERP-OFDM, довгою преамбулою DSSS-OFDM та короткою преамбулою DSSS-OFDM. Перші три підрівні є обов'язковим, а два останні додаткові.

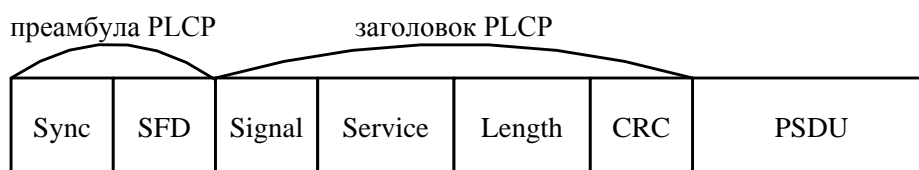


Рис.14.24 Структура фрейму підрівня PLCP з довгою преамбулою технології
ССК-OFDM стандарту 802.11g

15. MAN мережі стандартів IEEE 802.16 з модуляцією однієї несучої

15.1. Загальні зауваження

При переході до створення широкосмугового радіодоступу з інтеграцією послуг стало зрозумілим, що основоположні принципи, які закладені в безпроводні системи на попередніх етапах, потребують значної корекції. На фізичному рівні першочергового значення набуло оптимальне використання спектрального ресурсу радіоканалу при будь-яких співвідношеннях “швидкість – завадостійкість”. На вищих рівнях стало необхідним забезпечити заданий рівень якості обслуговування (QoS) кожному абоненту мережі.

Для вирішення згаданих проблем було розроблено ряд стандартів IEEE 802.16. Часто використовують комерційне ім'я безпроводного зв'язку IEEE 802.16 – WiMax (World Interoperability for Microwave Access). Воно походить від назви міжнародної організації WiMax Forum, в яку входять ряд провідних комунікаційних і напівпровідникових компаній (Airspan Networks, Alvarion Ltd., Aperto Networks, Fujitsu Microelectronics America, Intel, OFDM Forum, Proxim Corporation, Wi-LAN, та інші).

Призначення

Розроблені IEEE стандарти IEEE 802.16 представляють собою технологію безпроводного широкосмугового доступу, розраховану на забезпечення з'єднання “точка-багатоточка” і орієнтовані на створення мереж (рис. 15.1) масштабу мегаполісу (Metropolitan Area Network, MAN). Саме тому ці стандарти отримали також назву WirelessMAN.

Швидкість передачі в системі з даною технологією може досягати 136 Мбіт/с для стаціонарних користувачів і 2 Мбіт/с для мобільних при швидкості пересування до 250 км/год. Така технологія дозволяє об'єднати велику кількість локальних мереж Wi-Fi і забезпечити їм вихід до високошвидкісної магістральної мережі, а через неї – до Інтернету.

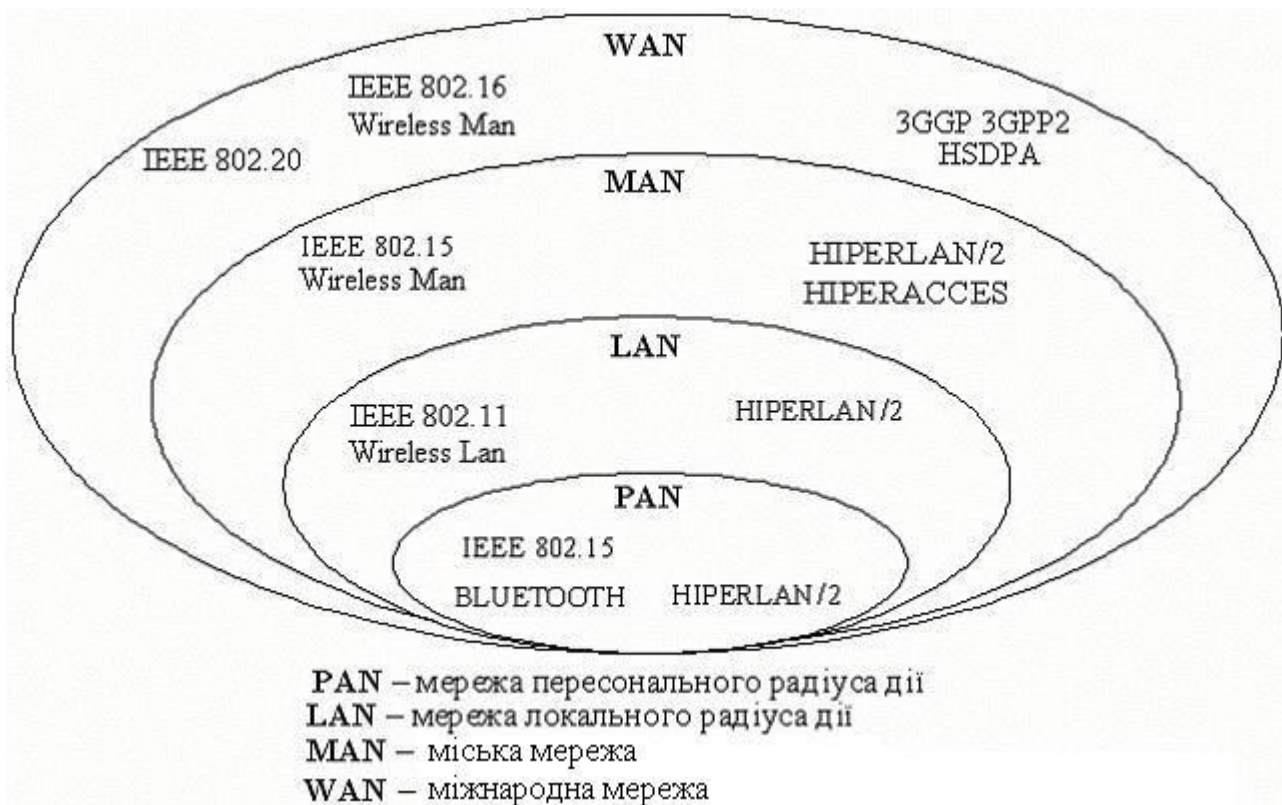


Рис.15.1 Стандарти безпроводних мереж

Ці стандарти описують принципи побудови мереж регіонального масштабу в діапазоні до 66 ГГц, точніше їх MAC-рівні (радіоінтерфейси, методи модуляції і доступу до каналів, системи управління потоками, структура передачі даних, механізми спряження протоколів передачі даних верхніх рівнів з протоколами фізичного рівня).

Існуючі системи провідного цифрового зв'язку вже не можуть в повній мірі забезпечити потреби високошвидкісного ширококутового доступу. Найважливішим їхнім недоліком є довгі терміни прокладання, великі затрати та проблема “останньої милі”. Основною серед них є проблема “останньої милі”, яку не знімають високошвидкісні цифрові лінії DSL.

Технологія на основі стандарту 802.16 дозволить вирішити цю проблему в найкоротші терміни. Адже набагато простіше розгорнути в місті мережу базових станцій, кожна з яких в типовому варіанті покриває зону 6-8 км (можливі і зони радіусом 30-50 км). Базові станції через мережі електровз'язку будуть мати вихід в національні, міжнародні мережі та Інтернет.

Вони забезпечують широкий набір послуг, гнучкий розподіл частот,

призначення пріоритетних трафіків, підтримку інтерфейсів E1/T1.

Безпроводна технологія 802.16 стає альтернативою провідним мережам, а в деяких випадках єдиним способом створення мережі MAN. У випадку успішного впровадження перших етапів 802.16 вона може успішно конкурувати з системами зв'язку GSM, WCDMA, та ін.

Особливості

Істотною відмінністю стандарту 802.16 від 802.11 є можливість використання протоколу з вирішенням конфліктів. Пристрої стандарту 802.11 працюють по принципах Ethernet: всі вони мають рівні права на доступ до радіотракту, а спробувавши одночасно встановити зв'язок, вирішують конфлікти, повторюючи спроби захоплення середовища через випадковий час. У мережах стандарту 802.16 є виділений пристрій — базова станція оператора, яка роздає своїм підлеглим права доступу до радіосередовища. В результаті є можливість ефективніше використовувати радіочастотний ресурс і забезпечити ефективну передачу даних.

Технологія OFDM знаходить застосування не тільки в стандарті 802.16. Наприклад, цей вид модуляції використовується в 802.11g. В стандарті 802.16 передбачений більш гнучкий розподіл смуги частот, яка використовується для передачі даних. Це можна зробити за рахунок зменшення кількості несучих, а також за рахунок їх звуження. Мінімальна ширина смуги сигналу, передбачена в стандарті, складає 1.25 МГц, а максимальна - 20 МГц. Зменшення ширини смуги сигналу приводить до зменшення швидкості передачі даних, проте цей захід дозволяє використовувати частотний спектр фрагментами, а не загалом, як в стандарті 802.11g.

Коротка історична довідка

В 1990-х роках з'явилося багато операторів з надання послуг широкосмугового доступу до мереж передачі даних загального користування. Але відсутність єдиних стандартів вплинула на вартість обладнання. Це

привело до низької рентабельності мереж широкопasmового доступу. Наявне обладнання було пристосоване до надання послуг телефонного зв'язку та відносно низькошвидкісної передачі даних. Крім того для діючих мереж в традиційному діапазоні частот (1.2÷1.5; 2.3÷2.5; 3.4÷3.6; 10.5 ГГц) виникла проблема “перенавантаженості” спектру і внаслідок цього вирішення завдань подальшого підвищення швидкостей передачі в освоєних діапазонах частот стало неможливим. Розвиток таких систем різко призупинився.

Перераховані фактори, а також багато інших, при вели до необхідності розробки нового стандарту, який дозволить реалізувати недороге обладнання для зв'язку в межах міста. Вирішенням проблеми став стандарт IEEE 802.16. (рис. 15.2).

Історія стандарту IEEE 802.16 ведеться з 2001 року, коли власне і почалася активна робота над створенням нового безпроводного стандарту широкопasmового зв'язку. В грудні 2001 року була прийнята перша версія стандарту IEEE 802.16–2001, який спочатку передбачав робочу смугу частот 10÷66 ГГц.

На фізичному рівні стандарт IEEE 802.16–2001 передбачав використання тільки одної несучої частоти (Single Carrier – SC), внаслідок чого в назву протоколу добавили букви SC, тобто WirelessMAN–SC.

Організація зв'язку в діапазоні 10÷66 ГГц можлива тільки в зоні прямої видимості через велике затухання коротких хвиль. Це було однією із особливостей протоколу WirelessMAN–SC. Однак частотний діапазон з такими характеристиками (тобто з потребою прямої видимості і неможливістю роботи з відбиттями сигналу) дозволяв уникнути однієї з головних проблем радіозв'язку – багатопроменевого поширення сигналу. Ширина каналів зв'язку, які застосовуються в цьому частотному діапазоні, є досить великою (переважно 25, або 28 МГц), що дозволяє досягати високої (порядку 120 Мбіт/с) швидкості передачі даних.

Необхідність побудови безпроводної мережі тільки в зоні прямої видимості призвела до того, що пристрої стандарту 802.16 так і не набули широкого

застосування. Тому трохи пізніше в січні 2003 року було прийняте розширення стандарту 802.16, яке отримало назву 802.16a–2003. Воно передбачало використання частотного діапазону від 2 до 11 ГГц. Цей стандарт також був орієнтований на створення стаціонарних безпроводних мереж міського масштабу. Допускалось, що дане розширення стане альтернативою традиційним рішенням широкосмугового доступу для “останньої милі” - кабельним модемам, xDSL, і каналам T1/E1. Крім цього, мережі стандарту 802.16a планувалось застосовувати в якості додаткових технологій для під’єднання точок доступу стандарту 802.11b/g/a до Інтернету.

Основною відмінністю стандарту 802.16a від базового стандарту 802.16 було використання другого частотного діапазону, який не потребує прямої видимості. Зона покриття таких безпроводних мереж значно більша, ніж мереж стандарту 802.16. Використання частотного діапазону 2÷11 ГГц потребувало значної перебудови техніки кодування і модуляції сигналів на фізичному рівні.

Логічним продовженням стандарту 802.16a став стандарт 802.16d, який передбачав можливість реалізації фіксованого доступу всередині приміщень.

Остаточню версію стандарту 802.16d було прийнято в липні 2004 року і отримав назву IEEE 802.16–2004, після чого необхідність розгляду окремих стандартів, тобто 802.16d і 802.16a, відпала, оскільки остаточна версія стандарту увібрала в себе обидва стандарти.

В даний час на стадії розробки знаходиться стандарт 802.16e, який розглядає питання роумінгу між мережами різних безпроводних стандартів, щоб користувач без втрати сеансу зв’язку міг переходити з безпроводних мереж стандарту IEEE 802.11 в мережі IEEE 802.16 і навпаки.

Вирішення питань роумінгу є досить важливим для подальшого розвитку безпроводних технологій. Сьогодні користувачі мереж стандарту IEEE 802.11 можуть користуватися послугами безпроводного доступу, тільки будучи на території хот-спота (зони доступу). З допомогою технології IEEE 802.16e користувачі отримають можливість оптимального з’єднання: за допомогою IEEE 802.11 – знаходячись в межах відповідного хот-спота, і за допомогою

IEEE 802.16 – знаходяться в зоні дії міської мережі WMAN.

Якщо протокол IEEE 802.16 – це протокол операторського класу, протокол 802.16e орієнтований на кінцевих користувачів, причому мобільних, і в цьому розумінні він представляє собою альтернативу стандартам 802.11a/b/g. На думку експертів Intel, в недалекому майбутньому користувач, маючи ноутбук, або КПК з вбудованими можливостями стандарту 802.16e, зможе постійно залишатися на зв'язку в будь-якій точці міста. Крім цього, прийняття IEEE 802.16 в якості загальноєвропейського стандарту дозволить активним мандрівникам користуватися роумінгом по всій Європі.

Найбільш активно просування IEEE 802.16 займається WiMax (World Wide Interoperability for Microwave Access) – некомерційна організація, створена за ініціативою Intel та участю провідних виробників телекомунікаційного обладнання (Airspan Networks, Alvarion Ltd., Aperto Networks, Fujitsu Microelectronics America, Intel, OFDM Forum, Proxim Corporation, Wi-LAN).

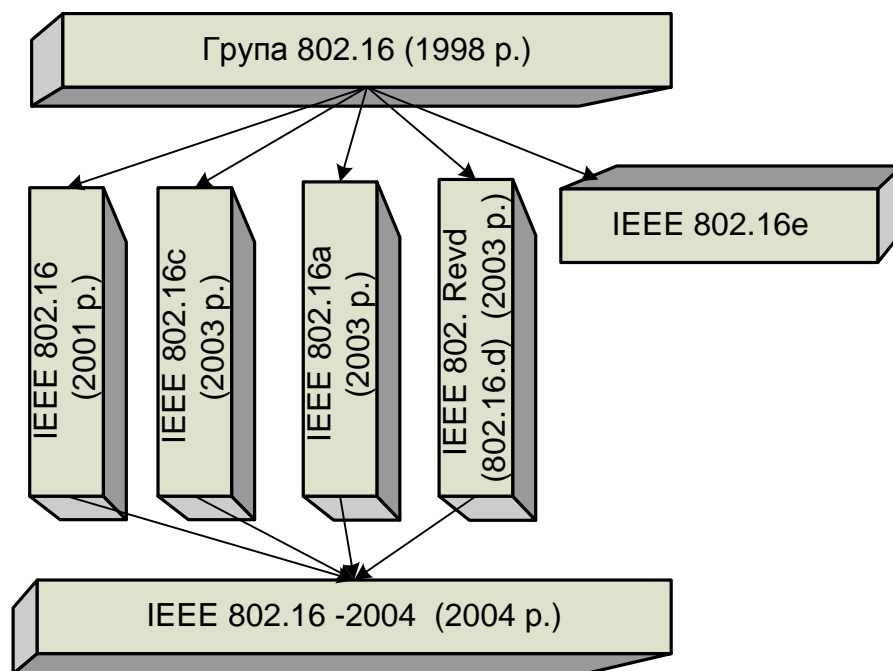


Рис.15.2. Етапи розвитку стандартів

Метою організації WiMax є сприяння розробці безпроводного обладнання для доступу до широкосмугових мереж, найшвидше розгортання мереж по

всьому світі, сертифікація обладнання 802.16, а також підготовка специфікацій, покликаних забезпечувати сумісність обладнання різних виробників.

Архітектура

Одна базова станція стандарту 802.16 може обслуговувати велику кількість користувачів, надаючи їм одночасно послуги різного рівня, наприклад (рис. 15.3):

- для 60 бізнес-користувачів швидкість передачі Е1 (2048 Кбіт/с);
- для сотні домашніх користувачів з меншими потребами.

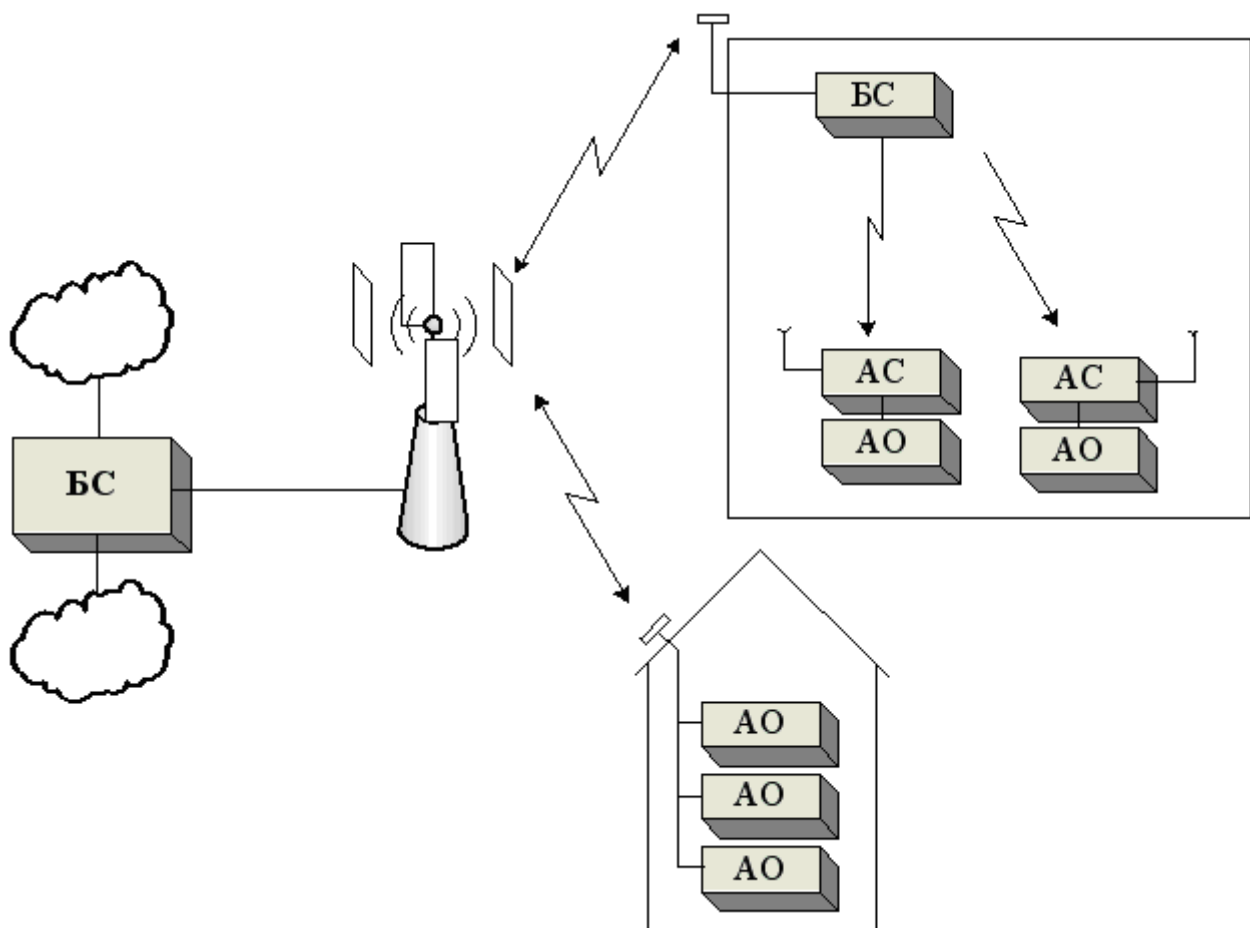


Рис.15.3 Структура мережі Wireless MAN

Основні методи передачі даних

На фізичному рівні стандарт 802.16 передбачає три принципово різних методи передачі даних:

- метод модуляції з однією несучою (SC, в діапазоні нижче 11 ГГц – SC2);
- метод модуляції за допомогою ортогональних несучих OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing);
- метод мультиплексування (множинного доступу) за допомогою ортогональних несучих OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access).

Відмітимо, що метод SC2 відрізняється від свого більш високочастотного аналога SC перш за все методами завадостійкого кодування і модуляцією (допускається квадратурна 256-QAM).

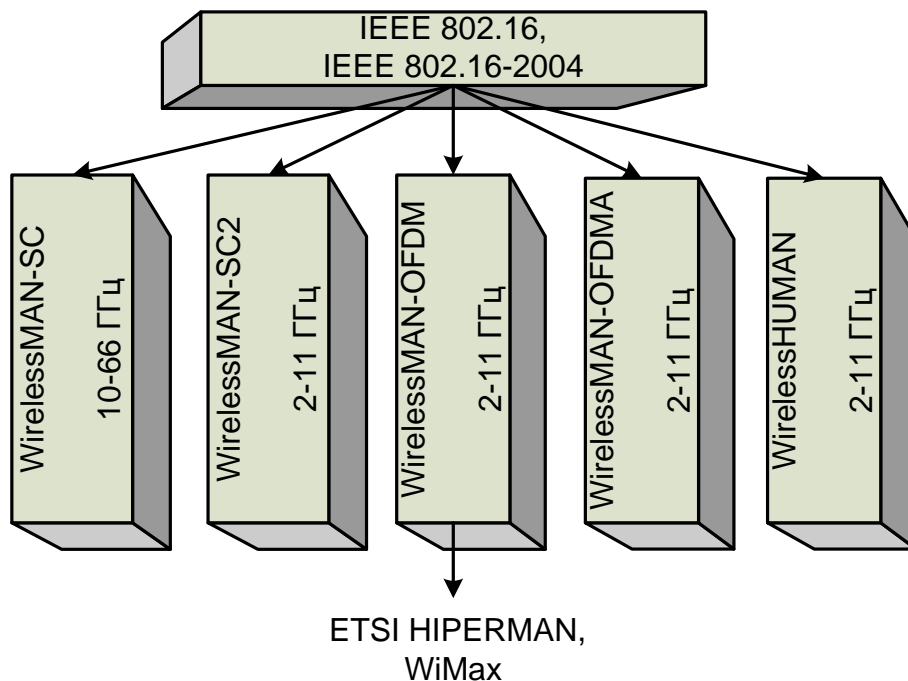


Рис.15.4 Стандарти IEEE 802.16

Слід відмітити, що в Європі Інститут стандартизації в області телекомунікації ETSI прийняв континентальний еквівалент стандарту 802.16, який називається ETSI HIPERMAN. HIPERMAN – це підмножина IEEE 802.16, що передбачає роботу в діапазоні 2÷11 ГГц тільки в одному режимі – WirelessMAN–OFDM.

Як вказано вище, часто використовують комерційну назву безпроводного

зв'язку IEEE 802.16 – WiMax. Насправді, WiMax, як і європейський HIPERMAN використовує режим WirelessMAN-OFDM.

В таблиці 15.1 наведені параметри даної технології.

Таблиця 15.1 Основні режими стандартів IEEE 802.16

Режим	Частотний діапазон	Опції	Дуплекс
WirelessMAN-SC	10÷66 ГГц		TDD/FDD
WirelessMAN-SCa	<11 ГГц	AAS/ARQ/STC/256-QAM	TDD/FDD
WirelessMAN-OFDM	<11 ГГц	AAS/ARQ/STC/MESH	TDD/FDD
WirelessMAN-OFDMA	<11 ГГц	AAS/ARQ/STC	TDD/FDD
WirelessMAN-HUMAN	<11 ГГц (неліцензований)	DFS/AAS/ARQ/Mesh/STC	TDD

Відмітимо, що всі режими діапазону менше 11 ГГц відрізняються трьома характерними деталями: механізми автоматичного запиту повторної передачі (ARQ – Automatic Repeat Request), підтримка роботи з адаптивними антенними системами (AAS – Adaptive Antenna System) і просторово-часове кодування (STC – Space Time Coding). Крім того, поряд з централізованою архітектурою “точка-мультиточка” в режимі WirelessMAN-OFDM передбачена підтримка архітектури Mesh - мережі (децентралізована мережа взаємодіючих систем, вузли якої забезпечують не тільки доступ до середовища передачі, а й підтримують ретрансляцію трафіку).

Розроблений стандарт IEEE 802.16-2004 представляє собою розраховану на інтеграцію в міські безпроводні мережі (WirelessMAN) технологію безпроводного широкосмугового радіодоступу операторського класу. В останньому – його основні відмінності від групи стандартів 802.11, що орієнтовані на роботу в безліцензійному діапазоні. Цей стандарт описує

принципи побудови мереж регіонального масштабу в діапазоні до 66 ГГц, точніше їх фізичні та MAC-рівні (радіоінтерфейси, методи модуляції і доступу до каналів, системи управління потоками, структура передачі даних, механізми спряження протоколів передачі даних верхніх рівнів з протоколами фізичного рівня). Для цього в стандарті передбачено п'ять режимів роботи. Бачимо, що тільки один з них – WirelessMAN-SC призначений для роботи в діапазоні 10÷66 ГГц. Він орієнтований на магістральні мережі (“точка-точка”, “точка-багатоточка”) в умовах прямої видимості, з типовими швидкостями потоку даних (bit stream) 120 Мбіт/с і шириною каналу порядку 25 МГц.

Решта режимів роботи розроблені для діапазонів менше 11 ГГц. Один з них – WirelessMAN-SCa – це “низькочастотний” варіант WirelessMAN-SC (з рядом додаткових механізмів). Режим WirelessHUMAN представляє собою адаптацію решти методів для роботи в безліцензійному діапазоні. Інші два режими – WirelessMAN-OFDM і WirelessMAN-OFDMA – це зовсім нові методи роботи (раніше входили в затверджений в 2003 р. стандарт IEEE 802.16a, але з того часу отримали ряд змін).

Ще одна особливість стандарту – в ньому передбачений режим роботи в безліцензійному діапазоні WirelessHUMAN (High-speed Unlicensed Metropolitan Area Network). Фактично мова йде про адаптацію описаних методів в смузі частот порядку 5÷6 ГГц. Основні відмінності WirelessHUMAN – це використання тільки часового дуплексу, режим динамічного розподілу частот DFS (Dynamic Frequency Selection) і механізм наскрізної нумерації частотних каналів.

15.2. Фізичний рівень стандартів IEEE 802.16

Для ознайомлення із принципами управління з'єднаннями і потоками даних в мережах IEEE 802.16 розглянемо загальні принципи передачі даних в фізичному каналі. В таблиці 15.2 приведені основні характеристики фізичного рівня для обладнання різних специфікацій стандарту IEEE 802.16.

Таблиця 15.2 Технічні характеристики обладнання різних специфікацій 802.16

Характеристика фізичного рівня	802.16	802.16a	802.16e
1. Δf , ГГц	10÷66	2÷11	2.4÷2.483, 3.4÷3.6, 5.7÷5.8
2. ΔF , МГц	ETSI: 28 US: 20; 25	ETSI: 1.75; 3.5; 7; 14; 28 US: 1.25; 5; 10; 20	1.75; 3.5; 7; 10
3. Умови використання	Пряма видимість	Пряма і непряма видимість	Пряма і непряма видимість
4. Швидкість передачі, Мбіт/с	30÷134.4 (для 28 МГц - каналу)	1÷75 (для 28 МГц - каналу)	1÷75 (для 5 МГц - каналу)
5. Модуляція даних	QPSK, 16QAM, 64QAM, одна несуча	QPSK, 16QAM, 64QAM, одна несуча, або QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM, додатково BPSK OFDM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
6. Швидкість модуляції, Мбод	1÷20	1÷20	1÷10
7. Біт/символ	2; 4; 6	2; 4; 6	2; 4; 6
8. Кількість точок Фур'є	32÷8192	64÷256	2048, або 4096
9. Корисне навантаження FEC, біт	0÷256	0÷256	0÷256
10. Преамбула, символи	16÷256	16÷256	16÷256

11. Заголовок РНУ, символи	<256	<256	<256
12. Кількість каналів	1÷n	1÷n	32, або 64
13. Потужність (крок 0,5дБ)	-128...+128	-128...+128	-128...+128
14. Модуляція несучої	WMAN-SC1	WMAN-SC2, WMAN-OFDM, WMAN-OFDMA	WMAN-OFDMA
15. Розділення каналів	TDMA	TDMA	TDMA, OFDMA
16. Дуплекс	TDD, FDD	TDD, FDD	TDD, FDD
17. Розмів блока FEC, байт	0÷511	0÷511	0÷511
18. Радіус зони покриття, км	2÷5	7÷10 максимальний - 50	4÷8

Розглянемо детальніше деякі характеристики фізичного рівня. Передача даних на фізичному рівні здійснюється шляхом передачі неперервної послідовності кадрів фіксованої тривалості. Дані про тривалість кадрів приведені в таблиці 15.3.

Таблиця 15.3 Тривалість кадрів фізичного рівня

Вид радіоінтерфейсу	Тривалість кадрів T_d , мс
WMAN-SC, WMAN-SC2	0.5; 1; 2
WMAN-OFDM	2.5; 4; 5; 8; 10; 12.5; 20
WMAN-OFDMA	2; 2.5; 5; 8; 10; 12.5; 20

Діапазон частот (п.1 табл. 15.2)

В стандарті передбачені діапазони 2÷11 ГГц та 10÷66 ГГц (рис. 15.5). В

діапазоні частот 10÷66 ГГц радіозв'язок можливий лише в умовах прямої видимості між точками. Тому використовується тільки безпосередня модуляція несучої (режим з одною несучою). Радіоінтерфейс діапазону 10÷66 МГц позначається як WirelessMAN-SC, або WMAN-SC.

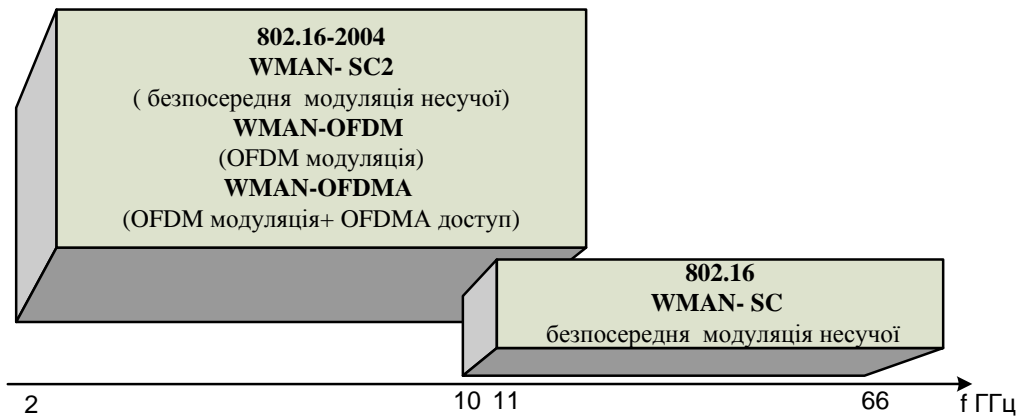


Рис.15.5 Розподіл в стандартах IEEE 802.16 радіоінтерфейсів за частотою

В діапазоні 2÷11 ГГц підтримується три специфікації радіоінтерфейсу, які допускають можливість радіозв'язку в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль та при відсутності прямої видимості. Відсутність прямої видимості може відбуватись внаслідок затінення траси поширення радіохвиль перешкодами, а багатопроменеве поширення виникає внаслідок відбиття від країв дахів, будинків, автомобілів і т.п.

Радіоінтерфейс в діапазоні 2÷11 ГГц:

- WMAN-SC2 використовує модуляцію одної несучої
- WMAN-OFDM використовує ортогональну частотну модуляцію (OFDM) з швидким перетворенням Фур'є на 256 точок;

WMAN-OFDMA використовує ортогональну частотну модуляцію (OFDM) і множинний доступ з ортогональним частотним розділенням (OFDMA) та швидким перетворенням Фур'є на 2048 точок.

Поділ частотного діапазону на канали з смугою ΔF МГц (п.2 табл. 15.2)

Для кожного стандарту виділений певний діапазон частот (рис. 15.5). Реально в даному діапазоні створюється декілька каналів з смугою частот ΔF (рис. 15.6).

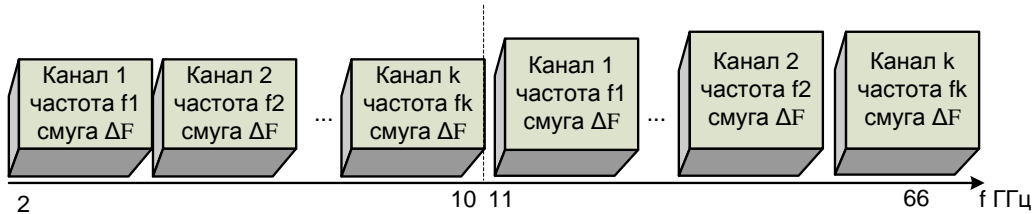


Рис.15.6 Поділ діапазонів стандартів 802.16 на частотні канали

Найменше значення смуги частот ΔF становить 1.25 МГц, а найбільше - 28 МГц. Очевидно, що при більших смугах частот можна передавати дані з більшою швидкістю. На рис. 15.7 приведені значення швидкостей передачі даних в залежності від смуги частот для різних типів інтерфейсів.

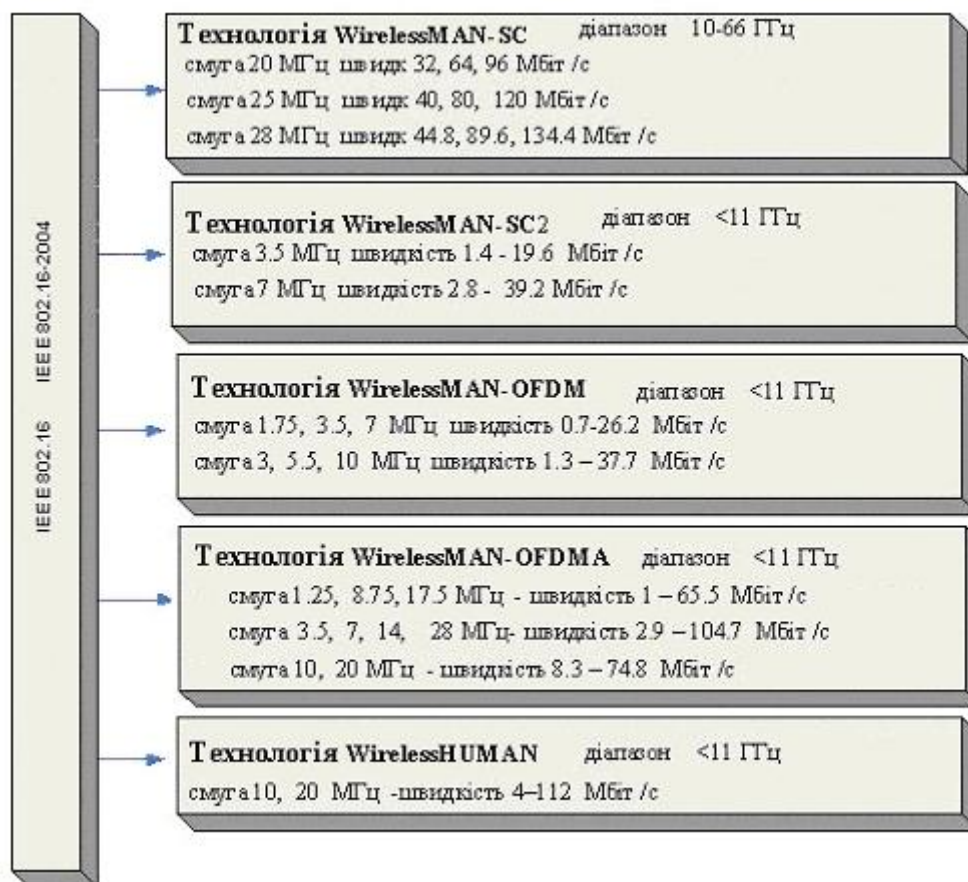


Рис.15.7 Залежність швидкості передачі від смуги частот для стандартів 802.16

Розділення дуплексних каналів (п.13 табл. 15.2)

Оскільки система, що визначається стандартом IEEE 802.16-2004, являється двонаправленою, необхідний дуплексний механізм розподілу каналів “вверх” та “вниз”. Для режиму частотного розділення дуплексного каналу (FDD) використовуються два різних канали для передачі “вниз” та “вверх” (рис.15.8). В кожному частотному каналі здійснюється часовий розподіл каналів (TDMA), тобто передається послідовність кадрів тривалістю T_d (таблиця 15.3).

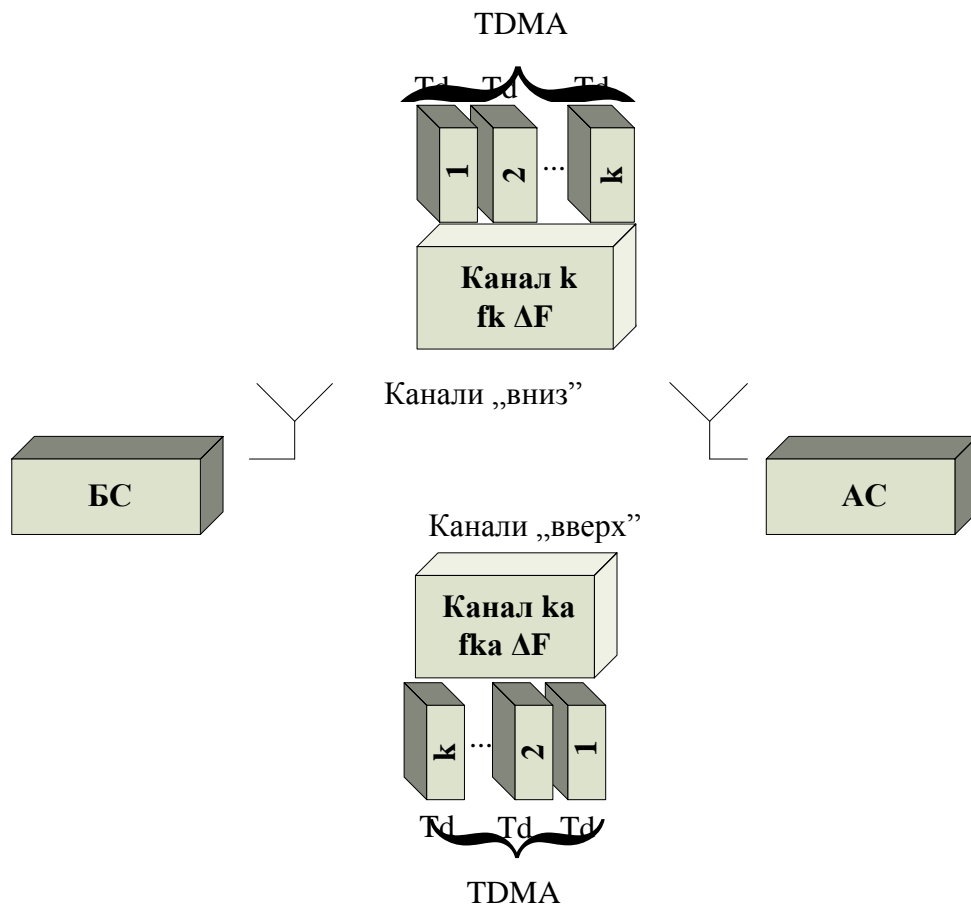


Рис.15.8 Частотне розділення дуплексних каналів

Для режиму часового розділення дуплексного каналу (TDD) використовується один канал для почергової передачі “вниз” та “вверх” (рис. 15.9). В кожному частотному каналі здійснюється часовий розподіл каналів

(TDMA), тобто передається послідовність кадрів тривалістю T_d (табл. 15.3). В даному випадку кожний кадр складається з двох субкадрів - для потоку “вниз” і для потоку “вверх”. Отже, на один субкадр виділяється час в 2 рази менший, порівняно з тривалістю основного кадру.

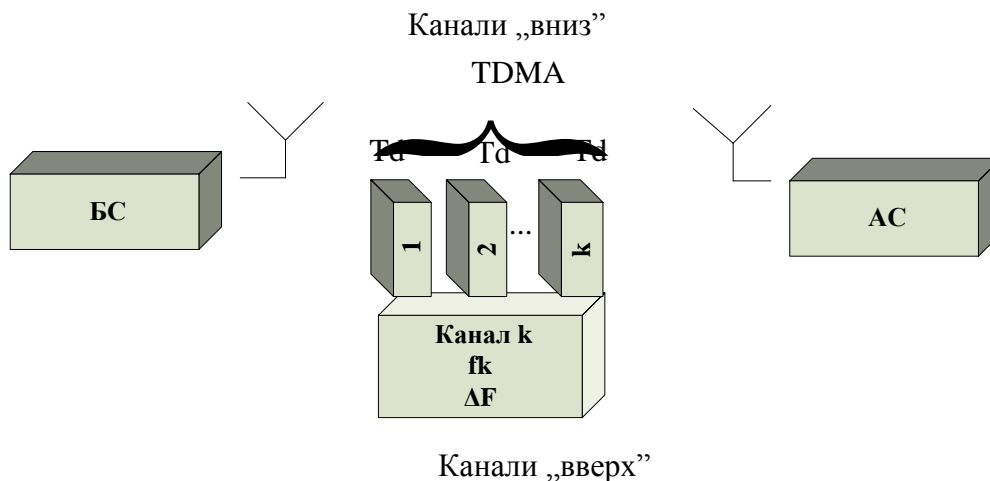


Рис.15.9 Часове розділення дуплексних каналів

Методи множинного доступу з різними видами розділення каналів (п.15 табл. 15.2)

В даних стандартах застосовується:

- часове розділення каналів TDMA для радіоінтерфейсів WMAN-SC на лінії “вверх” (при передачі на лінії “вниз” використовується часове розділення, при якому кожному активному абоненту виділяються часові вікна (слоти));
- часове розділення каналів TDMA для радіоінтерфейсів WMAN-SC2, WMAN-OFDM;
- ортогональне часове розділення каналів WMAN-OFDMA за рахунок надання для окремої АС декількох піднесучих в загальній смузі частот.

Тип модуляції (п.5 табл. 15.2)

Тип модуляції визначається радіоінтерфейсами, які використовуються: WMAN-SC, WMAN-SC2, WMAN-OFDM, WMAN-OFDMA.

В таблиці 15.4 приведені дані при види модуляції, які використають ці

радіоінтерфейси.

Таблиця 15.4 Види модуляції, які використовуються радіоінтерфейсами

Вид радіоінтерфейсу	Види модуляції
WMAN-SC	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
WMAN-SC2	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
WMAN-OFDM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
WMAN-OFDMA	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM

Кількість бітів на символ (п.7 табл. 15.2)

Кількість бітів на символ визначається видом модуляції, яка використовується. Спочатку модулююча двійкова послідовність відображується в послідовність символів, кожен з яких містить один, або декілька бітів. Стандарт підтримує багаторівневі види модуляції QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, які містять відповідно 2, 4, 6 або 8 бітів на символ.

Виходячи із вибраної схеми модуляції (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM), блок представляється у вигляді послідовності груп бітів, що відповідають символам модуляції (по 1, 2, 4, 6 біт). Кожній групі ставляться у відповідність значення I і Q із векторних діаграм Грея, які потім використовуються безпосередньо при модуляції несучої. Для усереднення амплітуд квадратурних символів використовуються нормалізовані (нормуючі) значення I і Q , тобто помножені на коефіцієнт c (для QPSK $c = \frac{1}{\sqrt{2}}$, для 16-QAM $c = \frac{1}{\sqrt{10}}$, для 64-QAM $c = \frac{1}{\sqrt{42}}$).

Сигнали з модуляцією QPSK, 16-QAM, 64-QAM в координатах I/Q приведено на рис. 15.10.

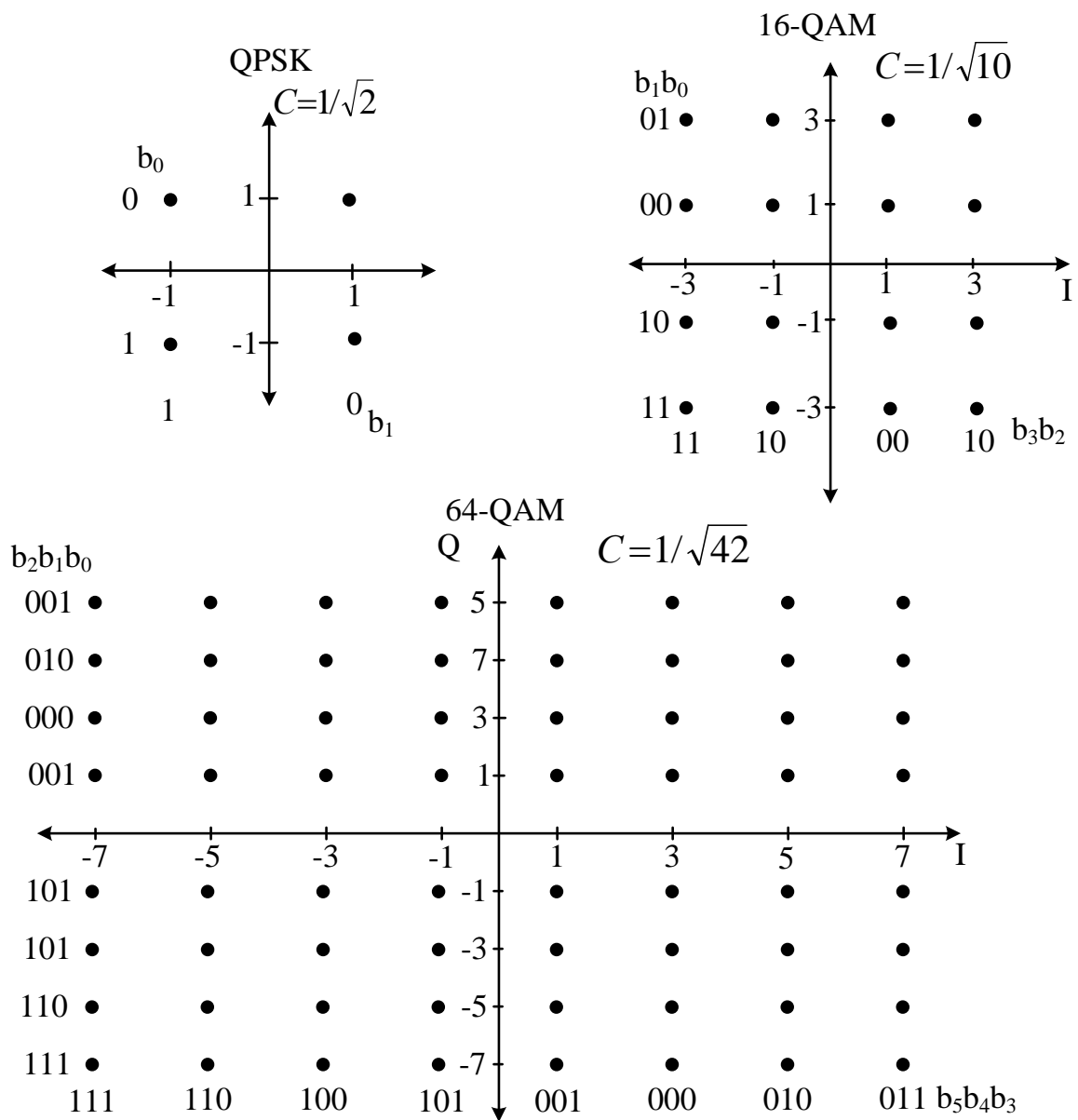


Рис.15.10 Структура сигналу з модуляцією QPSK, 16-QAM, 64-QAM

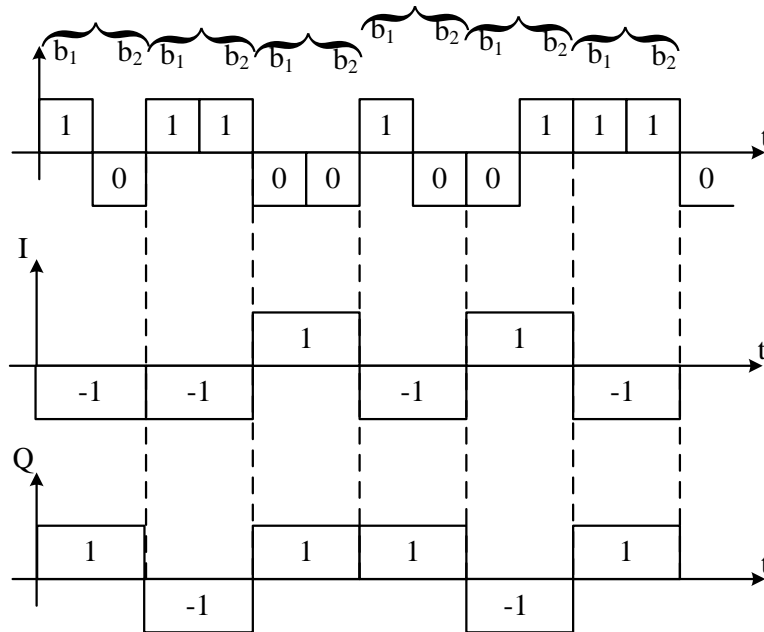
В таблиці 15.5 приведено залежності між парами двійкових символів та значеннями модулюючих символів I та Q для QPSK модуляції

На рис. 15.11 приведено перетворення послідовності двійкових символів в значення модулюючих символів I та Q згідно таблиці 15.5

Таблиця 15.5 Залежності для QPSK модуляції

b_0	b_1	I	Q
0	0	1	1

0	1	1	-1
1	0	-1	1
1	1	-1	-1



b_1	b_2	I	Q
0	0	1	1
0	1	1	-1
1	0	-1	1
1	1	-1	-1

Рис.15.11 Перетворення двійкових символів в квадратурні сигнали

Аналогічно в таблиці 15.6, таблиці 15.7 приведено залежності між двійковими символами та значеннями модулюючих символів I та Q для 16-QAM та 64-QAM модуляції, відповідно.

Таблиця 15.6 Залежності для 16-QAM модуляції

b_0	b_1	b_2	b_3	I	Q	b_0	b_1	b_2	b_3	I	Q
0	1	0	1	3	3	1	0	0	1	-1	3

0	1	0	0	3	1	1	0	0	0	-1	1
0	1	1	0	3	-1	1	0	1	0	-1	-1
0	1	1	1	3	-3	1	0	1	1	-1	-3
0	0	0	1	1	3	1	1	0	1	-3	3
0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	-3	1
0	0	1	0	1	-1	1	1	1	0	-3	-1
0	0	1	1	1	-3	1	1	1	1	-3	-3

Таблиця 15.7 Залежності для 64-QAM модуляції

b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	I	Q	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	I	Q
0	1	1	0	1	1	7	7	1	0	1	0	1	1	-1	7
0	1	1	0	1	0	7	5	1	0	1	0	1	0	-1	5
0	1	1	0	0	0	7	3	1	0	1	0	0	0	-1	3
0	1	1	0	0	1	7	1	1	0	1	0	0	1	-1	1
0	1	1	1	0	1	7	-1	1	0	1	1	0	1	-1	-1
0	1	1	1	0	0	7	-3	1	0	1	1	0	0	-1	-3
0	1	1	1	1	0	7	-5	1	0	1	1	1	0	-1	-5
0	1	1	1	1	1	7	-7	1	0	1	1	1	1	-1	-7
0	1	0	0	1	1	5	7	1	0	0	0	1	1	-3	7
0	1	0	0	1	0	5	5	1	0	0	0	1	0	-3	5
0	1	0	0	0	0	5	3	1	0	0	0	0	0	-3	3
0	1	0	0	0	1	5	1	1	0	0	0	0	1	-3	1
0	1	0	1	0	1	5	-1	1	0	0	1	0	1	-3	-1
0	1	0	1	0	0	5	-3	1	0	0	1	0	0	-3	-3
0	1	0	1	1	0	5	-5	1	0	0	1	1	0	-3	-5
0	1	0	1	1	1	5	-7	1	0	0	1	1	1	-3	-7
0	0	0	0	1	1	3	7	1	1	0	0	1	1	-5	7
0	0	0	0	1	0	3	5	1	1	0	0	1	0	-5	5
0	0	0	0	0	0	3	3	1	1	0	0	0	0	-5	3

0	0	0	0	0	1	3	1	1	1	0	0	0	1	-5	1
0	0	0	1	0	1	3	-1	1	1	0	1	0	1	-5	-1
0	0	0	1	0	0	3	-3	1	1	0	1	0	0	-5	-3
0	0	0	1	1	0	3	-5	1	1	0	1	1	0	-5	-5
0	0	0	1	1	1	3	-7	1	1	0	1	1	1	-5	-7
0	0	1	0	1	1	1	7	1	1	1	0	1	1	-7	7
0	0	1	0	1	0	1	5	1	1	1	0	1	0	-7	5
0	0	1	0	0	0	1	3	1	1	1	0	0	0	-7	3
0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	-7	1
0	0	1	1	0	1	1	-1	1	1	1	1	0	1	-7	-1
0	0	1	1	0	0	1	-3	1	1	1	1	0	0	-7	-3
0	0	1	1	1	0	1	-5	1	1	1	1	1	0	-7	-5
0	0	1	1	1	1	1	-7	1	1	1	1	1	1	-7	-7

Канальне кодування

Тракт обробки даних і формування вихідного сигналу для передачі через радіоканал в стандарті 802.16 звичайний для сучасних телекомунікаційних протоколів і практично однаковий для каналів “вверх” та “вниз” (рис. 15.12).

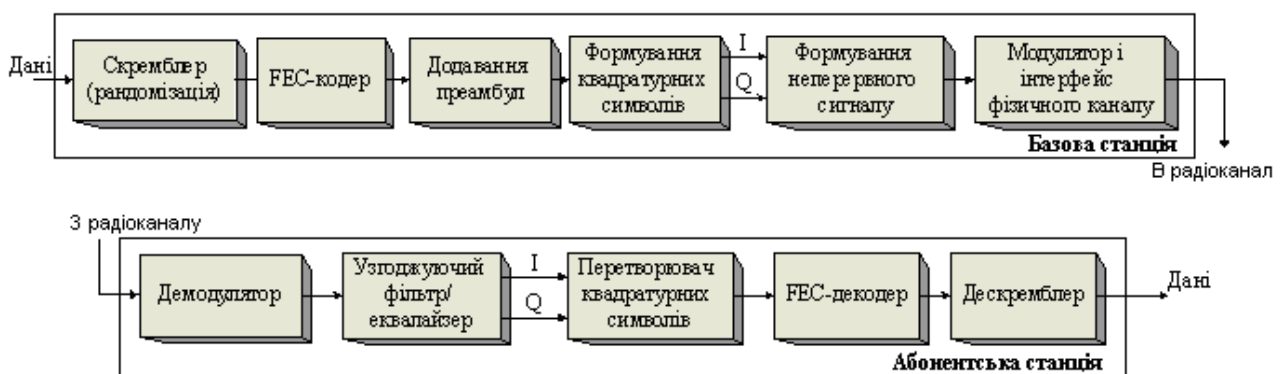


Рис.15.12 Тракт перетворення сигналу в режимі WirelessMAN-SC

Вхідний потік скремблюється – піддається рандомізації, тобто множення на псевдовипадкову послідовність. Далі, скрембльовані дані захищають

завадостійким кодом (FEC–кодування). При цьому можна використовувати одну з чотирьох схем кодування:

- код Ріда-Соломона з символами з поля Галуа GF(256);
- каскадний код з зовнішнім кодом Ріда-Соломона і внутрішнім згортковим кодом з кодовим обмеженням $k = 7$ (швидкість кодування $2/3$) з декодуванням по алгоритму Вітербі;
- каскадний код з зовнішнім кодом Ріда-Соломона і внутрішнім кодом з перевіркою на парність;
- блочний турбокод.

Розмір кодованого інформаційного блоку і кількість надлишкових байт не фіксовані – ці параметри можна задавати в залежності від умов передачі і вимог щодо якості послуг (QoS). Так, для коду Ріда-Соломона розмір вихідного блоку даних може бути від 6 до 255 байт, а кількість надлишкових байт до 32. Перші два алгоритми кодування обов'язкові для всіх пристроїв стандарту, два інші – додаткові.

15.3. Режим WirelessMAN-SC

Технологія передачі на одній несучій – Single Carrier (SC) – призначена для побудови мереж WirelessMAN в діапазоні 10÷66 ГГц з архітектурою “точка-багатоточка”. Це двонапрямлена система, тобто передбачені низхідний і висхідний потоки. При цьому наявні широкосмугові канали (до 25÷28 МГц), з високою швидкістю передачі (до 134.4 Мбіт/с).

Швидкість передачі

Метод WirelessMAN-SC (SC – Single Carrier), передбачає схему модуляції з однією несучою в кожному частотному каналі. Допускається три типи квадратурної амплітудної модуляції:

- 4-позиційна QPSK;
- 16-позиційна 16-QAM (обов'язкова для всіх пристроїв);

- 64-QAM (додатково).

Кодовані блоки даних перетворюються в модулюючі символи (кожні 2/4/6 біт визначають один символ QPSK/16-QAM/64-QAM) у відповідності з приведеними в стандарті таблицями – кожній групі 2/4/6 біт ставиться у відповідність синфазна I і квадратурна Q координати (рис. 15.10). Максимальні швидкості передачі для систем SC представлені в таблиці 15.8, при цьому мова йде про швидкості передачі бітів без врахування затрат на кодування. З врахуванням кодування та оверхеду (невипадкових затрат на передачу службової інформації і технологічних часових затрат) пропускна здатність складає в середньому не більше половини від вказаної швидкості.

Таблиця 15.8 Швидкості передачі для систем SC

Смуга частот на канал, МГц	Швидкість модуляції, Мбод	Швидкість передачі інформації			Тривалість кадру, мс	Кількість абонентів на кадр
		QPSK	16-QAM	64-QAM		
20	16	32	64	96	1	4000
25	20	40	80	120	1	5000
28	22.4	44.8	89.6	134.4	1	5600

Як видно з таблиці 15.8 ширина смуги сигналів збільшується в $N_g = 1.25$ рази порівняно з модулюючою частотою ($N_g = 20/16 = 25/20 = 28/22.4 = 1.25$). Це досить добрий показник (нагадаємо, що при модуляції прямокутними імпульсами, які містять 1 і 3 гармоніки $N_g = 3$, а при модуляції “згладженими” імпульсами, близькими до гармонічного коливання, $N_g = 1$). Для забезпечення необхідного значення $N_g = 1.25$ послідовність дискретних значень в каналі I і Q перетворюються за допомогою так званого фільтру “припіднятий косинус” (square-root raised cosine filter) у неперервні (згладжені) сигнали.

Функція передачі фільтру “припіднятий косинус” наступна:

$$H(f) = \begin{cases} 1, & |f| < f_N(1 - \alpha) \\ \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{2 \cdot f \cdot n} \left(\frac{f_N - |f|}{\alpha} \right) \right]}, & f_N(1 - \alpha) \leq |f| \leq f_N(1 + \alpha), \\ 0, & |f| > f_N(1 + \alpha) \end{cases} \quad (15.1)$$

де α – коефіцієнт вибірковості (за стандартом IEEE 802.16 $\alpha = 0.25$); f_N – частота Найквіста, рівна половині частоти дискретизації.

Фільтровані потоки $I(t)$ і $Q(t)$ поступають безпосередньо в квадратурний модулятор, де формується вихідний сигнал:

$$S(t) = I(t) \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \sin(2\pi f_c t), \quad (15.2)$$

f_c – несуча частота.

Далі, сигнал підсилюється і передається в ефір. На приймальній стороні все проходить в зворотному порядку. В результаті, залежно від ширини каналу і методу модуляції формується достатньо широкий набір швидкостей потоку даних.

Розділення дуплексних каналів (FDD, TDD) та множинний доступ TDMA

Інтерфейс використовує частотне (FDD) та часове (TDD) розділення дуплексних каналів з часовим методом множинного доступу.

Для обміну даними в системах стандарту 802.16 використовуються кадри тривалістю 0.5; 1 і 2 мс. Кадри діляться на часові вікна (слоти) фізичного рівня з метою розподілу пропускної здатності. Інформаційна ємність кожного кадру визначається:

- символічною швидкістю
- методом модуляції.

Для кожного пакету можна задавати метод модуляції та схему кодування даних, тобто вибирати між швидкістю та надійністю передачі.

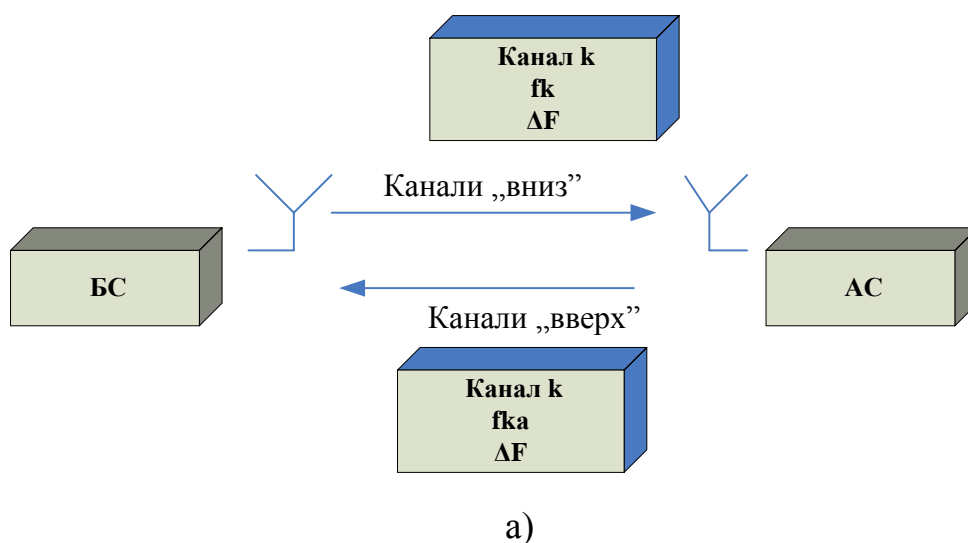
Забезпечення дуплексного зв'язку здійснюється шляхом поділу кадрів на підкадри. Для режиму частотного розділення дуплексного каналу підкадри ліній “вверх” та “вниз” передаються незалежно на різних частотах. Для режиму часового розділення дуплексного каналу підкадр лінії “вверх” розміщений за підкадром лінії “вниз” на одній несучій частоті. Підкадр напрямку “вниз” починається з поля керування, яке містить преамбулу та інформацію про структуру підкадрів:

- в полі DL-MAP – підкадру “вниз”;
- в полі UL-MAP – підкадру “вверх”.

Преамбула необхідна для тактової синхронізації та інформації про початок поля керування.

Частотний розподіл дуплексних каналів

На рис. 15.13 приведено структуру кадрів для частотного розподілу дуплексних каналів.



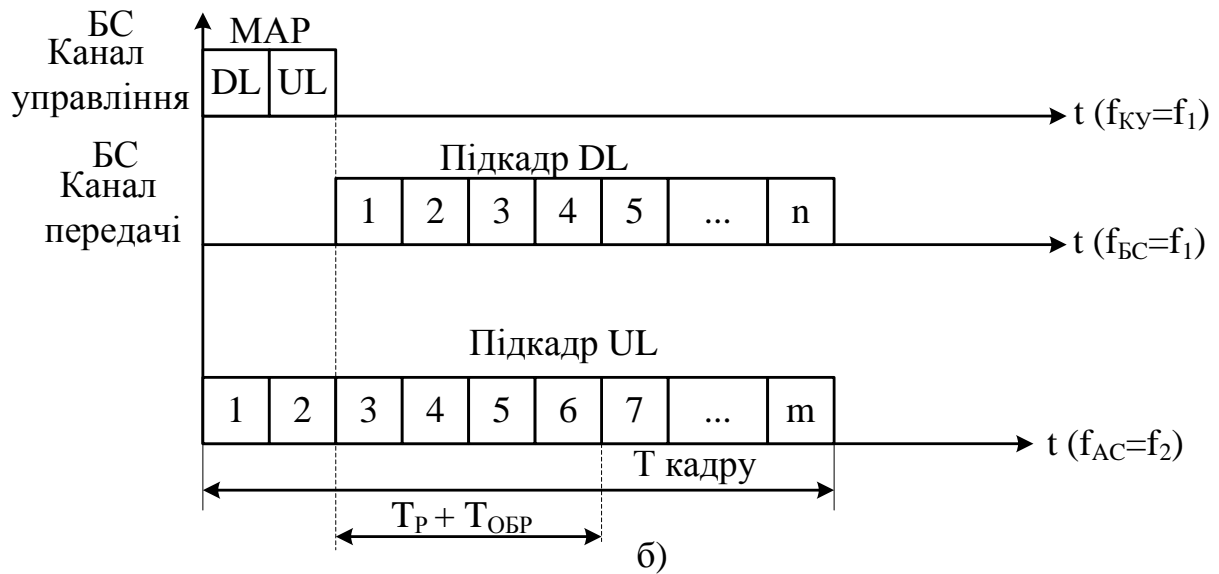


Рис.15.13 Частотне розділення дуплексних каналів (а) та структура кадрів (б)

Часовий розподіл дуплексних каналів. На рис. 15.14 приведено структуру кадрів для частотного розподілу дуплексних каналів.

Структура підкадрів “вниз” та “вверх”

Підкадр “вниз” містить розділені в часі (TDM - Time Division Multiplex, метод часового мультиплексування) поля даних (рис. 15.15). Для даних, які виникають раптово, використовуються поля (TDMA) з часовим доступом до каналу.



а)

відраховується в фізичних слотах, кожний фізичний слот рівний чотирьом модулюючим символам.

Профіль пакету – це список його параметрів, включаючи метод модуляції, тип FEC–кодування (з параметрами схем кодування), а також діапазон значень відношення сигнал/шум в приймальному каналі конкретної станції, при якому даний профіль може застосовуватися. Список профілів у вигляді спеціальних управляючих повідомлень – дескрипторів низхідного і висхідного каналів (DCD/UCD) – транслюються базовою станцією з періодом не менше 10 с, причому кожному профілю присвоюється номер, який і використовується в карті каналу “вниз”.

В субкадрі “вниз” пакети розташовуються в чергу з нерівним (неоднаковим) захистом пакетів так, що найбільш завадозахищені пакети передаються першими (управляюча секція завжди передається за допомогою QPSK–модуляції). Якщо цього не зробити, абонентські станції з поганими умовами прийому, яким призначаються найбільш захищені пакети, можуть втратити синхронізацію в очікуванні своєї порції інформації. Пакети в субкадрі “вниз” слідують один за одним без інтервалів передуючих їм заголовків і ідентифікуються абонентськими станціями на основі інформації в DL–MAP.

Структура підкадру “вверх” для фізичного рівня діапазону частот 10÷66 ГГц приведена на рис. 15.16.

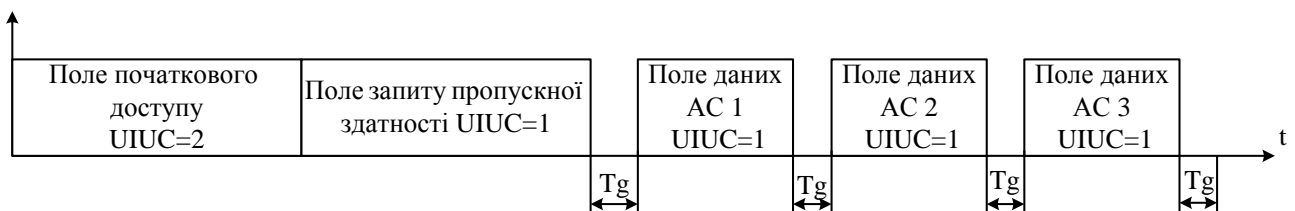


Рис.15.16 Структура підкадру “вверх”

На відміну від лінії “вниз” поле UL–MAP надає пропускну здатність з врахуванням специфіки АС, які передають дані у відведені для них моменти часу (використовуючи “раптові” пакети), що визначаються з допомогою коду

інтервалу використання лінії “вверх”, розміщеного в полі UL-MAP каналу управління (надає їм відповідну ємність каналу).

15.4. Режим WirelessMAN-SC2

При способі модуляції з одною несучою (WirelessMAN-SC2) характеристики систем 802.16 аналогічні приведеним для видів модуляції WirelessMAN-SC, але з відмінностями в діапазоні та смузі частот.

Технологія передачі на одній несучій Single Carrier версії а (SCa) передбачена для створення безпроводних мереж в ліцензованих (WirelessMAN – Wireless Metropolitan Area Network) і не ліцензованих (WirelessHUMAN – Wireless High speed Unlicensed MAN) діапазонах частот нижче 11 ГГц. Передбачено використання модуляцій BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM (додатково).

Для WirelessMAN розроблені профілі для смуг частот 3.5 і 7 МГц. Передбачено використання в режимі частотного дуплексу FDD наступних ліцензованих діапазонів частот:

- 2523 ÷ 2593 МГц, 2597 ÷ 2667 МГц;
- 3410 ÷ 3445 МГц, 3460 ÷ 3495 МГц;
- 3500 ÷ 3549 МГц, 3550 ÷ 3599 МГц;
- 3600 ÷ 3649 МГц, 3650 ÷ 3699 МГц;
- 3700 ÷ 3749 МГц, 3750 ÷ 3799 МГц.

Для WirelessHUMAN розроблені профілі для режиму часового дуплексу TDD в смугах частот 10 і 20 МГц в не ліцензованих у більшості країн частотних діапазонах:

- 5270 ÷ 5340 МГц.
- 5735 ÷ 5835 МГц;
- 5730 ÷ 5850 МГц.

Значення швидкостей передачі для технології SCa, а також для

розглянутих нижче технологій OFDM і OFDMA в стандарті не приводяться, замість них представлені формули. Використавши приведені в стандарті значення змінних, можна обчислити значення швидкостей передачі з врахуванням кодування. Результати розрахунків наведені в таблиці 15.9. Слід відмітити, що значення реальної пропускну здатності будуть на 20÷50 % менші через оверхед в пакетних системах.

Таблиця 15.9 Основні характеристики технології SC2

Модуляція кодова швидкість	Швидкість передачі, Мбіт/с при ширині каналу, МГц			
	3.5	7	10	20
BPSK 1/2	1.4	2.8	4.0	8.1
BPSK 3/4	2.1	4.2	6.1	12.2
QPSK 1/2	2.8	5.6	8.1	16.2
QPSK 2/3	3.7	7.5	10.8	21.6
QPSK 3/4	4.2	8.4	12.1	24.3
QPSK 5/6	4.6	9.4	13.5	27.0
QPSK 7/8	4.9	9.9	14.1	28.4
16QAM 1/2	5.6	11.3	16.2	32.5
16QAM 3/4	8.3	16.9	24.2	48.7
64QAM 2/3	11.1	22.5	32.3	64.9
64QAM 5/6	13.9	28.2	40.4	81.1
256QAM 3/4	16.7	33.8	48.5	97.4
256QAM 7/8	19.5	39.4	56.5	113.6

16. MAN МЕРЕЖІ СТАНДАРТІВ IEEE 802.16 З OFDM МОДУЛЯЦІЄЮ

16.1. Режим WirelessMAN-OFDM

Особливості інтерфейсу WMAN-OFDM

Одним з основних для діапазону 2÷11ГГц стандарту 802.16 є радіоінтерфейс, який використовує ортогональну частотну модуляцію (OFDM), що передбачає наявність багатьох піднесучих.

Технологія ортогонального частотного мультиплексування (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) призначена для створення безпроводних мереж в ліцензованих (WirelessMAN) і не ліцензованих (WirelessHUMAN) діапазонах частот нижче 11 ГГц.

Конкретні діапазони частот визначаються правилами регіонального частотного регулювання і в стандарті не описуються. Розраховані значення швидкостей передачі для рекомендованих в профілях стандарту смуг частот представлені в таблиці 16.1.

Таблиця 16.1 Основні характеристики технології OFDM

Модуляція кодова швидкість	Швидкість передачі, Мбіт/с при ширині каналу, МГц					
	1.75	3.5	7	3	5.5	10
BPSK 1/2	0.7	1.5	2.9	1.3	2.3	4.2
QPSK 1/2	1.5	2.9	5.8	2.5	4.6	8.4
QPSK 3/4	2.2	4.4	8.7	3.8	6.9	12.6
16QAM 1/2	2.9	5.8	11.6	5.0	9.2	16.8
16QAM 3/4	4.4	8.7	17.5	7.5	13.8	25.1
64QAM 2/3	5.8	11.6	23.3	10.0	18.3	33.5
64QAM 3/4	6.5	13.1	26.2	11.3	20.6	37.7

При використанні інтерфейсу WirelessMAN-OFDM наявні 256 піднесучі, причому серед них:

- 192 піднесучі;

- 8 контрольних (пілот) піднесучих;
- 56 порожніх (null) піднесучих.

На практиці в субканалах даних переважно застосовують PSK, або QAM модуляцію. Контрольні субканали дозволяють врахувати зсуви частоти і фази в процесі передачі.

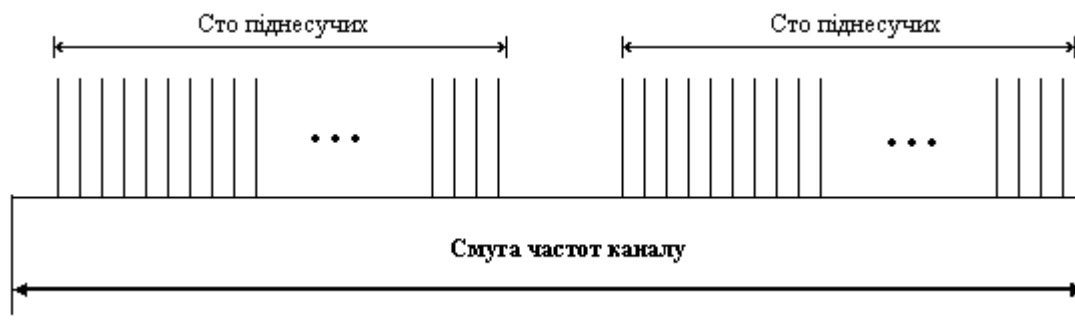


Рис.16.1 Суть технології OFDM

Технологія OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – це добре забуте старе. Основні постулати OFDM були сформовані ще в 1960-их роках. Тепер настав час, коли розвиток мікропроцесорної техніки дозволяє створити мініатюрні недорогі прийомо-передавачі, що використовують OFDM. Технологія OFDM широко застосовується як в провідному (ADSL), так і в безпроводному (IEEE 802.11 a/g Wi-Fi, WiMax) зв'язку, а також в мережах цифрового радіомовлення і телебачення.

Сам підхід до збільшення швидкості передачі OFDM аналогічний звичайному частотному розділенню каналів FDM і полягає у використанні в усій доступній смузі частот більшої кількості вузькосмугових каналів – піднесучих (subcarriers). У простішому випадку кожна піднесуча відповідає за свій окремий біт, а всі разом вони представляють кодове слово, в якому використовуються методи відновлення інформації – коди Ріда-Соломона і згорткові коди. Таким чином можна в декількох окремих частотних смугах передавати дані паралельно.

При цьому важливою умовою є те, що окремі вузькосмугові сигнали даних не накладаються один на одного у вигляді завад і їх можна відділити на приймальній стороні. У випадку FDM це досягається завдяки введенню між сигналами даних порожніх захисних інтервалів (рис. 16.2).

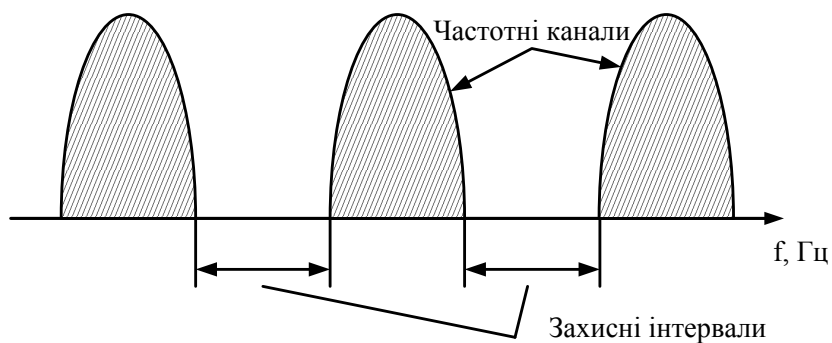


Рис.16.2 Частотне (FDM) розділення каналів

Необхідність використання ортогональних частот

OFDM подібний до FDM, але спектральна ефективність тут вища завдяки розміщенню піднесучих з корисним навантаженням ближче одна до одної. Це досягається завдяки спеціальному вибору ортогональних несучих частот. Ортогональність означає, що максимум однієї піднесучої співпадає з нулями всіх інших (рис. 16.3). В результаті спектри сигналів перетинаються, але при цьому не відбувається їхня взаємна інтерференція.

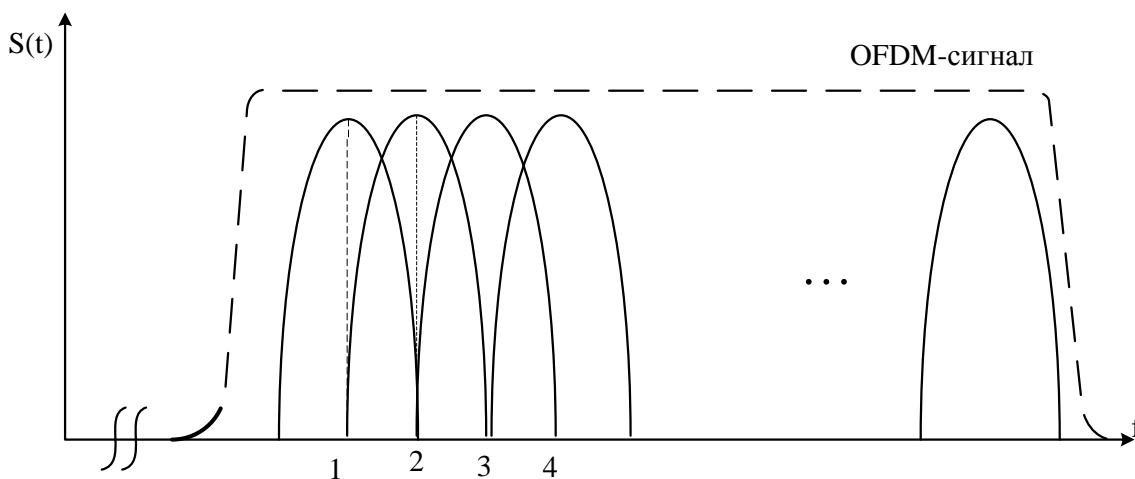


Рис.16.3 Принцип ортогонального частотного розділення каналів

При частотному розділенні каналів необхідно, щоб ширина окремого каналу була з одного боку достатньо вузька для мінімізації спотворення сигналу в межах окремого каналу, а з іншого - достатньо широка для забезпечення необхідної швидкості передачі. Крім того для економного використання всієї смуги каналу, що розділяється на підканали, бажано:

- якомога щільніше розташувати частотні підканали;
- при цьому уникнути міжканальної інтерференції, щоб забезпечити повну незалежність каналів один від одного.

Частотні канали, що задовольняють перерахованим вимогам, називаються ортогональними.

Несучі сигнали всіх частотних підканалів (а точніше, функції, що описують ці сигнали) ортогональні один до одного. Важливо, що хоча самі частотні підканали можуть частково перекриватися один з одним, ортогональність несучих сигналів гарантує частотну незалежність каналів один від одного, а отже, і відсутність міжканальної інтерференції.

Розглянутий спосіб ділення широкосмугового каналу на ортогональні частотні підканали називається ортогональним частотним розділенням з мультиплексуванням (OFDM).

Можливість функціонування в умовах непрямой видимості

Як вже наголошувалося, однією з особливостей стандарту 802.16 є можливість роботи в умовах непрямой видимості. Це досягається за рахунок використання технології ортогонального частотного розділення каналів з мультиплексуванням, яка дозволяє ефективно боротися з таким негативним явищем, як багатопроменеве поширення сигналів. Ефект багатопроменевого поширення сигналів полягає в тому, що в результаті багатократних відбиттів сигналу від різних перешкод, один і той же сигнал може потрапляти в приймач різними шляхами. Але подібні шляхи розповсюдження мають і різні довжини, а

тому для різних шляхів розповсюдження згасання сигналу буде неоднаковим. Отже, в точці прийому результуючий сигнал є суперпозицією (інтерференцією) багатьох сигналів, що мають різні амплітуди і зміщені один відносно одного за часом, що еквівалентно накладанню сигналів з різними фазами.

Наслідком багатопроменевого поширення є спотворення сигналу, що приймається. Багатопроменеве поширення властиве будь-якому типу сигналів, але особливо негативно вона позначається на широкосмугових сигналах. Річ у тому, що при використанні широкосмугового сигналу в результаті інтерференції певні частоти складаються синфазно, що приводить до збільшення сигналу, а деякі, навпаки, протифазно, викликаючи ослаблення сигналу на даній частоті.

Розглядаючи багатопроменеве поширення, що виникає при передачі сигналів, розрізняють два крайні випадки:

- у першому максимальна затримка між різними сигналами не перевищує часу тривалості одного символу, і інтерференція виникає в межах одного символу, що передається;
- у другому випадку максимальна затримка між різними сигналами більша за тривалість одного символу, а в результаті інтерференції складаються сигнали, що представляють різні символи, і виникає так звана міжсимвольна інтерференція (Inter Symbol Interference, ISI).

Найбільш негативно на спотворення сигналу впливає міжсимвольна інтерференція. Оскільки символ - це дискретний стан сигналу, що характеризується значеннями частоти несучої, амплітуди і фази, для різних символів міняються амплітуда і фаза сигналу, а значить, відновити початковий сигнал вкрай складно.

Щоб уникнути, а точніше, частково компенсувати ефект багатопроменевого поширення, використовуються частотні еквайзери. Проте в міру зростання швидкості передачі даних, збільшення символної швидкості,

або із-за ускладнення схеми кодування, ефективність використання еквалайзерів падає.

В результаті при вищих швидкостях передачі застосовується метод кодування даних, який полягає в тому, що потік даних, які передаються розподіляється по безлічі частотних підканалів, і передача ведеться паралельно на всіх цих підканалах. При цьому висока швидкість передачі досягається саме за рахунок одночасної передачі даних по всіх каналах, а швидкість передачі в окремому підканалі може бути малою.

Оскільки в кожному з частотних підканалів швидкість передачі даних можна зробити не дуже високою, це створює передумови для ефективного подавлення міжсимвольної інтерференції.

Змінна смуга частот сигналу

Стандарт WiMax також допускає більш гнучкий у порівнянні з 802.11 розподіл смуги частот, що використовуються для передачі даних. При чому, це досягається як за рахунок зменшення кількості піднесучих, так і за допомогою їх звуження. Мінімальна ширина сигналу, передбачена стандартом, складає 1.25 МГц, а максимальна – 20 МГц. Звичайно, зі зменшенням частотного ресурсу швидкість передачі зменшується, але сама ця можливість дозволяє використовувати частотний спектр окремими фрагментами, а не повністю, як це було в 802.11.

В результаті того, що у IEEE 802.16 використовується 256 піднесучих, кожний підканал займає менший частотний простір. Це дозволяє підключати більшу кількість низькошвидкісних користувачів без втрати частини смуги.

Технологія OFDM знаходить застосування не тільки в протоколі 802.16. Наприклад, в протоколі 802.11g також використовується технологія OFDM, проте, порівняно з протоколом 802.11g, в протоколі 802.16 передбачений гнучкіший розподіл смуги частот, що використовуються для передачі даних. Причому, це можна зробити як за рахунок зменшення кількості несучих, так і за допомогою їх звуження. Мінімальна ширина сигналу, передбачена стандартом,

складає 1,25 МГц, а максимальна - 20 МГц. Природно, що із зменшенням частотного ресурсу швидкість передачі зменшується, але сама ця можливість дозволяє використовувати частотний спектр окремими фрагментами, а не повністю, як це реалізовано в протоколі 802.11g.

“Розумні” антени

Від Wi-Fi всі стандарти 802.16 успадкували технологію “розумних” антен (Smart Antennas). Тут здійснився її подальший розвиток. В результаті стандартизовано 4 типи адаптивних “розумних” антен:

- застосовуються декілька приймальних антен, розміщених на відстані не менше $1/2$ довжини хвилі, адаптивних “розумних” антен;
- застосовуються декілька антен (антенний пул) з оцінкою рівня сигналу, який приймається на кожній; антена з найбільш чітким і потужним сигналом підключається до приймача;
- застосовується система антен з оцінкою рівня шуму в ефірі; на основі цих даних за допомогою програмного керування частотою вибирається робочий “коридор” з найменшими завадами;
- застосовуються від 4 до 24 антен для поділу простору на сектори для багатократного використання частотного ресурсу.

Разом з OFDM, “розумні” антени забезпечують важливу здатність системи приймання сигналів в умовах непрямой видимості (NLOS – Non Line Of Sight).

Адаптивна модуляція

Як і в стандартах 3G (WCDMA/HSDPA), у WiMax використовується технологія адаптивної модуляції (Adaptive Modulation), яка заключається в автоматичному виборі виду модуляції залежно від поточного відношення сигнал/шум в каналі передачі.

Різні способи модуляції дозволяють отримати різні швидкості передачі при різних відношеннях сигнал/шум. Використання спектрально-ефективних

методів модуляції забезпечує більш високу швидкість передачі, але потребує більшої величини відношення сигнал/шум. Тому такий спосіб доцільно застосовувати для користувачів, які знаходяться поблизу базової станції. При віддаленні застосовують QPSK і BPSK, що дозволяє працювати при менших значеннях сигнал/шум. Схема модуляції автоматично переходить з одного виду модуляцій на іншу при зміні умов передачі (відношення сигнал/шум – SNR). Схематично області застосування різних способів модуляції в залежності від відстані показані на рис. 16.4.

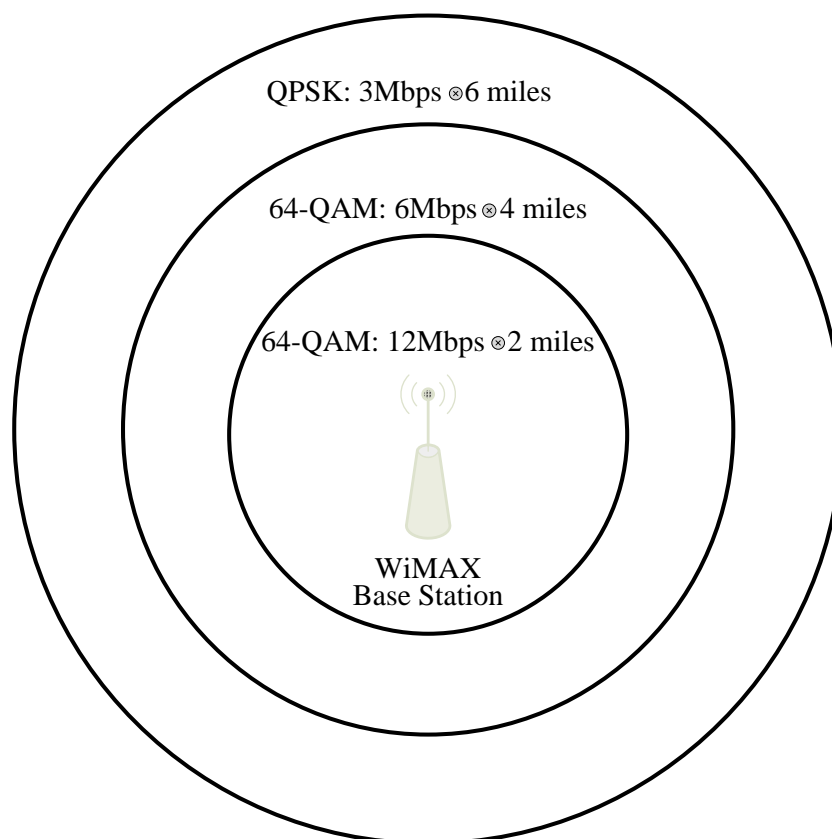


Рис.16.4. Принципи адаптивної модуляції

Фізичний рівень інтерфейсу WMAN-OFDM

При OFDM модуляції здійснюється частотний поділ робочого діапазону на частотні канали шириною BW (рис. 16.5), причому ширина смуги кратна значенням 1.25 МГц. Найбільше значення ширини смуги BW не перевищує 20 МГц.

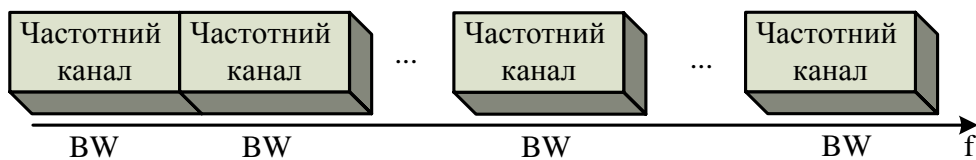


Рис.16.5 Частотний поділ робочого діапазону для WMAN-OFDM

При OFDM здійснюється розділення потоку даних на N підпотоків, кожен з яких здійснює модуляцію своєї піднесучої, виділеної в загальній смузі частот (рис. 16.6).

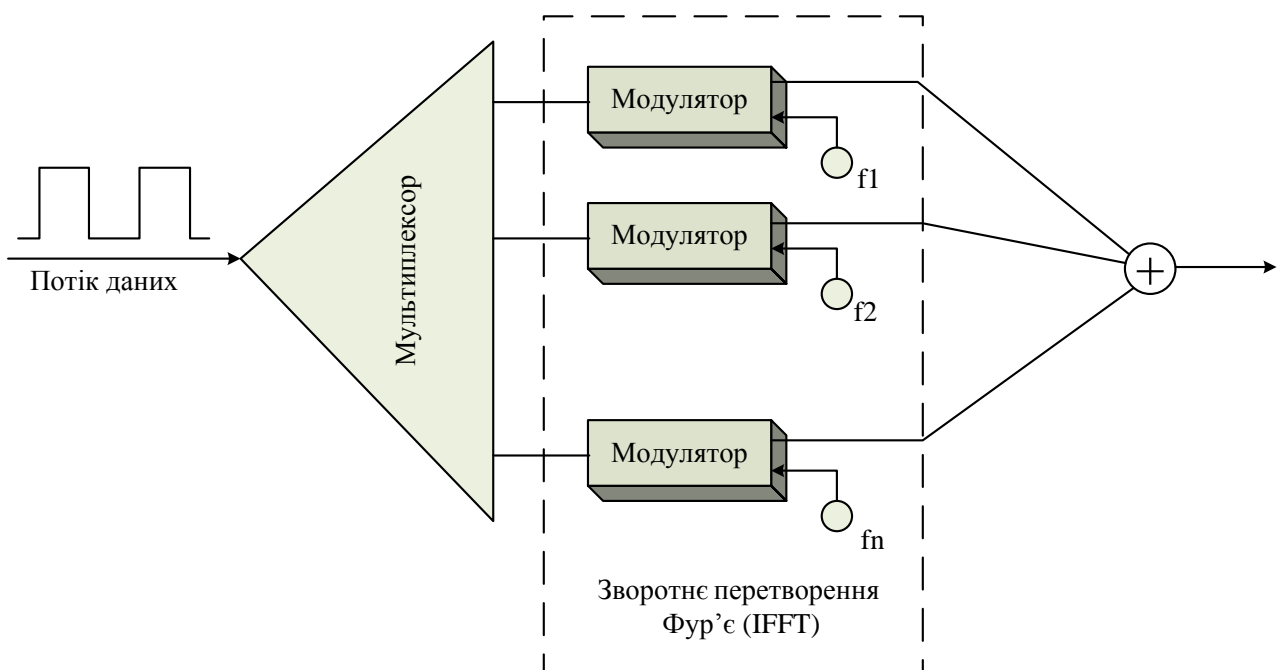


Рис.16.6 Реалізація методу OFDM

Для його реалізації в передавальних пристроях використовується зворотнє швидке перетворення Фур'є (IFFT), що переводить попередньо мультиплексований на n -каналів сигнал (рис. 16.6) з часового представлення в частотне.

При прийомі таких сигналів, щоб виділити вихідні повідомлення, крім демодуляції потрібно застосувати до них перетворення Фур'є, яке здійснюється за алгоритмом FFT (Fast Fourier Transform).

Кожен відлік IFFT представляє собою піднесучу. Група піднесучих частот, яка в даний момент переносить бітові потоки, називається символом OFDM.

В загальному випадку OFDM-сигнал містить піднесучі, які використовуються для передачі даних, пілот-сигнали (піднесучі для проведення вимірювань) та захисні інтервали (рис. 16.7).

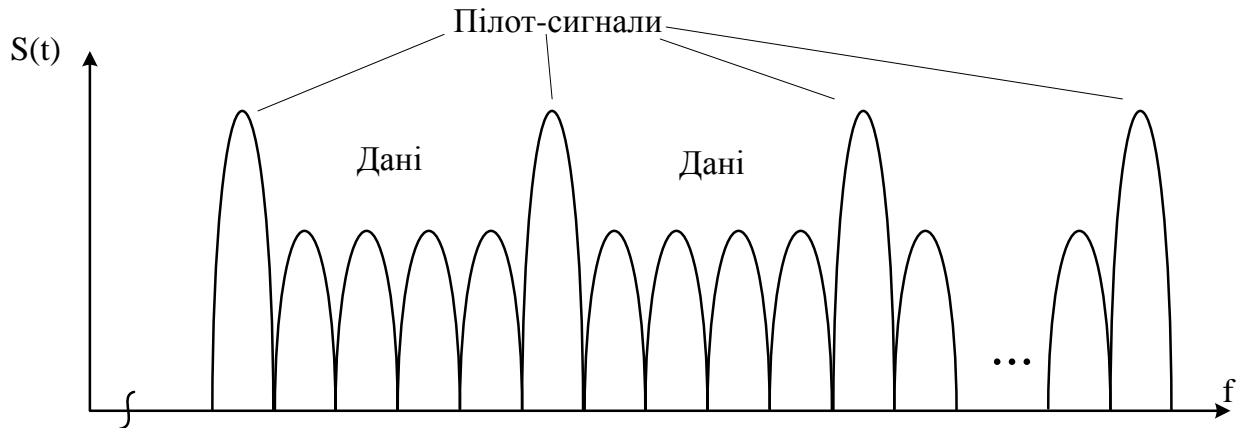


Рис.16.7 Структура OFDM-сигналу

При модуляції даних за допомогою ортогональних несучих в частотному каналі виділяються N піднесучих таким чином, що $f_k = f_c + k \cdot \Delta f$, k – ціле число з діапазону $[-N/2, N/2]$ (в даному випадку $k \neq 0$). Відстань між ортогональними несучими $\Delta f = 1/T_b$, де T_b – тривалість передачі даних.

Кожна піднесуча модулюється незалежно засобами квадратурної амплітудної модуляції. Загальний сигнал формується за допомогою зворотного швидкого перетворення Фур'є (IFFT):

$$S(t) = \operatorname{Re} \left\{ e^{i2\pi f_c t} \sum_{k=-N/2}^{N/2} C_k \cdot e^{i2\pi \Delta f (t-T_s)} \right\} \quad (0 < t < T_g), \quad (16.1)$$

де C_k – комплексне представлення символу квадратурної модуляції (QAM-символу). Комплексне представлення зручне, оскільки генерація радіосигналу здійснюється за допомогою квадратурного модулятора у відповідності до виразу:

$$S_k(t) = I_k(t) \cos(2\pi f_c t) - Q_k(t) \sin(2\pi f_c t), \quad (16.2)$$

де I_k і Q_k – синфазне і квадратурне (дійсне і уявне) значення комплексного символу відповідно.

Для роботи алгоритмів перетворення Фурє (FFT) та IFFT зручно, щоб число точок відповідало 2^m . Тому число несучих вибирають рівним мінімальному числу $N_{FFT} = 2^m$, що перевищує N . В режимі OFDM стандарту 802.16 $N = 200$, відповідно $N_{FFT} = 256$. З них 55 ($k = -128 \dots -101$ і $k = 101 \dots 127$) утворюють захисний інтервал на границях частотного діапазону. Центральна частота каналу ($k = 0$) і частоти захисних інтервалів не використовуються (амплітуди відповідних їм сигналів рівні нулю). Решта 200 несучих – інформаційні (рис. 16.8).

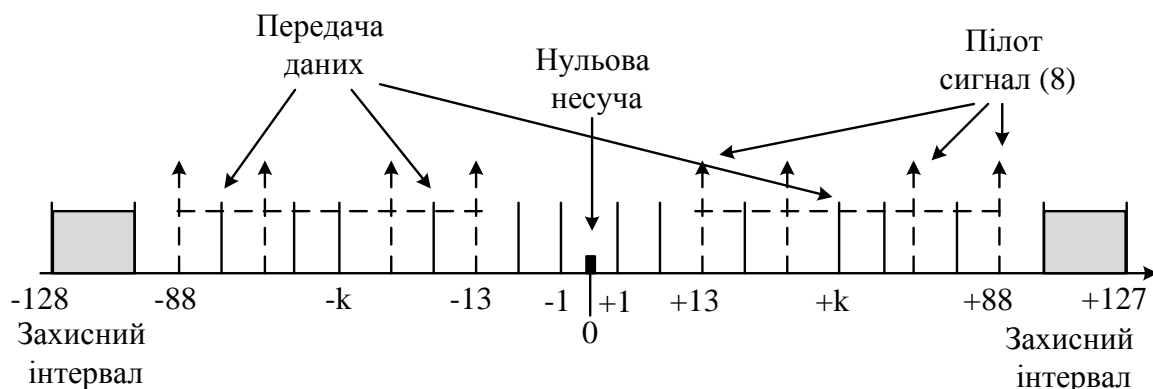


Рис.16.8 Розподіл несучих на фізичному рівні інтерфейсу WMAN-OFDM

Для точного визначення параметрів каналу необхідні так звані пілотні несучі частоти: метод модуляції та сам сигнал який добре відомий всім станціям в мережі. В методі OFDM передбачено використання 8-ми пілотних частот (з індексами $\pm 88, \pm 63, \pm 38, \pm 13$). Решта 192 несучі розбиті на 16 підканалів по 12 піднесучих в кожному (рис. 16.9), причому в одному підканалі частоти розміщені не підряд. Наприклад, підканал 1 утворюють несучі з індексами -100, -99, -98, -37, -35, 1, 2, 3, 64, 65, 66.

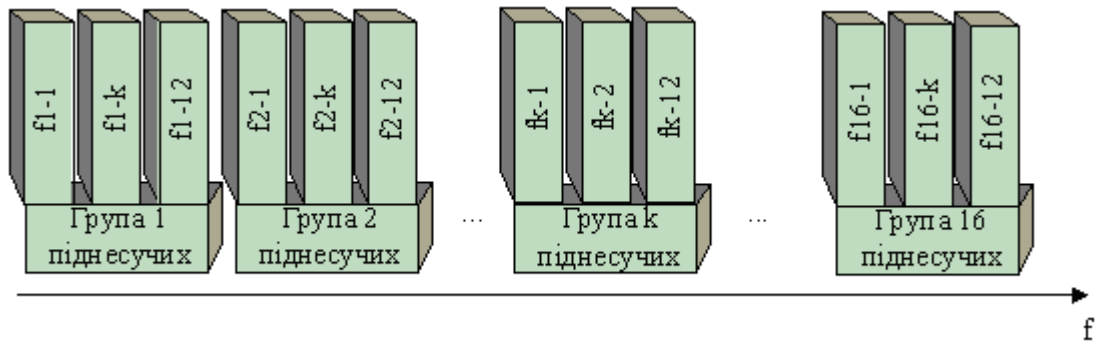


Рис.16.9 Утворення 16 підканалів в методі OFDM

Ділення на підканали необхідне, оскільки в режимі Wireless-OFDM передбачена (додаткова) можливість роботи не на всіх 16, а в одному, (наприклад група 2 піднесучих) двох, чотирьох і восьми підканалах - деякий прообраз схеми множинного доступу OFDMA.

Тривалість OFDM символу

Крім даних в OFDM-символі передається захисний інтервал тривалістю T_g так, що загальна тривалість OFDM-символу складає $T_s = T_b + T_g$. Захисний інтервал представляє собою копію кінцевого фрагменту символу. Його тривалість T_g може складати 1/4, 1/8, 1/16 і 1/32 від T_b .

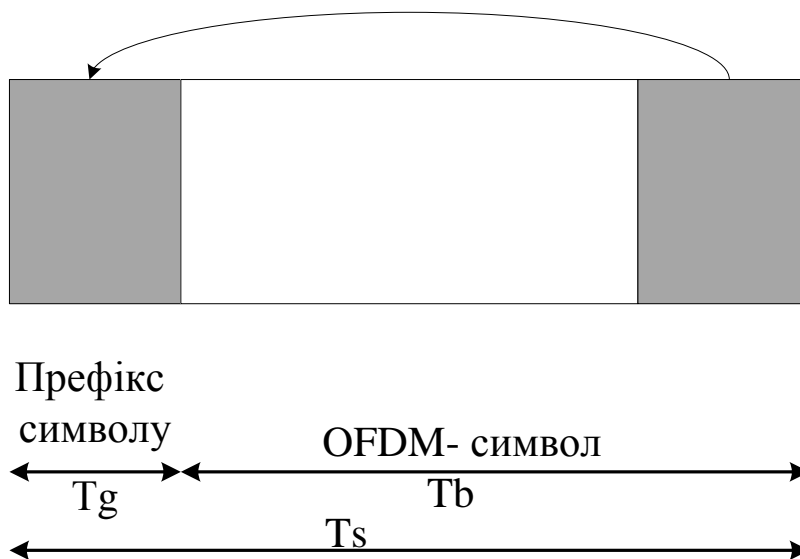


Рис.16.10 Тривалість OFDM-символу

Тривалість OFDM-символу - важливий параметр систем, який визначається тривалістю перетворення Фур'є та захисного інтервалу. Тривалість захисного інтервалу вибирається виходячи з розкиду затримки багатопроменевого поширення. Тривалість перетворення Фур'є вибирається з показників, які суперечать один одному:

- з однієї сторони вимагається якомога менше значення тривалості перетворення для підвищення ефективності використання частот;
- з другої сторони зменшення тривалості приводить до зменшення чутливості, фазового шуму та погіршення інших показників.

Тому, тривалість перетворення Фур'є становить від десятків до сотень мікросекунд, а відповідна смуга на одну піднесучу – від одного до декількох десятків кілогерц.

Тривалість корисної частини T_b OFDM-символу залежить від ширини смуги каналу BW і системної тактової частоти (частоти дискретизації) F_s . $F_s = N_{FFT} / T_b$. Відношення $F_s / BW = n$ нормується і в залежності від ширини смуги каналу приймає значення 86/75 (BW кратне 1.5 МГц), 144/125 (BW кратне 1.25 МГц) і 8/7 (BW кратне 1.75 МГц і у всіх інших випадках). Тривалість кадру може бути 2.5; 4; 5; 8; 10; 12.

Канальне кодування

Канальне кодування на фізичному рівні передбачає три етапи:

- рандомізація;
- завадостійке кодування;
- перемежування.

Рандомізація – це перемноження блоку даних з псевдовипадковою послідовністю, яку формує генератор із поліномом виду $1+x^{14}+x^{15}$ (коди з

високою автокореляційною характеристикою, або псевдовипадкова перестройка частоти), внаслідок чого сигнал володіє великою завадостійкістю.

В потоці “вниз” генератор ПВП ініціалізується з початком кадру за допомогою кодового слова $4A80_{16}$. Починаючи з другого пакета кадру генератор ПВП ініціалізується на основі ідентифікаційного номера базової станції BSID, ідентифікатора профілю пакету і номеру кадру (рис. 16.11).

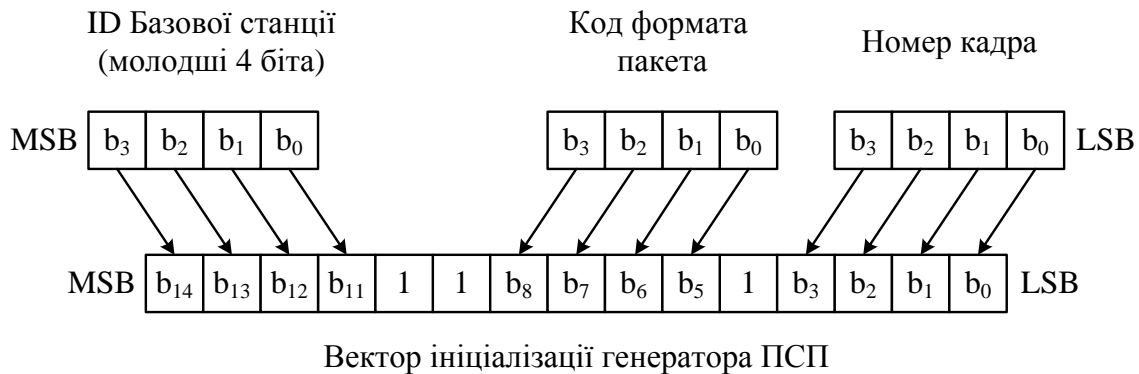


Рис.16.11 Вектор ініціалізації генератора ПВП

В потоці “вверх” все проходить аналогічно з тією різницею, що ініціалізація генератора ПВП здійснюється з першого пакету (замість DIUC використовується UIUC).

Кодування даних передбачає кодування каскадним кодом: зовнішнім кодом Ріда-Соломона і внутрішнім згортковим кодом. Алгоритм кодування Ріда-Соломона оперує блоками вихідних даних по 255 байт (239 байт даних та 16 перевірочних байт). Такий код здатний виправити до 8 пошкоджених байт і виявити до 15 неправильних байт. Оскільки реально передаються блоки даних меншої довжини k , перед ними добавляються $239-k$ нульових байт (скорочення лінійного коду). Після кодування ці біти видаляються. Якщо необхідно скоротити число перевірочних слів, щоб зменшити число відновлених T байтів, використовуються тільки $2T$ перших перевірочних байтів.

Таблиця 16.2 Модуляція, типи кодування для WMAN-OFDM

Модуляція	Блок даних	Кодер Ріда-	Швидкість	Сумарна	Блок даних
-----------	------------	-------------	-----------	---------	------------

	до кодування, байт	Соломона	кодування згорткового кодера	швидкість кодування	після кодування, байт
BPSK	12	(12,12,0)	1/2	1/2	24
QPSK	24	(32,24,4)	2/3	1/2	48
QPSK	36	(40,36,2)	5/6	3/4	48
16-QAM	48	(64,48,8)	2/3	1/2	96
16-QAM	72	(80,72,4)	5/6	3/4	96
64-QAM	96	(108,96,6)	3/4	2/3	144
64-QAM	108	(120,108,6)	5/6	3/4	144

Після кодера Ріда-Соломона дані поступають на згортковий кодер з породжуючими послідовностями (генераторами коду) $G_1 = 171_8$ для виходу X , і $G_2 = 133_8$ для Y . Це так званий код NASA. Його базова швидкість кодування – $1/2$, тобто з кожного вхідного біта виходить пара кодованих бітів X та Y . Кодове обмеження цього коду $K = 7$. Пропускаючи із послідовності пар елементи X_1 і Y_1 , можна отримати різні швидкості кодування. Таким способом швидкість $2/3$ відповідає послідовності $(X_1 Y_1 Y_2)$, швидкість $3/4$ – $(X_1 Y_1 Y_2 X_3)$, $5/6$ – $(X_1 Y_1 Y_2 X_3 Y_4 X_5)$.

Кодер Ріда-Соломона не використовується при двопозиційній модуляції BPSK. Він також пропускається, коли використовується частина субканалів OFDM. В такому випадку швидкість згорткового кодування приймається рівною загальній швидкості кодування.

Крім описаного механізму кодування стандарт передбачає додаткове застосування блокових турбокодів (з використанням кодів Хемінга) і згорткових турбокодів.

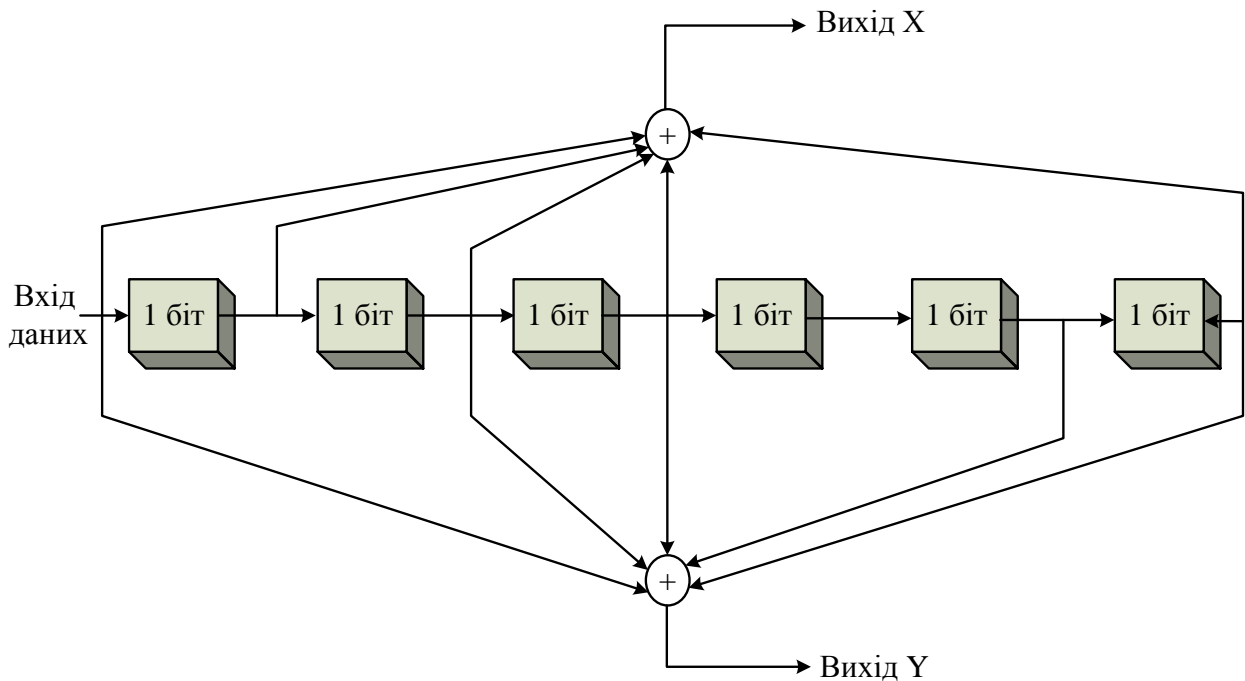


Рис.16.12 Схема згорткового кодера

Після кодування виконується перемешування (інтерлівінг) – це перемішування бітів в межах блоку кодованих даних, що відповідає OFDM-символу. Ця операція проходить в два етапи. Мета першого етапу – зробити так, щоб суміжні біти були рознесені на несуміжні несучі. На другому етапі суміжні біти разносяться в різні половини послідовності. Все це робиться для того, щоб при групових (пакетних) помилках в символі спотворювалися не суміжні біти, які легко відновити при декодуванні.

Перемешування реалізується у відповідності до формул:

$$\begin{aligned}
 m_k &= (N_{cbps} / 12) \cdot k_{\text{mod}12} + \text{floor}(k / 12) \\
 j_k &= s \cdot \text{floor}(m_k / s) + (m_k + N_{cbps} - \text{floor}(12m_k / N_{cbps}))_{\text{mod}_s}, \\
 k &= 0 \dots N_{cbps} - 1
 \end{aligned}
 \tag{16.3}$$

де m_k і j_k – номери вихідного k -ого біта після першої і другої стадії переплітання відповідно; N_{cbps} – число кодованих бітів в OFDM-символі (при заданому числі субканалів); s – $\frac{1}{2}$ числа бітів на несучу (1/2/4/6 бітів для BPSK/QPSK/16-QAM/64-QAM відповідно, для BPSK $s = 1$). Функція $\text{floor}(x)$ –

це найбільше ціле число, що не перевищує x . Функція $x_{\text{mod } r}$ – залишок від x/r .

Пілотні несучі модулюються за допомогою BPSK. Значення на цих піднесучих визначаються на основі ПВП ω_k із задаючим поліномом $x^{11}+x^9+1$, при чому в низхідному субкадрі k – номер символу відносно початку пакету. Ініціалізуючі слова ПВП для низхідного і висхідного потоків різні ($8FF_{16}$ і 555_{16} відповідно). Значення BPSK-символів визначаються як $c_{-88} = c_{-38} = c_{63} = c_{88} = 1 - 2\omega_k$; $c_{-63} = c_{-13} = c_{13} = c_{38} = 1 - 2\overline{\omega_k}$ в низхідному каналі і $c_{-88} = c_{-38} = c_{13} = c_{38} = c_{63} = c_{88} = 1 - 2\omega_k$; $c_{-63} = c_{-13} = 1 - 2\overline{\omega_k}$ у висхідному. В результаті отримується так звана ступенева конструкція OFDM.

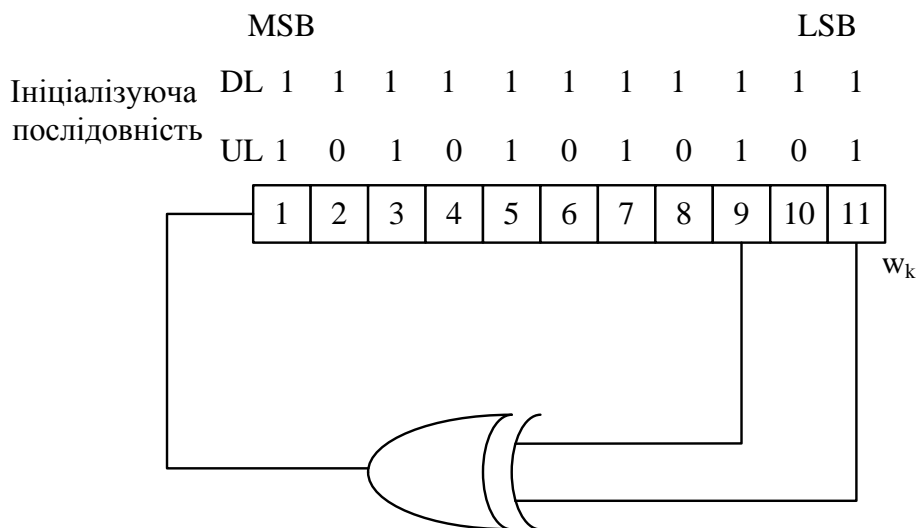


Рис.16.13 Генерація модулюючої послідовності для пілотних несучих

Після визначення символів модуляції за допомогою ЗШПФ (IFFT) визначається сам радіосигнал і передається в передавач. При прийомі всі процедури проходять в зворотному порядку.

Структура кадрів

В стандарті IEEE 802.16-2004 дуплексний режим може бути утворений в часовій (TDD), або частотній областях (FDD). В обох випадках передача здійснюється за допомогою кадрів. Кожний кадр ділиться на два підкадри: підкадр напряму “вверх” (UL), підкадр напряму “вниз” (DL). В режимі TDD

передача кадрів відбувається на однакових частотах, а в режимі FDD передача відбувається одночасно, але на різних частотах. Обмін даними між базовою та абонентською станціями відбувається за допомогою передачі кадрів, структура яких для мережі типу “точка-багатоточка” зображена на рис. 16.14 та рис. 16.15.

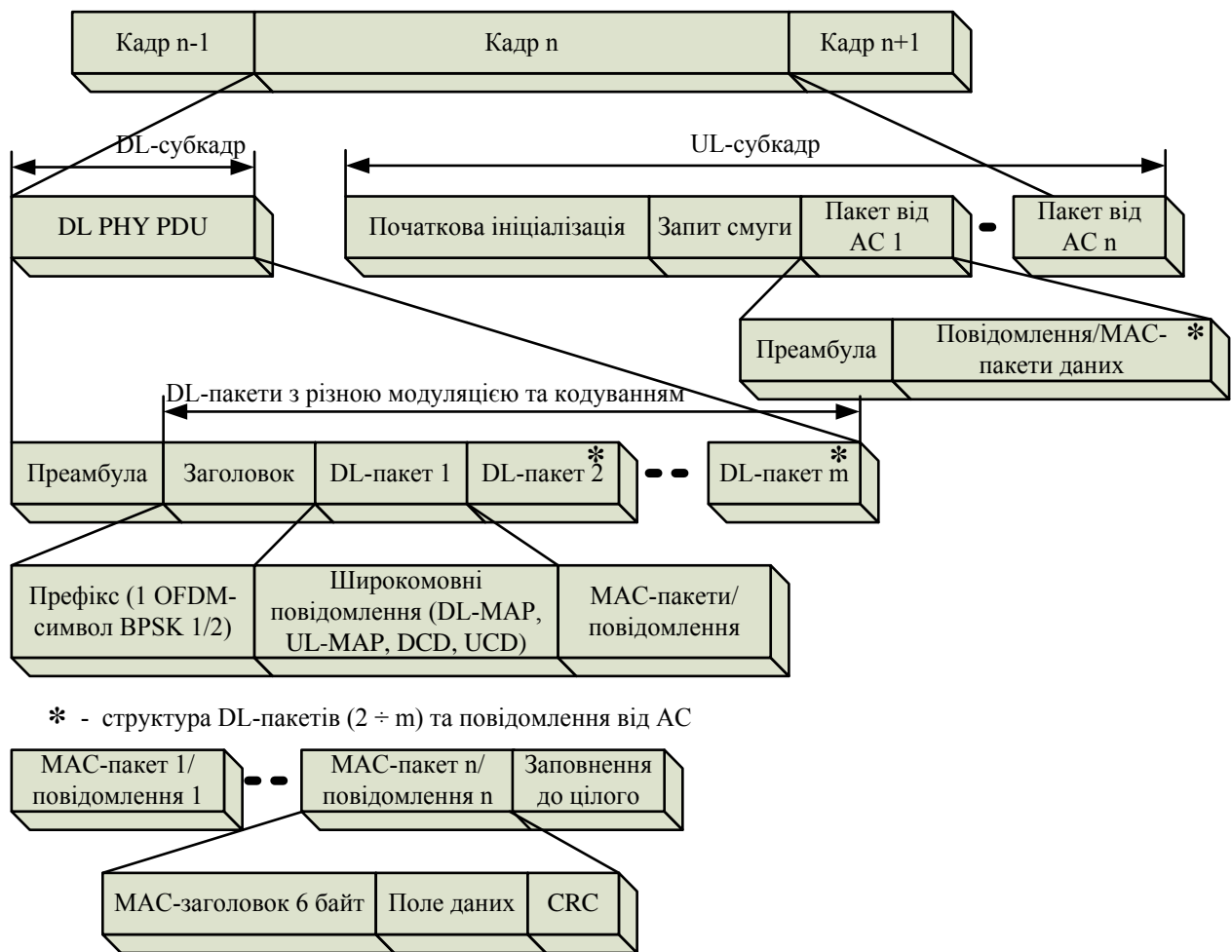
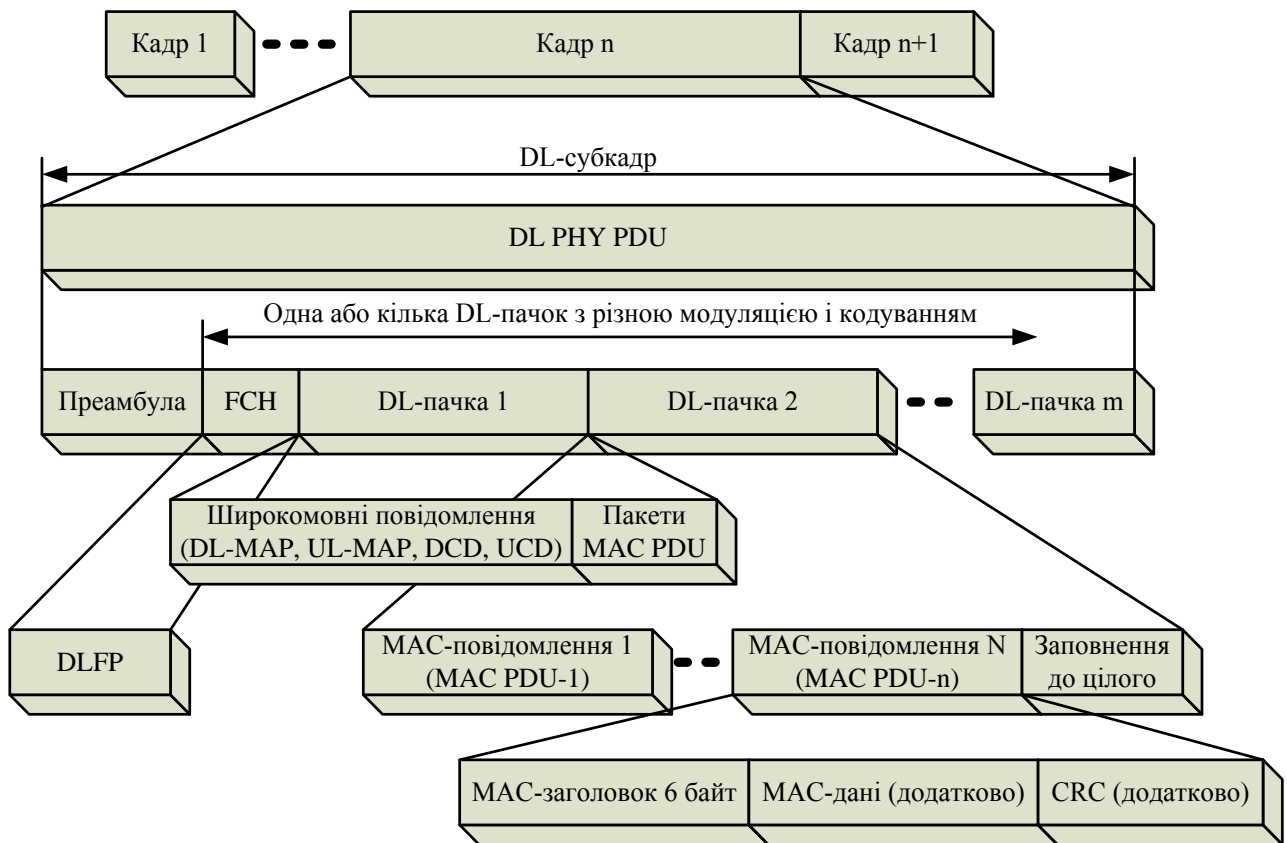
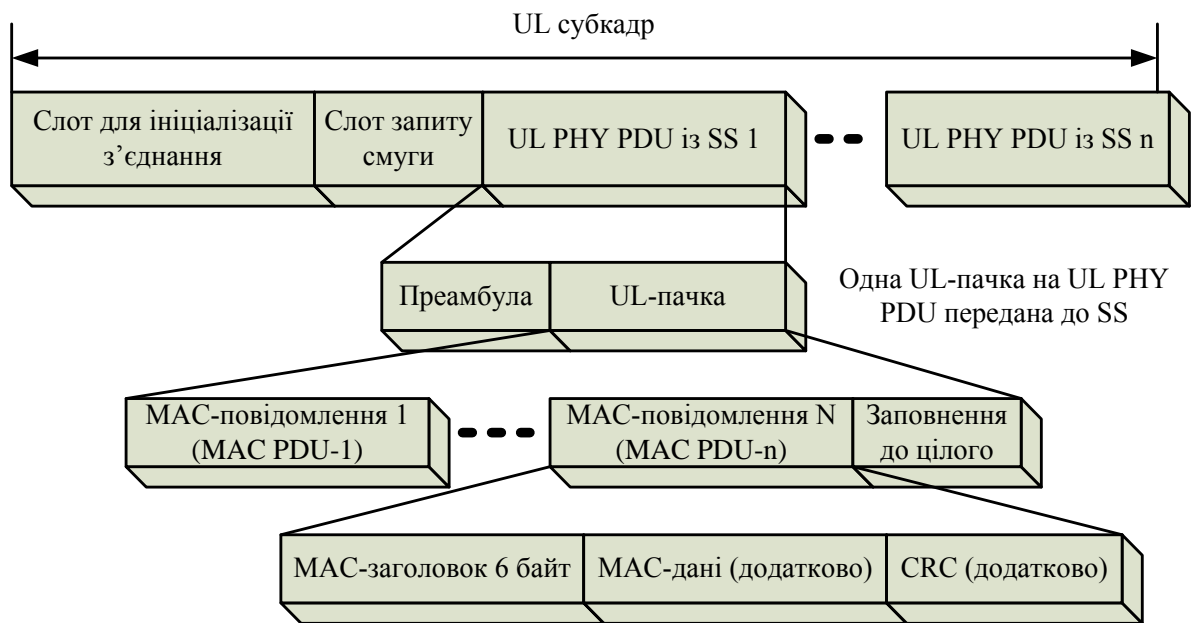


Рис.16.14 Структура фреймів OFDM TDD



а)



б)

Рис.16.15 Структура DL субкадрів (а) та UL субкадрів (б) фреймів OFDM FDD

16.2. Режим WirelessMAN-OFDMA

Особливості режиму

Ортогональне частотне розділення каналів з мультиплексуванням типу WirelessMAN-OFDMA є масштабованим частотним розділенням каналів, тобто кількість несучих в даному випадку не фіксоване і може складати 512, 1024 і 2048. Залежно від кількості несучих міняється і ширина каналу, і кількість підканалів (табл. 16.3).

Таблиця 16.3 Параметри радіоінтерфейсу в режимі WirelessMAN-OFDMA

Ширина каналу	5 МГц	10 МГц	20 МГц
Кількість піднесучих	512	1024	2048
Кількість підканалів	32	64	128
Ширина підканалу	156 КГц		
Тривалість символу	101 мкс		
Відстань між піднесучими	11.2 КГц		

В результаті цього досягається необхідна завадостійкість протоколу.

Таблиця 16.4 Можливі режими передачі

Модуляція	Швидкість згорткового кодування	Кількість інформаційних біт на символ	Кількість інформаційних біт в OFDM-символі
BPSK	1/2	0.5	88
QPSK	1/2	1	184
QPSK	3/4	1.5	280
16QAM	1/2	2	376
16QAM	3/4	3	568
64QAM	2/3	4	760
64QAM	3/4	4.5	856

Також при застосуванні режиму WirelessMAN-OFDMA отримуємо велику різноманітність можливих швидкостей передачі (табл. 16.5).

Таблиця 16.5 Залежність швидкості передачі від ширини каналу зв'язку і типу модуляції

Модуляція	QPSK	QPSK	16QAM	16QAM	64QAM	64QAM
Швидкість згорткового кодування	1/2	3/4	1/2	3/4	2/3	3/4
1.75 МГц	1.04	2.18	2.91	4.36	5.94	6.55
3.5 МГц	2.08	4.37	5.82	8.73	11.88	13.09
7 МГц	4.15	8.73	11.64	17.45	23.75	26.18
10 МГц	8.31	12.47	16.63	24.94	33.25	37.4
20 МГц	16.62	24.94	33.25	49.87	66.49	74.81

Структура сигналу в режимі WirelessMAN-OFDMA

З точки зору формування модулюючих символів режим OFDMA аналогічний режиму OFDM. Різниця проявляється в принципі розділення каналів. Один логічний OFDMA-канал створюється фіксованим набором частот, як правило розподілених по всьому діапазону частот фізичного каналу. Наприклад, при перетворенні Фур'є на 2048 точок утворюється 53 групи піднесучих, причому кожна група містить по 32 піднесучі. Кожна АС випромінює 53 піднесучі (по одній з кожної групи під несучих).

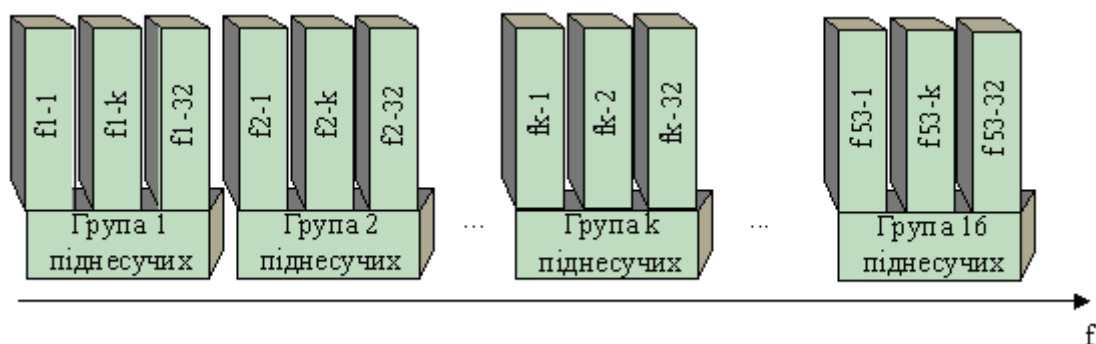


Рис.16.16 Утворення 53 підканалів в методі OFDMA

В спрощеному вигляді цей механізм використовується як додатковий в режимі OFDM. Досить згадати, що режим WirelessMAN-OFDM серед 192 несучих частот може використовувати 16 груп несучих по 12 несучих, причому в одному підканалі частоти можуть бути розташовані не підряд. Отже режим WirelessMAN-OFDM можна розглядати як частковий випадок режиму WirelessMAN-OFDMA. Подібно, але більш гнучко, здійснюється формування каналів в режимі WirelessMAN-OFDMA

З двох OFDM-рівнів :

- WirelessMAN-OFDM
- WirelessMAN-OFDMA

Перший дещо простіший для реалізації з технічної точки зору і тому користується більшою підтримкою з боку виробників устаткування.

Метод формування, структура OFDM-символів і механізм каналного кодування в OFDMA схожі з описаними для OFDM. Канальне кодування включає рандомізацію, завадостійке кодування, перемішування і модуляцію. Метод рандомізації також практично ідентичний OFDM (різні способи формування ініціалізуючого вектора генератора ПВП).

Завадостійке кодування, в OFDMA, в якості обов'язкового передбачає тільки згортковий кодер – такий же, як в OFDM і з тим же набором швидкостей кодування. Кодера Ріда-Соломона немає. Додатково передбачено застосування блочних і згорткових турбокодів. Метод перемішування також ідентичний з OFDM, слід лише у відповідних формулах замінити 12 (для OFDM) на 16.

Схеми модуляції несучих повністю співпадають з OFDM, з тією різницею, що передбачений набір включає тільки QPSK і 16-QAM зі швидкостями кодування 1/2 і 3/4, а також додатково 64-QAM зі швидкостями кодування 1/2, 2/3, і 3/4. Однак в OFDMA після формування символів квадратурної модуляції і усереднення їх амплітуд (нормування на параметр c) послідовність символів на кожній піднесучій помножується на бінарну ПВП ω_k , схема генератора якої ідентична з OFDM. Кожна k -а несуча множиться на значення $1 - 2\omega_k$ (тобто,

якщо $\omega_k = 0$, то $1 - 2\omega_k = 1$ і символ не міняється; якщо $\omega_k = 1$, то символ множиться на -1). Символи пілотних несучих модулюються методом BPSK, їх значення обчислюються як $c_k = 1 - 2\omega_k$. Однак оскільки потужність сигналів пілотних несучих в низхідному каналі (за необхідності – у висхідному) повинна бути на 2,5 дБ вище середньої потужності інформаційних несучих, значення c_k додатково множиться на $4/3$.

Структура кадрів, методи розподілення несучих

Структура кадрів (рис. 8.17) в OFDMA схожа з всіма розглянутими режимами тим, що зберігається розділення на висхідний та низхідний субкадри, як часове, так і частотне. Тривалість кадру може складати 2; 2,5; 4; 5; 8; 10; 12,5 та 20 мс. Кадр – це послідовність OFDMA-символів. Кожен OFDMA - символ включає набір субканалів. Пакети даних можуть передаватися одночасно, на різних OFDMA-підканалах.

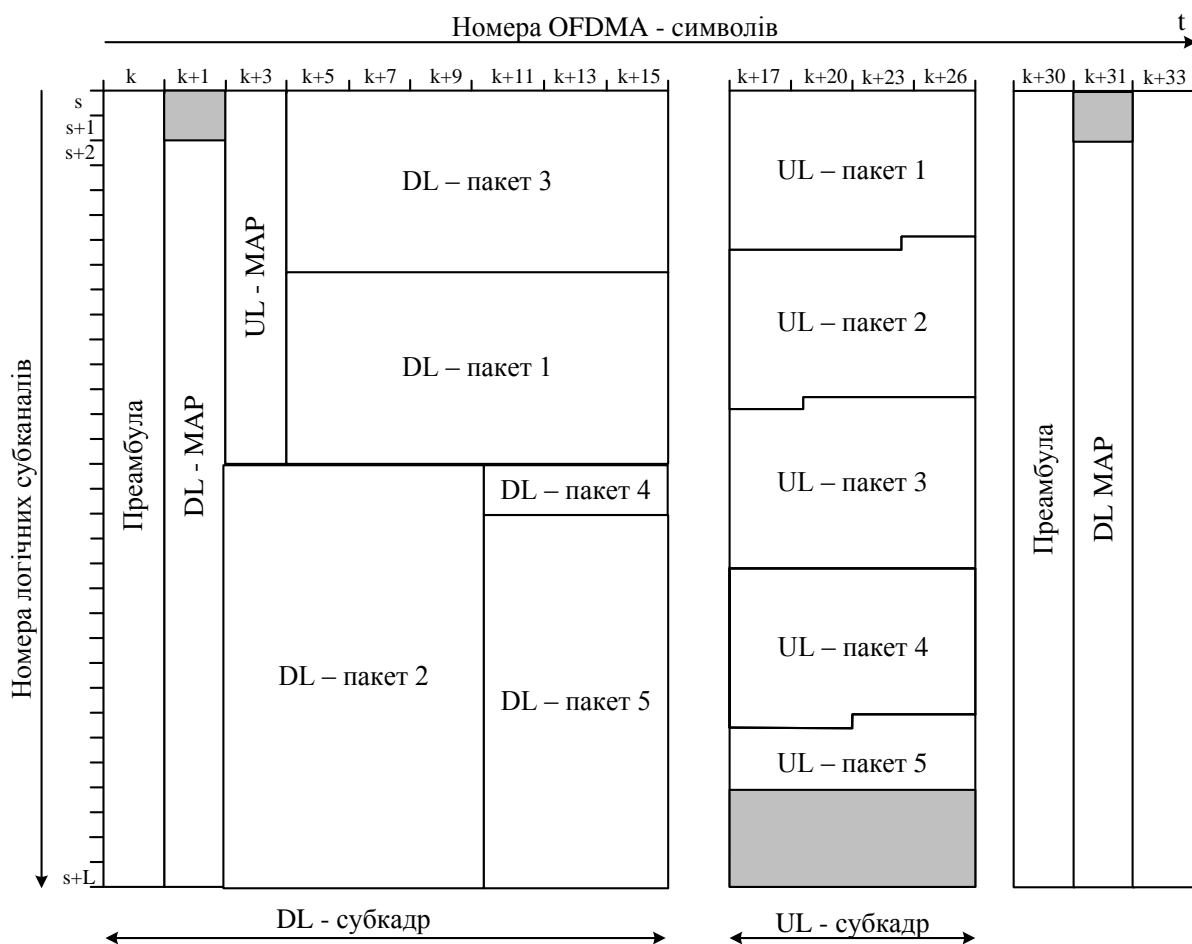


Рис.16.17 Структура OFDMA-кадрів

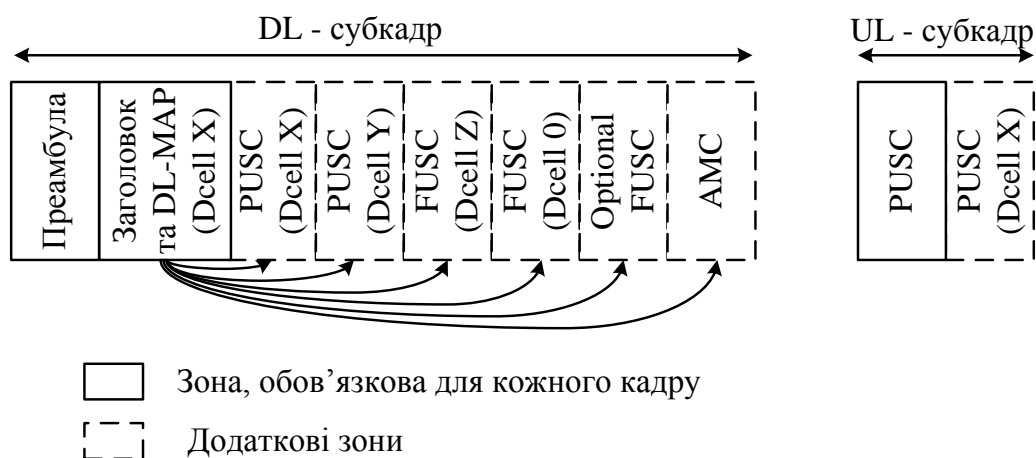
Для опису структури кадру в OFDMA використовується поняття слота – мінімального ресурсу для передачі даних. Слот займає один підканал та від одного до трьох послідовних OFDMA-символів. В низхідному субкадрі тривалість слота – один символ в режимі FUSC, два – в режимі PUSC; у висхідному субкадрі тривалість слота завжди рівна трьом OFDMA-символам.

Підканал – це набір несучих частот (як і в OFDM). Розподіл несучих по підканалах залежить від напрямку передачі і методу розподілення несучих. Стандарт IEEE 802.16 описує кілька способів розподілу несучих, як в низхідному каналі, так і у висхідному. Принципово вони поділяються на FUSC (Full Usage of the Subchannels) – повне використання підканалів передавачем БС і PUSC (Partial Usage of Subchannels) – використання груп підканалів (сегментів), тобто не всього доступного діапазону. Які саме підканали використовуються в режимі PUSC, однозначно визначають номери сегментів.

В методах PUSC та FUSC одному субканалу присвоюються несучі, рівномірно розподілені по всьому доступному фізичному каналу. Використовується інший підхід – використання в підканалах набору послідовних сусідніх частот. Він реалізований в методі AMC (Advanced modulation and coding), призначеному для роботи з адаптивними антенними системами.

В методі AMC використовується також 2048 несучих. З них 160 нижніх і 159 верхніх утворюють захисні інтервали, центральна частота не використовується. Всі інші несучі послідовно розбиваються на 192 групи (група називається bin) по 9 несучих в кожній. Центральна (п'ята) частота в кожній групі – пілотна. Чотири сусідні (по частоті) групи складають смугу (band). Шість груп в одній смузі утворюють AMC-підканал. Поняття підканалу в даному випадку частотно-часове, тобто підканал – це кілька (наприклад, два) OFDMA-символів і три несучі. Структура AMC-підканалів у висхідному та низхідному субкадрах однакова.

Відзначимо, що в межах одного субкадра можливе використання різних механізмів розподілу несучих по підканалах – FUSC, PUSC, AMC і т.д. Границі відповідних зон (названих в стандарті зонами перестановки – permutation zone) визначені в картах субкадрів (рис.16.18).



16.18 Суміщення різних зон перестановки в OFDM-кадрі

16.3. Адаптивні антенні системи

Найважливіша особливість стандарту IEEE 802.16, що принципово відрізняє його від стандартів IEEE 802 a/ b/ g, – це наявність вбудованих засобів підтримки адаптивних антенних систем AAS. Застосування AAS – не обов’язкова вимога стандарту. AAS – це системи з секторними напрямленими антенами, тобто системи з кількома антенними елементами. Застосування AAS значно збільшує потенційну ємність мережі стандарту IEEE 802.16, оскільки в різних секторах БС можна працювати в одних і тих же каналах (частотних і OFDMA). Крім цього, напрямлені антени дозволяють суттєво зменшити загальну випромінювану потужність, в результаті чого зменшуються міжканальна інтерференція. Не менш важливим є застосування багатоелементних антенних систем для покращення проходження сигналів в каналах з завмиранням, так методів просторово-часового кодування (рознесення) STC.

Підтримка AAS в специфікації IEEE 802.16 означає модифікацію протоколів на фізичному і MAC-рівнях, наявність спеціальних управляючих і контролюючих повідомлень для роботи з адаптивними антенами.

Стандарт допускає в рамках одного кадру транслювати не напрямлений та напрямлений трафік (за допомогою AAS). Для розмежування зон не-AAS і AAS-трафіку використовуються спеціальні повідомлення. Принцип роботи з AAS в режимах OFDM і OFDMA, як і в SCa, досить подібні. В режимі AAS можливі два механізми призначення каналних ресурсів: сканування карт (Diversity-Map Scan) і пряма сигналізація (Direct Signaling).

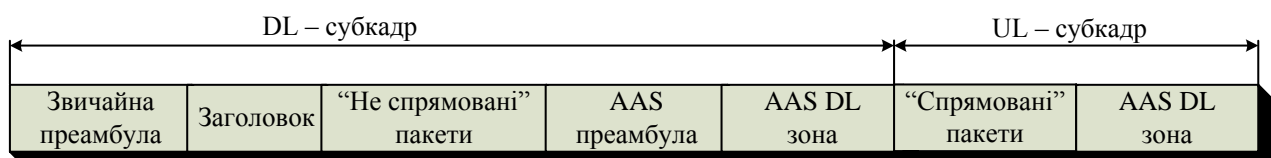


Рис.16.19 Структура кадрів з зоною AAS

В режимі OFDMA передбачено два методи роботи з AAS – з

розподіленими несучими (FUSC, PUSC) та із сусідніми несучими (AMC). Кожний з методів на початку AAS-зони передбачає передачу OFDMA-символу преамбули AAS-зони і заголовку з префіксом AAS-зони. Для передачі цих повідомлень в AAS-зоні низхідного субкадру виділені спеціальні підканали (два старших для FUSC/PUSC, четвертий з початку і четвертий з кінця підканали в AMC). Повідомлення в цих підканалах можуть повторюватися кілька разів, тому якщо використовується не ширококомвна трансляція а передача з перемиканням променів, повідомлення з префіксом дійшли би до всіх АС. В префіксі вказується код променя антени, тип і розмір преамбули AAS-зони, область для початкової ініціалізації/запитів смуги, а також області в кадрі для кожного AAS-з'єднання. Основне призначення префікса – повідомити АС про те, що будуть передані карти UL/DL – каналів для розділення за напрямленими променями груп користувачів (очевидно, що розподіл каналних ресурсів може здійснюватися незалежно в кожному промені).

Для роботи в режимі AMC-AAS кадри можуть об'єднуватися в суперкадр тривалістю неменше 20 звичайних кадрів. В суперкадр входить, як мінімум, один ширококомвний кадр, який вміщує дескриптори і карти DL/UL – каналів. Сенс такого об'єднання – забезпечити мінімум управляючих повідомлень для групи кадрів.

Метод Direct Signaling

Метод прямої сигналізації (Direct Signaling Method) використовує механізм послідовного розподілу несучих AMC. Пряма сигналізація потребує точної просторової селекції каналів, але дозволяє збільшити ємність системи зв'язку.

Особливість методу – в кожному кадрі в AAS-зоні виділяється від одного до чотирьох каналів доступу/розподілу ресурсів BWAA (Bandwidth Allocation/Access). Кожний BWAA-канал складається з двох субканалів, що розміщені у верхній і нижній частинах діапазону симетрично відносно центральної частоти. В цьому каналі передаються префікс низхідного субкадру, карти UL-MAP і DL-MAP для кожного із просторово розділених АС, або груп

АС. Завдяки точному просторовому налаштуванню AAS даний метод дозволяє в одному кадрі передати повідомлення багатьом користувачам.

В методі прямої сигналізації є чотири спеціальні кодові повідомлення – налаштування (навчання) зворотного з'єднання RLT (Reverse Link Training), доступ в зворотному з'єднанні RLA (Reverse Link Initiation) та ініціювання прямого з'єднання FLI (Forward Link Training). Перші два повідомлення використовує АС, інші – БС. Для початкової ініціалізації, або запиту смуги пропускання АС посилає повідомлення RLA в каналі BWAA. Воно передує повідомленням запиту смуги, або початкового доступу і використовується БС для точного налаштування своєї антенної системи на дану АС. У відповідь БС передає повідомлення FLI – унікальний код для кожної АС. FLI транслюється в підканалі, виділеному для даної АС. Кожна абонентська станція сканує всі підканали і виявивши по кодовій послідовності адресоване їй повідомлення початкової ініціалізації, відправляє у відповідь в тому ж каналі послідовність RLT, призначену для точного налаштування антен БС на АС в даному підканалі. В результаті, виконавши всі необхідні підстройки, БС і АС встановлюють з'єднання, на протязі якого здійснюється обмін даними. Причому пакетам даних передують настроювальні послідовності FLT зі сторони БС і RLT зі сторони АС.

Просторово-часове кодування

Ще одна важлива особливість застосування багатоелементних антенних систем – це можливість використовувати просторово-часове рознесення передаючих каналів STC (Space-Time Coding) для покращення проходження радіосигналів. Ідея методу полягає у рознесенні в просторі і часі джерела одного і того ж сигналу, тобто дещо змінити умови його проходження. Ймовірність безпомилкового прийому такого сигналу значно зростає.

В стандарті IEEE 802.16 використовується схема просторово-часового рознесення, запропонована Аламоуті. Суть методу проста – вихідний потік символів розбивається на два і формуються паралельно. В передавачі

використовуються два антенні канали, що діють паралельно і використовують спільний тактовий генератор. Таким чином реалізується так звана схема каналу MISO (Multiple Input - Single Output) – декілька входів і один вихід.

Спочатку антена 0 транслює символ S_0 , антена 1 – символ S_1 . В наступний символний інтервал антена 0 передає символ S_1^* , антена 1 – S_0^* (* – комплексне спряження). Приймач працює з одною антеною і в кожному символному інтервалі приймає сигнали r_0 і r_1 . Знаючи передавальні характеристики каналів (h_0 і h_1), в приймачі можливо відновити передані сигнали S_0 і S_1 .

$$S_0 = h_0^* r_0 + h_1 r_1^* \quad S_1 = h_1^* r_0 + h_0 r_1^* \quad (16.4)$$

З точки зору протоколів фізичного застосування STC не потребує особливих засобів. Зона, в яку транслюються дані за допомогою STC, відмічається в DL-MAP кожного кадру.

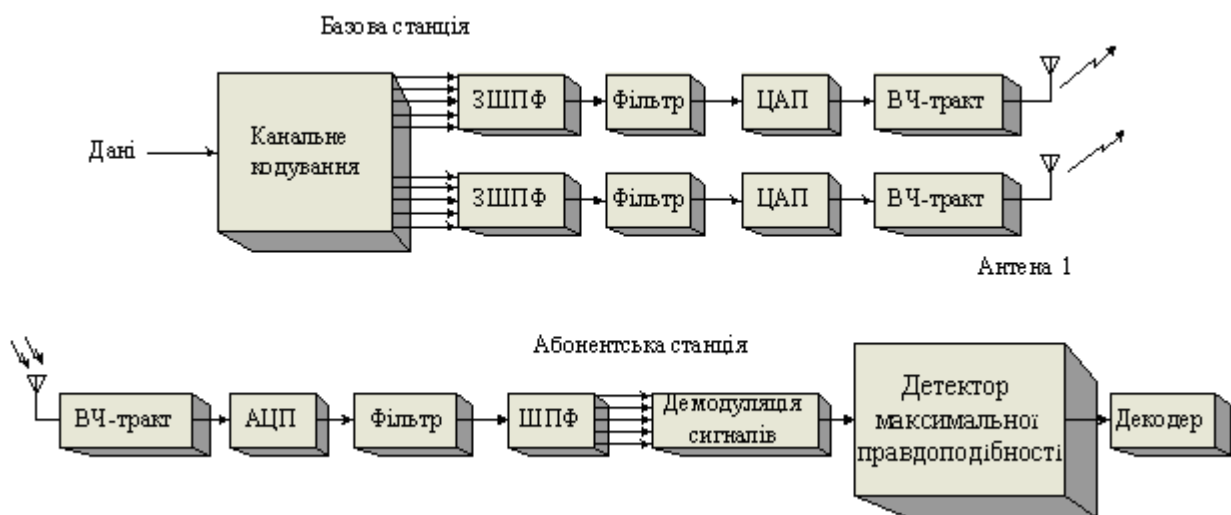


Рис.16.20 Метод просторово-часового кодування по схемі MISO

Особливості STC в методі OFDMA

В методі OFDMA передбачено ряд особливостей реалізації STC. Перш за все при формуванні OFDMA-символів набір пілотних частот залежить від

парності символу і номеру антенного каналу. Крім того, в OFDMA на додаток до просторово-часового рознесення використовується і частотне за допомогою частотних стрибків (Frequency Hopping Diversity Coding – FHDC). Суть даного механізму полягає в наступному: нехай несучі в субканалі X модулюються сигнальним вектором S_0 , в субканалі $X+1$ – вектором S_1 . Саме такий сигнал передає антена 0. Антена 1 транслює сигнал, в якому несучі підканалу X модулюються вектором S_1^* , несучі підканалу $X+1$ – вектором S_0^* . Відновлення в приймачі проходить аналогічно до розглянутого варіанту STC, тільки замість передавальних характеристик двох антен каналів використовуються характеристики, пов'язані з підканалами X і $X+1$ (тобто з наборами несучих цих підканалів).

Очевидно, що дану методику можна перенести на пари субканалів, тобто всі підканали OFDMA-символу розбиваються на суміжні пари $(X, X+1; Y, Y+1)$. В антені 0 вони передаються без змін, а в антені 1 в кожній парі здійснюється описане перетворення.

Всі схеми перетворення можна описати матрицею:

$$A = \begin{bmatrix} S_0 & -S_1^* \\ S_1 & S_1^* \end{bmatrix}. \quad (16.5)$$

Однак можлива і спрощена схема,

$$B = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \end{bmatrix}. \quad (16.6)$$

що забезпечує двократний вигравш у швидкості. Вигляд матриці перетворення задається базовою станцією в картах відповідних каналів.

Метод OFDMA допускає застосування STC/FHDC не тільки в низхідному, а й у висхідному каналі. Крім того можливі застосування STC не тільки на базі двох, а й чотирьох антенних елементів.

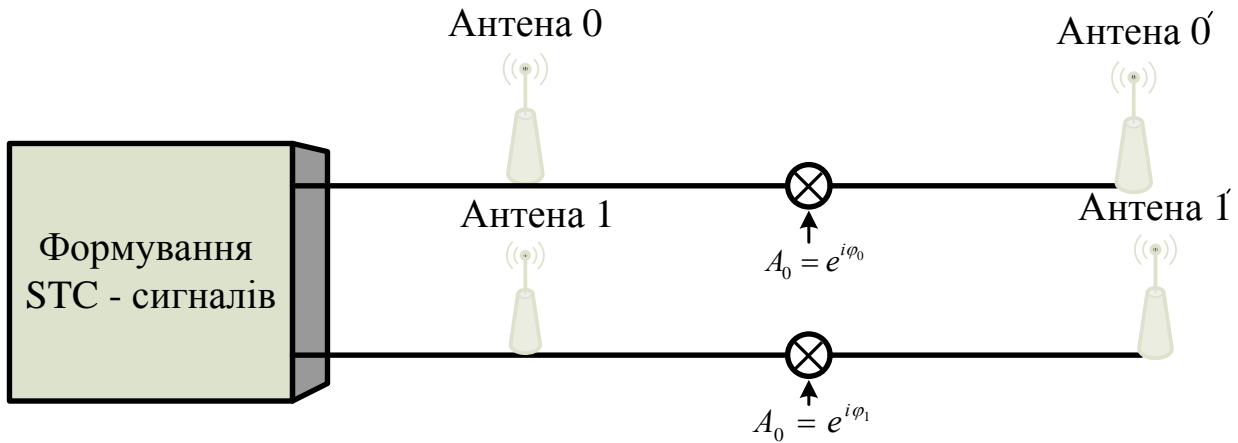


Рис.16.21 Схема STC з чотирма передавальними антенами

16.4. MAC-рівень стандартів 802.16

Завдання безпосередньої доставки потоків даних між БС і абонентськими станціями вирішуються на фізичному рівні стандарту 802.16. Функції, які зв'язані з формуванням структур цих даних, а також управління роботою системи 802.16, реалізуються на MAC-рівні.

На цьому рівні протокол між базовою і абонентською станціями визначає специфікацію доступу до радіоканалу. В умовах множинного доступу для усунення колізій одночасного доступу і переповнення даними буфера в протоколі MAC-рівня визначається керування доступом до середовища. В системі немає спільного центра комутації, як в системах коміркових мереж. Доступ до каналів зв'язку забезпечується взаємним “домовленням” між кожною абонентською станцією і базовою станцією - використовується множинний доступ з розподіленням по запиту DAMA (Demand Assigned Multiple Access).

Оскільки для деяких рівнів застосувань (наприклад, для передачі ATM - комірок) необхідно визначати рівень якості сервісу QoS, протокол MAC повинен вміти розподіляти пропускну здатність таким чином, щоб задовольнити потреби цих застосувань. В “каналі вниз” працює один передавач, тому протокол MAC більш простий. В “каналі вгору” за доступ до радіоканалу “змагаються” одночасно кілька абонентських станцій, тому протокол MAC-

рівня для управління в цьому випадку складніший.

На MAC-рівні здійснюються функції, пов'язані з наданням послуг користувачам. При передачі здійснюється доповнення блоку даних, отриманого від вищого рівня, необхідними полями і адресами, включаючи поля для виявлення помилок. В зворотному напрямку на прийомі виділяється інформаційна частина, розпізнаються адресні заголовки і виявляються помилки.

Вимоги забезпечення якості:

- функції конфігурації і реєстрації для попередньої конфігурації потоку послуг і параметрів трафіку;
- функції сигналізації для створення можливості динамічного управління потоком послуг і параметрів трафіку;
- використання MAC-списку і параметрів QoS трафіку для створення потоку послуг в “каналі вгору”;
- використання параметрів QoS трафіку для створення потоку послуг в “каналі вниз”;
- групування потоку послуг за їх властивостями в групи, що називаються класами послуг, в процедурах верхнього рівня і зовнішніх застосувань на АС і БС;
- використання процедури запитів для забезпечення необхідної якості QoS.

Механізм забезпечення QoS полягає у приєднанні в MAC-заголовках необхідних відомостей про тип потоку, який передається. Потік послуги – це однонаправлений потік пакетів, які забезпечуються індивідуальною якістю (QoS). АС і БС забезпечують цю якість засобами визначення параметра QoS для потоку послуги. Всі канали потоків послуги мають 32-бітовий ідентифікатор потоку послуги SFID (Service Flow ID); допускається активація потоку послуг за 16-бітовим CID.

Service Flow ID (SFID) – ідентифікатор потоку послуги, призначений для кожного виду потоку послуги. Він є принциповим ідентифікатором потоку послуги в мережі.

CID – ідентифікатор з'єднання. Відображається в SFID і визначається QoS при кожному з'єднанні.

Обладнання стандарту 802.16 призначене для формування транспортного середовища для різних послуг. Тому перша задача, яка вирішується в IEEE 802.16, – це механізм підтримки різних сервісів верхніх рівнів. Розробники стандарту прагнули створити єдиний для всіх застосувань протокол MAC-рівня незалежно від особливостей фізичного каналу. Це значно спрощує зв'язок кінцевих терміналів користувача з міською мережею передачі даних – фізичні середовища передачі даних в різних фрагментах WMAN можуть бути різними, але структура даних єдина. В одному каналі можуть одночасно працювати сотні різних терміналів. Цим користувачам необхідні різні послуги: потоки голосу і даних з часовим розділенням, з'єднання по протоколу IP, пакетна передача мови через IP (VoIP), та інші. Більш того, задана якість послуг (QoS) кожного сервісу не повинна мінятися при роботі через мережу 802.16. Алгоритми і механізми доступу MAC-рівня повинні впевнено вирішувати ці проблеми.

Структура MAC-рівня стандарту 802.16 складається із трьох рівнів:

- підрівень перетворення сервісу CS (Convergence Sublayer);
- основний підрівень CPS (Common Part Sublayer);
- підрівень захисту PS(Privacy Sublayer).

На підрівні захисту реалізуються функції криптозахисту даних і механізми аутентифікації (чи запобігання несанкціонованому доступу). Для цього передбачені два основні компоненти: набір алгоритмів криптозахисту і протокол управління ключем криптозахисту. Ключ кожної абонентської станції базова станція може передавати в процесі авторизації, використовуючи схему роботи “клієнт (АС) - сервер (БС)”.

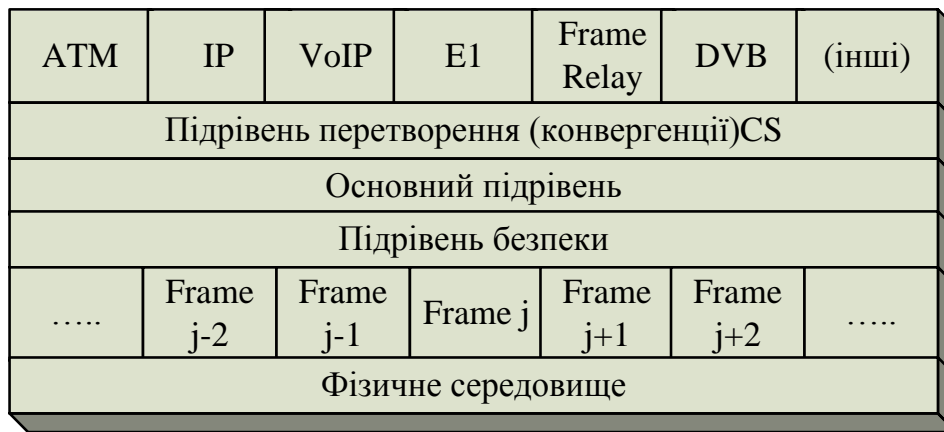


Рис.16.21 MAC-рівень в стандарті 802.16

На підрівні перетворення сервісу здійснюється трансформація потоків даних протоколів верхніх рівнів для передачі через мережі 802.16. Для кожного типу застосувань верхніх рівнів стандарт передбачає свій механізм перетворення. На сьогодні описані і увійшли а специфікацію IEEE 802.16 два основні типи сервісу потоків: ATM і пакетна передача. Остання включає в себе набір різних протоколів (IP, Ethernet, VLAN).

Мета роботи на CS підрівні – оптимізація потоків даних, які передаються для кожного застосування верхнього рівня з врахування їх специфіки. Тому найважливіша задача цього підрівня – класифікація пакетів (комірок). Від її результатів залежить оптимізація потоків і виділення смуги пропускання для кожного з них.

Для оптимізації трансльованих потоків передбачений спеціальний механізм видалення повторюваних фрагментів заголовків PHS (Payload Header Suppression). В ATM і в пакетному режимі дані передаються окремими порціями – комітками і пакетами. Кожна така порція даних складається із заголовка і поля даних фіксованого розміру для коміток ATM (5 і 48 байт) і будь-якого розміру при пакетній передачі. В багатьох випадках заголовки пакетів і коміток вміщують інформацію, яка повторюється, зайву для трансляції засобами протоколу 802.16. Механізм PHS дозволяє позбавитися від передачі надлишкової інформації – на передавальному кінці пакети застосувань у відповідності з певними правилами перетворюються в структури даних MAC-

рівня IEEE 802.16, а на приймальному кінці – відновлюються.

З'єднання і сервісні потоки

Ключовим моментом в стандарті IEEE 802.16 є поняття сервісного потоку і зв'язані з ним поняття “з'єднання” та “ідентифікатор з'єднання” (CID). Оскільки система IEEE 802.16 – лише транспортна мережа, її інфраструктуру фактично формують комунікаційні канали для потоків даних різних застосувань верхніх рівнів (сервісів), таких як передача відео, АТМ-потоки, ІР-потоки, передача телефонних і мультіплексованих пакетів типу Е1, та інші. Кожне із таких застосувань володіє своїми вимогами щодо швидкості передачі, надійності, якості обслуговування (QoS), криптозахисту, та інше.

Сервісним потоком в стандарті IEEE 802.16 називають потік даних, пов'язаний з конкретним застосуванням. Сервісний потік характеризується набором потреб (вимог) до каналу передачі інформації – часом затримки символів, рівень флуктуації затримок (джиттер) і гарантована пропускна здатність. Кожному сервісному потоку в мережі присвоюється ідентифікатор SFID (32 розряди), використовуючи який БС (деколи і АС) визначають необхідні параметри з'єднання, пов'язаного з конкретним сервісним потоком. Для загальної стандартизації роботи в мережі використовується поняття сервісного класу – стійкого набору параметрів для стандартних застосувань, наприклад для трансляції телефонних каналів Е1. Параметри сервісного потоку можна задати, просто вказавши його приналежність до конкретного сервісного класу.

В термінології IEEE 802.16 з'єднання – це встановлення логічного зв'язку на MAC-рівнях на передавальній і приймальній стороні для передачі сервісного потоку. Кожному з'єднанню присвоюється 16-розрядний ідентифікатор CID, з яким однозначно зв'язані тип і характеристики з'єднання. Зокрема по запиту надання/зміни смуги пропускання зі сторони АС, базова станція відразу розуміє, з яким сервісним потоком має справу і які умови передачі йому необхідно забезпечити. Наприклад, при початковій ініціалізації в мережі

кожній АС призначаються три CID для службових повідомлень трьох рівнів. Одна АС може встановлювати багато різних з'єднань з різними CID. Характерним є приклад, коли зв'язок великого офісу з телекомунікаційним вузлом організований через систему IEEE 802.16. В цьому випадку одна АС в офісі може підтримувати абсолютно різні застосування – телефонію, телебачення, доступ до Інтернету, розподіленої корпоративної мережі. Кожне з цих застосувань пред'являє свої потреби до QoS і швидкості передачі, які треба задовольнити. За допомогою CID базова станція аналізує вимоги та надає необхідний ресурс.

Пакети MAC-рівня

Весь потік даних в мережах IEEE 802.16 – це потік пакетів. На основному підрівні MAC формуються пакети даних (MAC PDU – MAC Protocol Data Unit), які потім передаються на фізичний рівень, інкапсулюються у фізичні пакети і транслюються через канал зв'язку. Пакет MAC PDU (далі PDU) включає заголовок і поле даних, за яким може слідувати контрольна сума CRC. Заголовок PDU займає 6 байт і може бути двох типів: загальний і заголовок запиту на смугу пропускання. Загальний заголовок використовується у пакетах, в яких присутнє поле даних. В загальному випадку вказується ідентифікатор з'єднання (CID), тип і контрольна сума заголовка, а також наводиться інформація про поле даних.



Рис.16.21 Пакет MAC-рівня IEEE 802.16

Заголовок запиту щодо смуги пропускання (також 6 байт) застосовується, коли АС “просить” у БС виділити чи збільшити смугу пропускання в “каналі

вгору”. При цьому у заголовку вказуються CID і розмір необхідної смуги пропускання. Поля даних після заголовків запиту на смугу пропускання немає.

Таблиця 16.6 Структура загального заголовка MAC PDU (від старшого до молодшого біта)

Поле	Довжина, біт
Тип заголовка = 0	1
Ознака шифрування поля даних	1
Тип підзаголовків	6
Не використовується	1
Ознака наявності CRC	1
Індекс ключа шифрування	2
Не використовується	1
Довжина пакетів включно із заголовком, байт	11
Ідентифікатор з’єднання CID	16
Контрольна сума заголовка (задаючий поліном $g(D) = D^8 + D^2 + D + 1$)	8

Поле даних може містити:

- підзаголовки MAC;
- повідомлення управління;
- власне дані застосувань прикладних рівнів, перетворених на CS- підрівні.

MAC-підзаголовки можуть бути п’яти типів: інкапсуляція, фрагментація, керування наданням каналу, а також підзаголовки Mesh-мережі і підзаголовку каналу швидкого зворотного зв’язку Fast Feedback.

Підзаголовок інкапсуляції використовується, якщо в поле даних одного PDU вкладено декілька пакетів верхнього рівня; підзаголовок фрагментації – якщо навпаки – один пакет верхнього рівня розбитий на декілька PDU.

Підзаголовок керування наданням каналу призначений для того, щоб АС

повідомляла БС про зміни своїх потреб в смузі пропускання.

Підзаголовок Fast Feedback служить для призначення конкретній АС інтервалу для швидкої відповіді на запит БС (наприклад, в під час процедур зміни характеристик каналу).

Повідомлення управління – це основний механізм керування системою IEEE 802.16. Загалом зарезервовано 256 типів повідомлень управління, з них використовуються 48. Формат повідомлень простий – поле типу повідомлення (1 байт) і поле даних (параметрів) довільної довжини.

Опис профілів пакетів, керування доступом, механізми криптозахисту, динамічна зміна роботи системи – всі функції управління, надання доступу, запиту і підтвердження реалізуються через управляючі повідомлення. Карти висхідного/низхідного каналів (UL-/DL-MAP) також є управляючими повідомленнями.

Загальна структура кадрів IEEE 802.16

Для розуміння принципів управління повідомленнями і потоками даних в мережах IEEE 802.16 розглянемо загальні принципи передачі у фізичному каналі.

Передача даних на фізичному рівні здійснюється за допомогою неперервної послідовності кадрів фіксованої довжини. Кадр складається з двох субкадрів – для низхідного і висхідного потоків. Дуплексний механізм передбачає як частотне FDD (Frequency Division Duplex), так і часове TDD (Time Division Duplex) розділення висхідних і низхідних субкадрів.

При часовому дуплексі каналів кадри передаються в одному частотному діапазоні, спочатку низхідний (DL), а потім висхідний (UL). При частотному дуплексі висхідний і низхідний субкадри транслюються одночасно, але з частотним розносом.

DL – субкадр починається із синхронізуючої послідовності (преамбули), за якою слідує управляюча секція з набором ширококомовних службових повідомлень. За ними передаються пакети фізичного рівня, які містять службові

повідомлення, так і дані для різних АС.

Пакети в низхідному субкадрі слідуєть один за одним без інтервалів. Щоб абонентські станції могли відрізнати один пакет від іншого, в управляючій секції передаються карти низхідного (DL-MAP) і висхідного (UL-MAP) каналів. В карті низхідного каналу вказана тривалість і номер кадру, ідентифікаційний номер базової станції, номер останнього переданого дескриптора низхідного каналу (в якому описані профілі пакетів поточного кадру), а також точка початку і тип профілю кожного пакету. Точка початку відраховується в фізичних слотах, розмір яких різний для кожного режиму IEEE 802.16. Наприклад, в режимах SC і SCa фізичний слот рівний чотирьом модуляційним символам.

Профіль пакету – це список його параметрів, включаючи метод модуляції, тип FEC-кодування, а також діапазон значень сигнал/шум в приймальному каналі конкретної станції, при якому даний профіль може застосовуватися. Кожному профілю пакету в низхідному/висхідному каналі присвоюється ідентифікаційний код DIUC/UIUC (Downlink/Uplink Interval Usage Code), який і використовується в карті низхідного каналу для розподілення ресурсів. Список профілів у вигляді спеціальних управляючих повідомлень – дескрипторів висхідного і низхідного каналів (UCD/DCD) – транслюється базовою станцією з періодом не менше 10с.

У висхідному субкадрі для кожної передаючої АС базова станція резервує спеціальні часові інтервали – тайм-слоти. Інформація про розподіл тайм-слотів між АС записується в карті висхідного каналу UL-MAP, що транслюється в кожному кадрі. UL-MAP функціонально подібна до DL-MAP – в ній повідомляється, скільки тайм-слотів в субкадрі, точка початку, ідентифікатор з'єднання для кожного з них, а також тип профілів для всіх пакетів.

Крім призначених БС тайм-слотів для конкретних АС в UL-каналі передбачені інтервали конкурентного доступу, на протязі яких АС може передати повідомлення для початкової реєстрації в мережі, або для запиту/зміни смуги пропускання наданого каналу.

Принцип надання каналних ресурсів

Основний принцип надання доступу до каналу в стандарті 802.16 – це доступ по запиту (Demand Assigned Multiple Access - DAMA). Жодна АС не може нічого передавати, крім запиту на реєстрацію і надання каналу, поки БС не дозволить їй цього, тобто виділить для неї часовий інтервал у висхідному каналі і вкаже його розміщення в карті UL-MAP. АС може вимагати окремий розмір смуги в каналі, так і просити про зміну вже наданого їй каналного ресурсу.

Стандарт 802.16 передбачає два режими надання доступу: для кожного окремого з'єднання і для всіх з'єднань конкретної АС. Очевидно, що перший механізм забезпечує більшу гнучкість, але другий значно зменшує об'єм службових повідомлень і потребує меншої продуктивності від обладнання.

Запити смуги можуть бути випадковим так і запланованими. В першому випадку запити реалізуються за допомогою пакетів, які складаються із заголовку запиту, що передаються на конкурентній основі в спеціально виділеному для них інтервалі висхідного каналу. Оскільки ці запити випадкові, в даних інтервалах можливі колізії.

Принцип боротьби з колізіями аналогічний принципу в стандарті 802.11 – після того, як АС вирішила, що її зареєстрували вона починає трансляцію В першому призначеному для цього інтервалі. В АС є генератор випадкових чисел, що вибирає значення чисел з деякого діапазону від 0 до $2^n - 1$. Якщо $n = 4$, генератор вибирає числа в діапазоні 0...15, наприклад 11. Далі АС відраховує 11 інтервалів, призначених для реєстрації (запиту), і тільки в 12-ому виходить в ефір. Якщо передача пройшла успішно і БС прийняла запит, вона в конкретний період відповідає спеціальним повідомленням. В іншому випадку АС вважає спробу невдалою і повторює процедуру, а інтервал вибору для генератора подвоюється. Така послідовність дій продовжується до тих пір, поки не буде отримана відповідь від БС. Максимальний розмір діапазону можливих значень генератора обмежений.

Процедура планованих запитів щодо смуги у висхідному каналі називається опитуванням (polling) – БС ніби опитує АС щодо потреб в каналних ресурсах. Реально це означає, що базова станція надає конкретній АС інтервал для передачі запиту про надання/зміни смуги, тобто ніякої конкуренції вже нема.

Опитування може бути в “реальному часі” – інтервали для запиту надаються АС з періодом, який приблизно відповідає часу появи потреб в зміні умов доступу (наприклад, в кожному кадрі). Цей режим зручний для застосувань, коли пакети даних передаються з фіксованим періодом, але їхній розмір не є постійним (наприклад, відео MPEG). Другий варіант опитування поза “реальним часом”. В цьому випадку БС надає АС інтервал для запиту також періодично, але цей період значно більший, ніж 1с. Характерним застосуванням, для якого цей механізм ефективний є FTP-протокол.

Для застосувань, в яких періодичність і розмір пакетів фіксовані (наприклад, канал телефонії Е1), передбачений механізм доступу до каналу без потреби (Unsolicited Grand Service – UGS). В цьому випадку БС надає АС для передачі інтервал фіксованого розміру із заданим періодом, що відповідає швидкості потоку даних.

Якщо в під час роботи АС необхідно змінити умови доступу, вона робить це за допомогою спеціального MAC-підзаголовку управління наданням каналу. В цьому підзаголовку є спеціальний прапорець “опитування”, встановивши який АС просить у БС інтервал для запиту нової смуги. В цьому підзаголовку АС може безпосередньо запитати в БС додаткову добавку (в байтах) до вже наданої смуги для конкретного з'єднання. В підзаголовку надання каналу також є спеціальний біт індикації переповнення вхідного буферу передавача АС. БС може відреагувати на появу цього сигналу, наприклад, збільшивши смугу для даної АС.

Механізм підтвердження прийому (ARQ) і швидкого зворотного зв'язку

Найважливіша особливість MAC-рівня для діапазону до 11 ГГц – це процедура підтвердження прийому пакетів і їх повторного відправлення (ARQ). Даний механізм достатньо відомий та базується на властивостях коректуючих кодів виявляти помилки, які виникають під час передачі. Кожний пакет при передачі кодується лінійним циклічним коректуючим кодом з достатньою кількістю перевірочних символів.

Отримавши пакет, приймач зобов'язаний відправити передавачу квитанцію підтвердження. Всі пакети нумеруються, тому приймач відразу виявляє збій в отриманні конкретного пакету і повідомляє про це передавачу, який повторно відправляє втрачений пакет. Режим ARQ використовується за необхідності і призначається конкретному з'єднанню. Очевидно, що режим ARQ вимагає ефективного швидкого зворотного каналу зв'язку для підтверджень.

Другою важливою особливістю режимів в діапазоні до 11 ГГц є швидка організація каналу зворотного зв'язку. Ряд механізмів стандарту, перш за все періодичні зміни параметрів каналу, корекція потужності передавачів, та інші потребують швидкої і гарантованої відповіді зі сторони АС. Особливого значення ці процедури набувають при роботі з адаптивними антенними системами, де важливо визначати фізичні параметри каналу зв'язку в кожному промені (секторі). Робота процедури полягає у відправленні спеціальних повідомлень і отримання даних про умови їх проходження через канал. В різних режимах (SCa, OFDM, OFDMA) назва і тип подібних повідомлень дещо відрізняються, однак суть від цього не міняється.

Зокрема для пріоритетної передачі таких даних абонентським станціям в режимі OFDMA передбачений спеціальний тип повідомлень швидкого зворотного зв'язку (Fast Feedback) і виділяється спеціальний канал у висхідному субкадрі для їх передачі. Самі повідомлення зворотного зв'язку представляють собою 4-розрядні двійкові числа, розташування яких в каналі

зворотного зв'язку для кожної АС базова станція задає в спеціальному підзаголовку Fast Feedback. В ньому вказується тип (призначення) повідомлення – зміна потужності в низхідному каналі, коефіцієнти антен БС в режимі AAS, та інші. Передбачені і спеціальні заходи для доставки цих 4-розрядних повідомлень з 24-кратною надлишковістю: кожне повідомлення (4 біти) займає 1 OFDMA-слот (3 символи на один субканал, 6 фрагментів, 48 інформаційних несучих). Тобто, 4-бітній послідовності поставлений у відповідності фіксований набір всіх 48 інформаційних несучих в слоті. Модуляція в Fast Feedback каналі – QPSK, 2 біти на символ, відповідно на кожний інформаційний біт повідомлення припадає 24 трансльованих біти. Дана надлишковість в певній мірі забезпечить гарантовано достовірний прийом повідомлення.

Частина 4.
Транкінгові та радіотелефонні системи
радіозв'язку

17. ОСОБЛИВОСТІ ТРАНКІНГОВИХ СИСТЕМ

17.1. Загальні зауваження

Транкінгові системи радіозв'язку (ТСР) являються розвитком систем напівдуплексного радіозв'язку і за рядом ознак їх можна віднести до систем стільникового зв'язку.

На відміну від звичайних систем з постійно закріпленими частотними каналами в ТСР застосовується динамічний розподіл каналів. Термін “транкінг”, який прийнятий у сфері професійного радіозв'язку, означає метод вільного доступу великого числа абонентів до обмеженого числа каналів (пучка, стовбура, або за зарубіжною термінологією - транку). Оскільки в який-небудь момент часу не всі абоненти активні, необхідне число каналів є значно меншим за загальне числа абонентів.

Коли радіоабонент транкінгової системи здійснює виклик, система призначає йому один з наявних вільних каналів. При цьому статистика активності звичайно є такою, що невеликої кількості виділених каналів достатньо для обслуговування значного числа абонентів.

Цю ситуацію ілюструють цифри, що запозичені з документації на систему ACCESSNET фірми Rohde & Schwarz (табл. 17.1).

Таблиця 17.1 Залежність кількості абонентів від кількості радіоканалів

Кількість каналів	Загальна кількість абонентів
6	320
11	790
21	1760
25	2160

На відміну від звичайних систем радіозв'язку ТСР характеризуються наступними ознаками:

- економне використання радіоспектру;

- наявність однієї, або декількох базових радіостанцій і системи управління;
- можливість виходу в інші мережі, зокрема в телефонну мережу загального користування;
- збільшення зони обслуговування шляхом створення багатозонавої мережі;
- передача даних та інформації телеметрії;
- додаткові сервісні можливостей.

Перераховані вище ознаки характерні і для стільникових систем зв'язку. Проте, на відміну від стільникових, транкінгові системи в першу чергу орієнтовані на завдання, пов'язані з оперативним управлінням. Кількість споживачів є достатньо великою – підрозділи залізничних і автомобільних доріг, підприємства енергетичного комплексу, адміністрації всіх рівнів, установи міського господарства, правоохоронні органи, загони МНС, комерційні структури і т.д.

У порівнянні з стільниковими системами до переваг ТСП, що дозволяють віддати їм перевагу при організації оперативного зв'язку, слід віднести:

- гнучку систему викликів – індивідуальний, груповий, мовний, пріоритетний, аварійний та ін.;
- гнучку систему нумерації – від коротких двох – чи трьохзначних до повноцінних міських номерів;
- малий час встановлення з'єднання – менше секунди, порівняно із декількома секундами в стільникових системах;
- можливість роботи в групі;
- наявність (у ряді систем) режиму безпосереднього зв'язку між двома абонентськими радіостанціями без участі базової станції;
- економічність – за вартістю обладнання і за експлуатаційними витратами ТСП в декілька разів економніші стільникових систем.

Необхідно зауважити, що при зовнішній структурній подібності транкінгові мережі та мережі коміркового зв'язку істотно відрізняються за рядом функціональних особливостей і системних можливостей. Якщо перші орієнтовані на споживачів звичайних телефонних послуг і окупаються в регіонах з високою густиною населення (біля тисячі і більше абонентів в зоні), другі передусім являються засобом оперативного і виробничо – технологічного зв'язку і рентабельні при значно меншій кількості абонентів.

Слід відмітити, що самі терміни “коміркові” чи “транкінгові системи” малоінформативні з точки зору виявлення їх відмінностей. Так, в стільникових системах використовується метод динамічного розподілу каналів, тобто транкінг, і навпаки, сучасні багатозонові транкінгові системи містять ряд “родових” ознак коміркових систем. Ці терміни склалися історично і визначають системи мобільного зв'язку, які розвивалися своїми шляхами, вирішуючи різні завдання.

В таблиці 17.2 приведені основні параметри транкінгових систем для порівняння з звичайними та комірковими системами радіозв'язку.

Таблиця 17.2 Порівняння основних параметрів систем радіозв'язку

Параметри системи	Звичайна	Транкінгова	Коміркова
Конфігурація	Однозонова	Однозована, багатозонова	Багатозонова
Радіус зони	20...80 км	5...80 км	0.3...10 км
Тип виклику	Груповий	Індивідуальний, груповий	Індивідуальний
Метод посилки виклику	Натиснення кнопки “передача”	Натиснення кнопки “передача”, набір номера	Набір номера
Режим радіозв'язку	Напівдуплексний	Напівдуплексний, дуплексний	Дуплексний

Внутрішньосистемний трафік	100%	50÷90%	3÷15%
Роумінг	-	Є	Є
Режим переключення каналів при зміні зони	-	Жорсткий, м'який	М'який
Середнє число абонентів на канал	До 30	50-100	До 30

Для більш повного представлення функціональних можливостей TSP перерахуємо основні типи викликів, які забезпечуються більшістю стандартних протоколів:

- індивідуальний виклик для зв'язку між двома абонентами;
- груповий виклик для зв'язку між кількома абонентами одночасно;
- мовний виклик для заздальгідь вибраної групи, коли абоненти можуть слухати тільки повідомлення, але не можуть відповісти;
- конференц-виклик для підключення до розмови третього абонента під час розмови двох абонентів;
- переадресація викликів - виклики адресовані абоненту, автоматично переадресовуються раніше призначеному третьому абоненту;
- пріоритетний виклик застосовується для скорочення часу очікування при зайнятості системи, такі виклики обслуговуються поза загальною чергою;
- терміновий (аварійний) виклик має найвищий пріоритет, зв'язок встановлюється негайно шляхом переривання вже встановлених з'єднань;
- статусний зв'язок - посилка коротких повідомлень будь-якому іншому абоненту, або диспетчеру;
- передача блоків даних застосовується для зв'язку між комп'ютерами, або іншими системами обробки цифрової інформації;
- диспетчерський зв'язок - виклики на спеціально налаштовані диспетчерські пульти;

- вхідні і вихідні виклики для абонентів телефонної мережі забезпечують взаємодію радіоабонентів з абонентами відомчої мережі, або мережею загального користування;

Завдяки перерахованим особливостям транкінгові системи зайняли окрему нішу на ринку устаткування засобів радіозв'язку. Багато ведучих фірми - Motorola, Nokia та інші - разом із звичайними радіостанціями виготовляють також стільникове, транкінгове устаткування, орієнтоване на відповідні сектори даного ринку.

17.2. Архітектура транкінгових мереж

Архітектура транкінгових мереж в основному аналогічна архітектурі стільникових мереж.

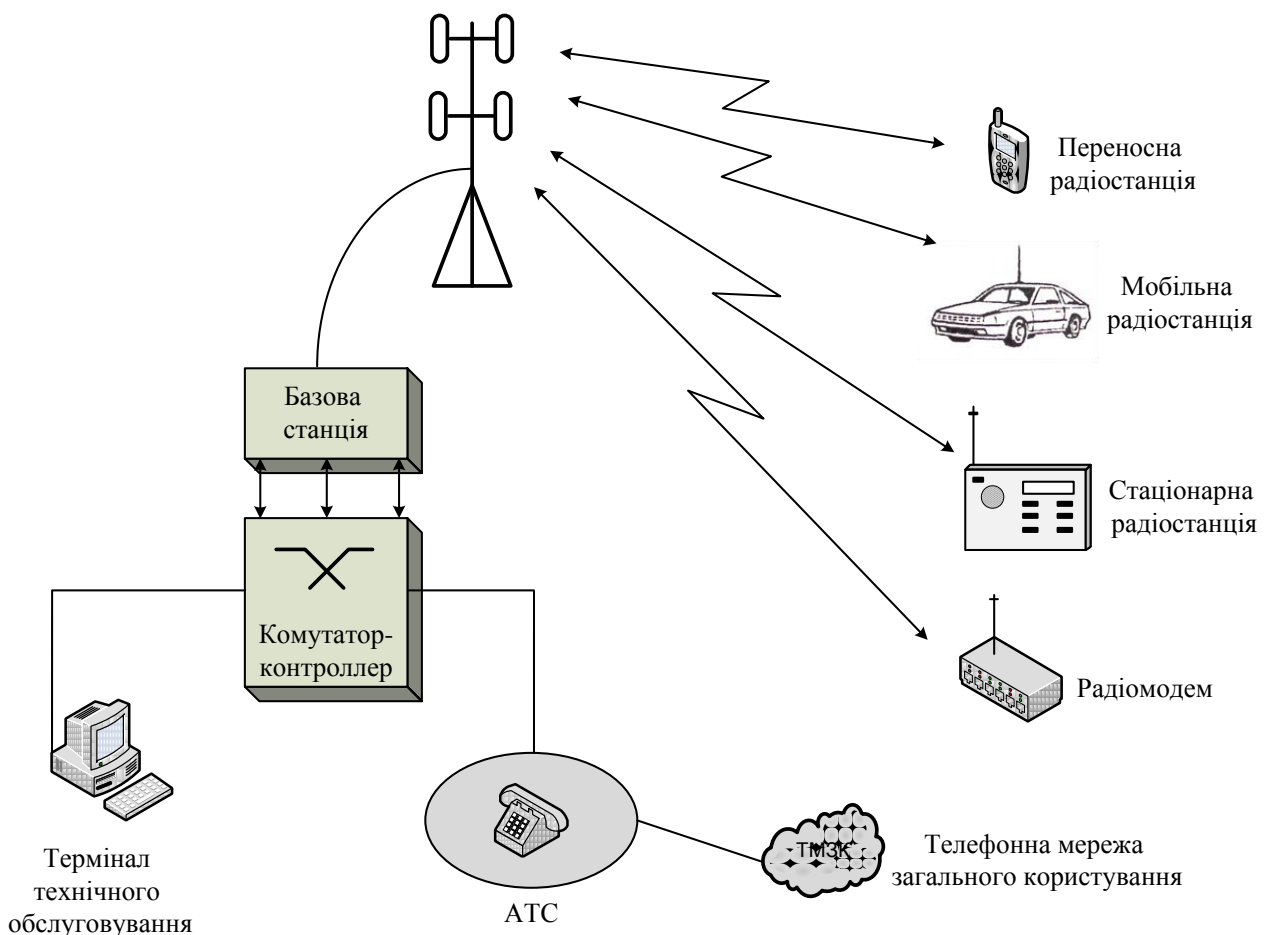


Рис.17.1 Схема однозонової транкінгової радіомережі

Розглянемо основні елементи архітектури ТСР на прикладі типової однозонової транкінгової системи із частотним розділенням каналів (рис. 17.1).

Базова радіостанція містить модулі прийомо-передавачів (ретрансляторів), кожний з яких настроєний на одну пару частот - прийому й передачі (рис. 17.2).

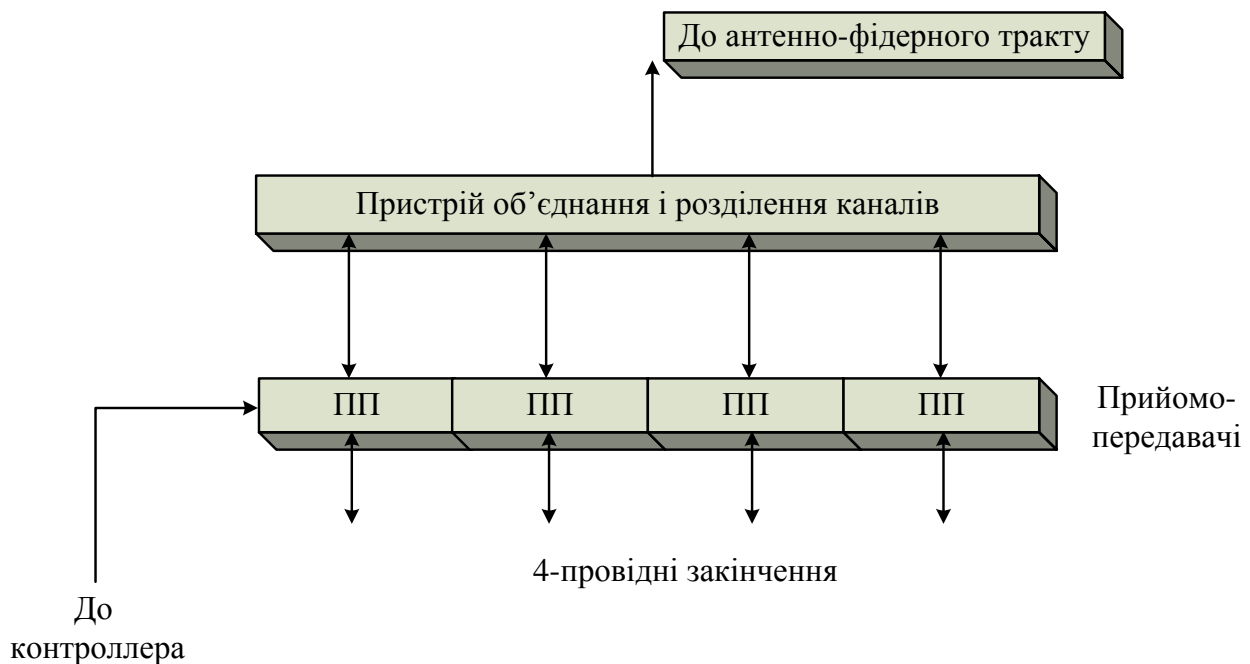


Рис.17.2 Структурна схема базової радіостанції

Таким чином, на відміну від звичайного зв'язку між двома радіостанціями, коли в напівдуплексному режимі досить однієї частоти, в транкінговій системі потрібно дві частоти, а для роботи в дуплексному режимі - чотири. Цю ситуацію ілюструє рис. 17.3.

Кожний із прийомо-передавачів має 4-провідне низькочастотне (звукове) закінчення для спряження з комутатором. Радіочастотні входи/виходи прийомо-передавачів приєднані до пристрою об'єднання/розділення каналів.

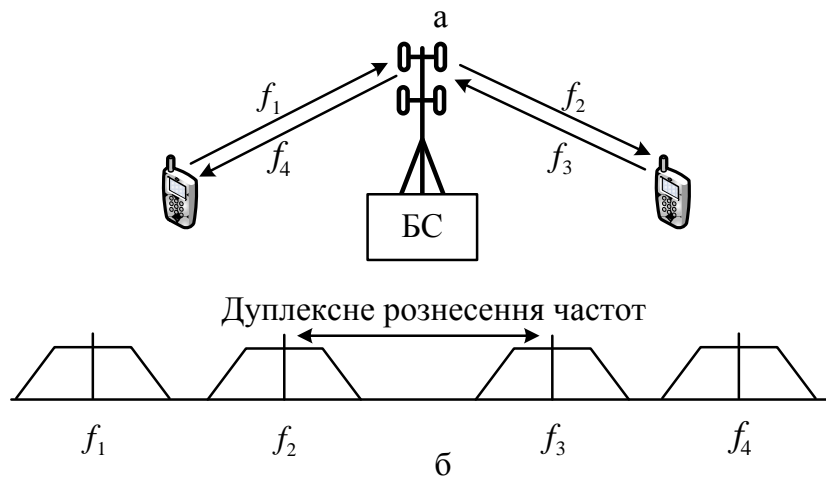
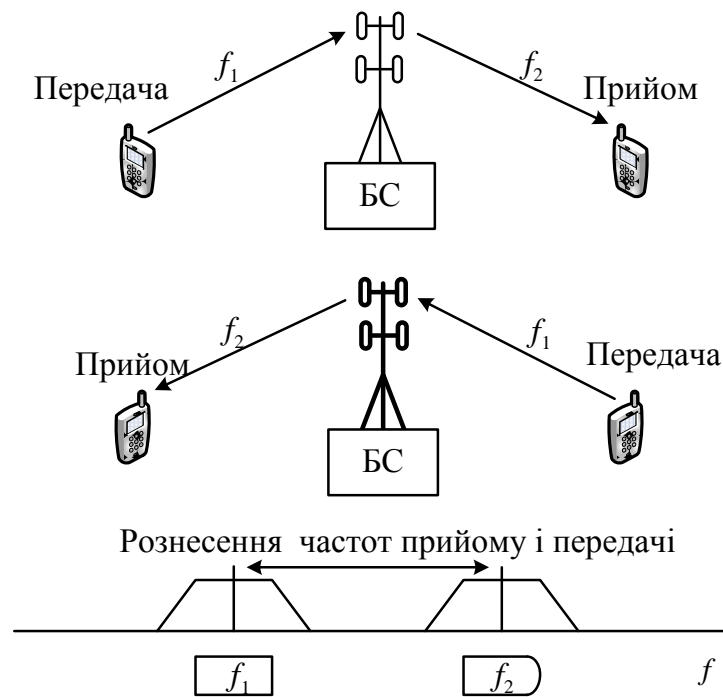


Рис.17.3 Рознесення частот при напівдуплексному (а) та дуплексному (б) зв'язку

Комутатор здійснює з'єднання рухомих абонентів, а також виконує функції спряження з телефонною мережею загального користування.

Контролер (пристрій управління) забезпечує взаємодію всіх вузлів базової станції. Здійснює обробку викликів та управляє процесом установлення з'єднань. Часто контролер і комутатор поєднуються в одному модулі.

Інтерфейс із ТМЗК призначений для сполучення з телефонною мережею загального користування. Забезпечує електронний стик із закінченнями АТС та узгодження протоколів сигналізацій.

Абонентське устаткування представлено носимими, возимими стаціонарними радіостанціями, а також терміналами передачі даних і пристроями телеметрії.

Багатозонова транкінгова мережа створюється з метою збільшення зони обслуговування. При цьому територія обслуговування розбивається на зони, як правило, шестикутної форми (комірки). На рис. 17.4 зображена структура 3-зонової мережі.

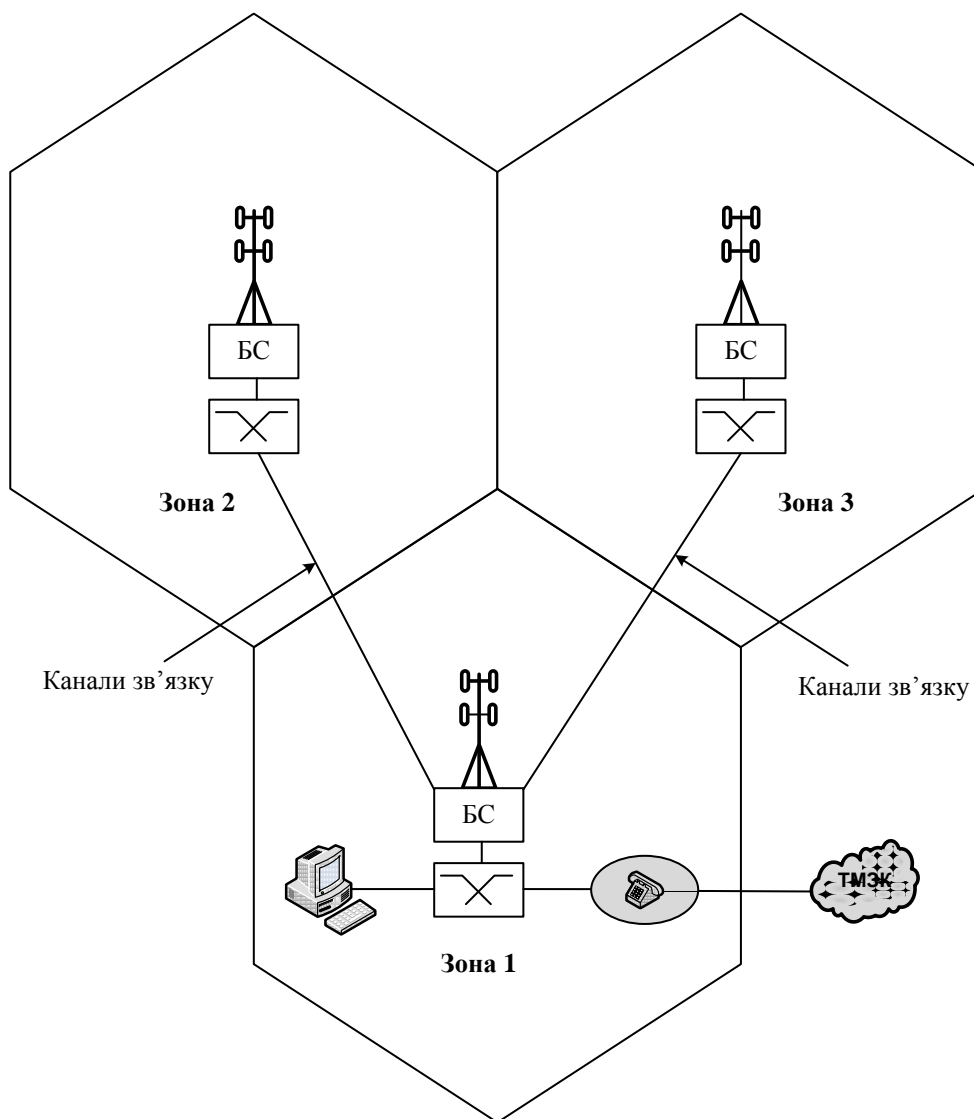


Рис.17.4 Структура мережі багатозонового транкінгового зв'язку

Управління мережею здійснює центральний вузол, що містить центральний комутатор-контролер, термінал технічного обслуговування і

управління, а також інтерфейс із ТМЗК. Комутатори різних зон зв'язані між собою каналами управління й передачі трафіку. Для цієї мети застосовуються як фізичні (виділені) лінії, так і стандартні аналогові, або цифрові системи передачі.

Необов'язково, щоб кожна зона мала свій власний комутатор. Для зон з малим числом абонентів функції комутації можуть виконуватися центральним комутатором, для чого між ним і базовою радіостанцією організовується необхідне число каналів. У цьому випадку устаткування будується за модульним принципом. Можуть окремо існувати прийомо-передавальне устаткування, що зазвичай називається базовою станцією, і комутатор, до складу якого входить основний контролер, з функціями управління всією системою.

Через спеціально виділені канали постійно здійснюється обмін сигналами між контролерами інших зон. Вся інформація про виклики надходить у головний контролер, що управляє процесом з'єднання. Чим більш віддалені один від одного абоненти та чим більш різномірні мережі у яких вони розташовані, тим складніші функції управління мережею й тим більший обмін керуючими сигналами, необхідними для встановлення з'єднання, його підтримки та його завершення. Звідси виникає необхідність розробки складних протоколів взаємодії всіх елементів системи - контролерів, комутаторів, абонентських радіостанцій, а також спряження цих елементів з іншими мережами.

В багатозонових транкінгових системах виникає необхідність відстеження місця розташування радіоабонентів під час їхнього переміщення із зони в зону. Процедура відстеження місця розташування абонентів називається роумінгом. Вона досягається виконанням алгоритмів управління, що закладені в програмному забезпеченні контролерів. Специфічна особливість транкінгових систем полягає в необхідності підтримки групового роумінгу для забезпечення можливості роботи в групі.

В багатозонових системах виникає необхідність частотного планування

для усунення взаємних перешкод між радіостанціями сусідніх зон.

Багаторівнева транкінгова мережа

З метою більш гнучкого управління трафіком та економії ресурсів системи можуть бути реалізовані багатозонові та багаторівневі ТСР. Останнє означає, що управління частиною трафіку покладається на контролери і комутатори підлеглого рівня. Це розвантажує ресурси центрального комутатора, зменшує загальну кількість і довжину мовних каналів, що зв'язують комутатори. Топологія багатозонові і багаторівневої мережі приведена на рис. 17.5.

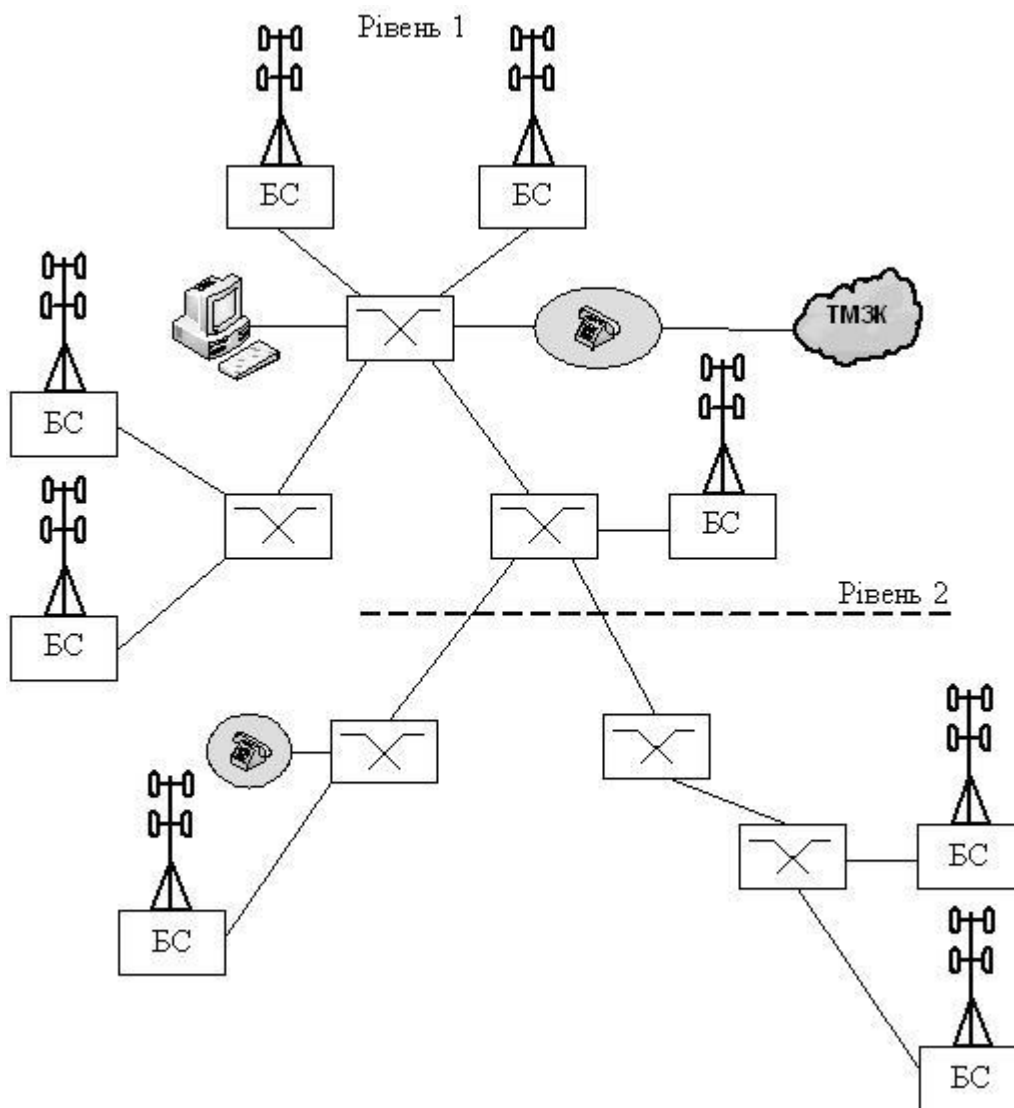


Рис.17.5 Топологія багаторівневої мережі

17.3. Класифікація транкінгових мереж

Перелічимо основні ознаки, що лежать в основі класифікації тих, або інших ТСР.

Метод передачі мовної інформації. За цією ознакою ТСР можуть бути розділені на аналогові й цифрові системи. У першому випадку застосовується частотна модуляція звукового сигналу. У радіоспектрі з врахуванням ретрансляції один канал займає дві смуги частот шириною 12.5 КГц (у більш ранніх системах – 25.0 КГц). При використанні дуплексних радіостанцій для виходу на ТМЗК необхідно чотири таких смуги, значно рознесених за частотою з метою розв'язки передавача й приймача. При використанні дуплексних систем різко зменшується пропускна здатність системи. Через це в ТСР обмежують число дуплексних радіостанцій, закріплюючи їх тільки за тими абонентами, яким необхідний вихід у телефонну мережу загального користування.

В цифрових системах застосовуються спеціальні пристрої - вокодери, які перетворюють звуковий сигнал у цифровий потік зі швидкістю в декілька кілобіт в секунду (типово - 4.8 Кбіт/с), і відповідно цифрові пристрої модуляції радіосигналу. Застосування цифрових сигналів дозволяє забезпечити ефективну багаторазову ретрансляцію мовних повідомлень без погіршення якості, а також дає можливість засекречувати інформацію. Дуплексний зв'язок у цифрових системах може бути виконаний на одній частоті з почерговою передачею цифрових пакетів між двома радіостанціями ("пінг-понг").

Метод багатостанційного доступу. Багатоканальні повідомлення можуть розділятися як за частотою, так і в часі. Відповідно до цього в ТСР можуть застосовуватися як метод множинного доступу із частотним розподілом каналів FDMA, так і метод множинного доступу з часовим розподілом каналів TDMA, а також їхнє поєднання. В аналогових транкінгових системах застосовується винятково метод FDMA. У більшості цифрових ТСР також, як правило, застосовується метод FDMA, проте, наприклад, у стандарті TETRA застосовується поєднання обох методів.

Метод управління з'єднаннями. Для виділення каналів й організації з'єднань між абонентами в ТСП застосовується два види управління - розподілене (децентралізоване) і централізоване. Розподілене управління використовується головним чином в однозонових системах, або в мережах з малою кількістю зон. При цьому для здійснення з'єднання абонентська радіостанція здійснює пошук вільного каналу (сканування). При великій кількості абонентів це приводить до збільшення часу з'єднання до декількох секунд, що критично для оперативного зв'язку. Централізоване управління припускає наявність окремого каналу управління і застосовується при побудові багатозонових систем.

Тип протоколу управління. У ТСП застосовується велике число найрізноманітніших протоколів управління: від відкритих - стандартизованих і офіційно публікованих до закритих - фірмових. Найбільш поширені відкриті протоколи - SmarTrunk, MPT 1327 і TETRA. На їхній основі реалізовано більшість систем транкінгового зв'язку.

18. АНАЛОГОВІ ТРАНКІНГОВІ СИСТЕМИ

18.1. Система SmarTrunk II

Найбільшу популярність при побудові недорогих транкінгових радіосистем набули системи з децентралізованим протоколом управління типу SmarTrunk, розробленим в 1992 р. фірмою SmarTrunk Systems, Inc. В даний час випускається друге покоління даної системи, що одержала назву SmarTrunk II. Структурна схема базового устаткування 4-канальної системи SmarTrunk II наведена на рис. 18.1.

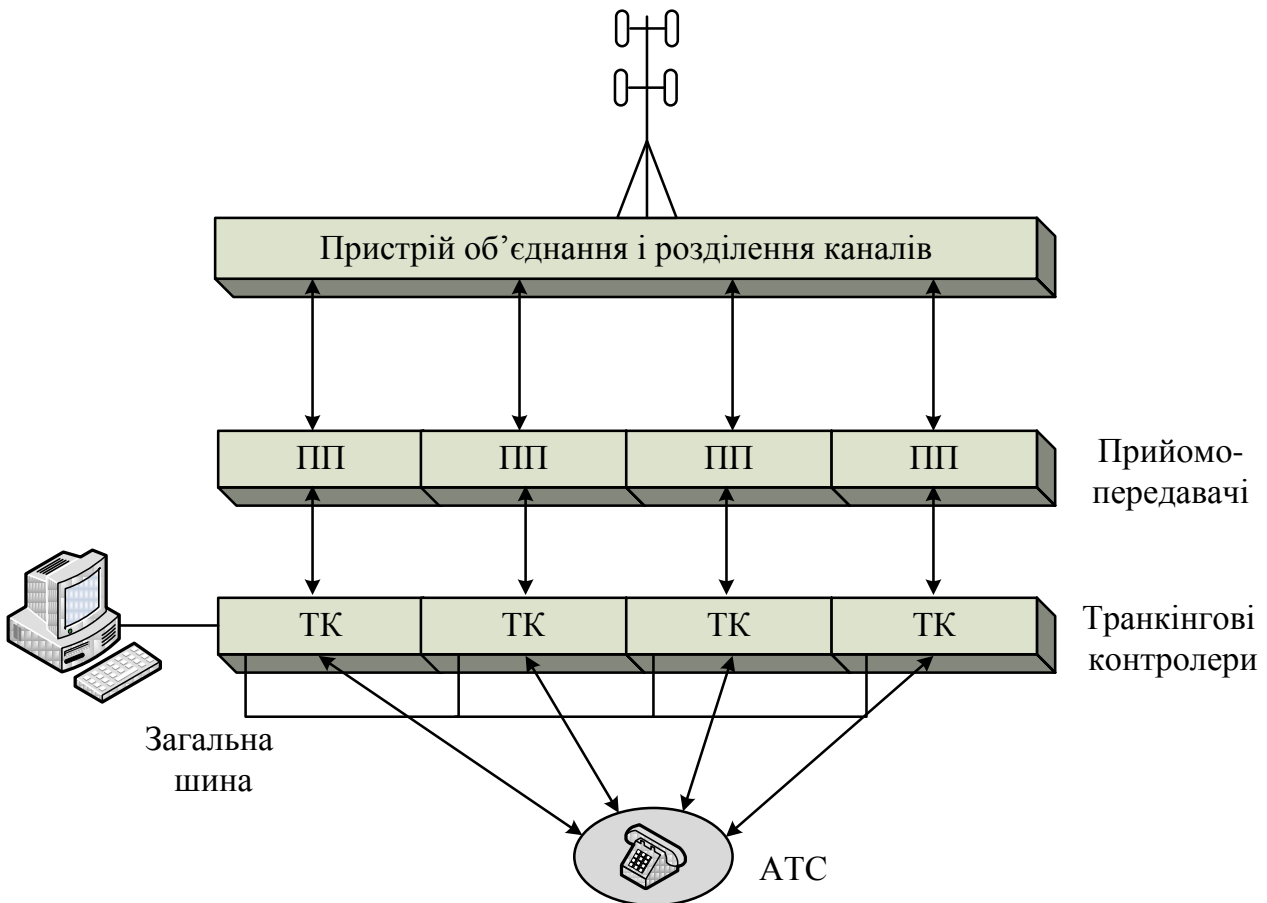


Рис.18.1 Структурна схема базової станції SmarTrunk II

Центральним елементом системи являється транкінговий контролер, зв'язаний з прийомо-передавачем даного радіоканалу. Він виробляє всі керуючі сигнали, що дозволяють абоненту здійснити заняття даного каналу та з'єднання з іншими абонентами. В базі даних контролера зберігається вся необхідна

інформація про абонентів системи - ідентифікаційні коди абонентських станцій, рівень пріоритетності кожного абонента, дозвіл виходу на телефонну мережу та інша інформація.

З'єднання в системі SmarTrunk II виконується в наступній послідовності:

- викликаюча станція захоплює незайнятий радіоканал і надсилає запит у вигляді цифрового пакета, що містить власний ідентифікаційний код, тип виклику та ідентифікаційний код абонента, що викликається (номер абонента в радіомережі, або телефонний номер абонента телефонної мережі);
- у випадку, якщо виклик адресований радіоабоненту, контролер, одержавши запит по каналу прийому, посилає в канал передачі пілот-тон певної частоти й тривалості;
- всі вільні абонентські станції сканують канали доти поки не зупиняться на каналі, де є присутнім пілот-тон;
- далі, контролер посилає в канал пакет виклику, що містить ідентифікаційний код абонента, що викликається, тип виклику та ідентифікатор системи;
- викликана станція залишається на даному каналі, а інші повертаються в режим сканування;
- після завершення сеансу зв'язку абонентська станція посилає завершальний цифровий пакет;
- одержавши даний пакет, контролер посилає свій завершальний пакет, прийнявши який, обидві станції повертаються до режиму сканування.

Всі керуючі сигнали формуються в смузі розмовного каналу.

До позитивної сторони даної системи можна віднести простоту і невисоку вартість устаткування, в першу чергу, абонентської станції. Остання є звичайною ЧМ радіостанцією, удосконаленою за допомогою розміщення керуючого модуля. До недоліків можна віднести невисокий рівень сервісу і тривалий час встановлення з'єднання. Крім цього, на основі протоколу

SmarTrunk не можна створити повноцінну багатозонову систему транкінгового зв'язку. Основні параметри даної системи зведені в таблиці 18.1.

Таблиця 18.1. Основні параметри системи SmarTrunk II

Діапазон частот, МГц	160, 330, 450
Тип модуляції для передачі голосу	аналогова ЧМ
Абонентське устаткування	звичайні радіостанції, оснащені вбудованими модулями
Тип сигналізації	цифрова BPSK, що передається в голосовому діапазоні
Метод управління з'єднаннями	децентралізоване, основане на пошуку вільного каналу абонентськими станціями
Час встановлення з'єднання	від 0.5 до 10 с в залежності від числа абонентів
Максимальне число робочих каналів у системі	16
Максимальне число абонентів у системі	4096 (для систем з контролерами ST-853)

18.2. Системи протоколу 1327

Своїм найменуванням даний протокол зобов'язаний документу, розробленому у Великобританії в 1988 р. як стандарт Міністерства пошти і телеграфів. У цей час протокол MPT 1327 одержав найбільше поширення в країнах Європи й Азіатсько-Тихоокеанського регіону. На основі цього протоколу будуються великі відомчі, регіональні й національні мережі зв'язку.

Існує цілий ряд транкінгових систем, що підтримують даний протокол та обладнання для яких випускаються різними виробниками - Fylde Microsystems, Tait Electronics, Nokia й ін. У Росії найбільше поширення одержала система ACCESSNET фірми Rohde & Schwartz.

В основу протоколу MPT 1327 покладений ряд принципів:

- Виділений канал управління. Системи протоколу MPT 1327 будуються з виділеним каналом управління, у якості якого використовується один з каналів базової станції. Інші канали є каналами трафіку та призначені для обміну мовними повідомленнями й для передачі даних.
- Обслуговування із чергами. Якщо виклик надходить в момент, коли всі канали зайняті, він буде поставлений у чергу і обслужений відповідно до пріоритету абонента.
- Довільний доступ. У момент запиту на з'єднання в каналі управління існує небезпека зіткнення запитів від різних станцій. Для вирішення подібних конфліктів застосовується алгоритм довільного доступу.
- Роумінг. Протокол передбачає можливість абонентським станціям інформувати центральний контролер про своє місцезнаходження.
- Відкритість стандарту. Це дозволяє різним виробникам випускати сумісне обладнання. В такому випадку споживач не прив'язаний до якогось одного постачальника і може вибирати те або інше устаткування.

Сигнали управління між базовою і абонентською станціями, а також між контролерами базових станцій передаються каналом управління в цифровому виді зі швидкістю 1200 біт/с. При цьому відбувається практично безперервний обмін повідомленнями між базовою й абонентською станціями.

Для здійснення взаємодії існує ряд стандартних команд-повідомлень, що позначаються трьома, або чотирма символами.

На першому етапі обробки викликів має місце наступний обмін сигналами:

- базова станція посилає в канал повідомлення-запит ALH, що означає готовність приймати повідомлення від абонентських станцій протягом зазначеного часу;
- якийсь час базова станція перебуває в режимі прийому, якщо протягом цього інтервалу ніхто не відповів, - виклик повторюється;

- якщо за час, відведений на прийом, надійшов виклик, базова станція почне ту, або іншу процедуру встановлення з'єднання відповідно до типу запиту.

Для вирішення проблеми зіткнень запитів від абонентських станцій застосовується алгоритм довільного доступу (ALOHA). Зміст його полягає в тому, що запити від станцій надходять не в строго визначені, а у випадкові моменти часу. Таким чином зменшується ймовірність накладання запитів у часі.

Процес встановлення з'єднання між двома радіоабонентами ілюструє діаграма на рис. 18.2.

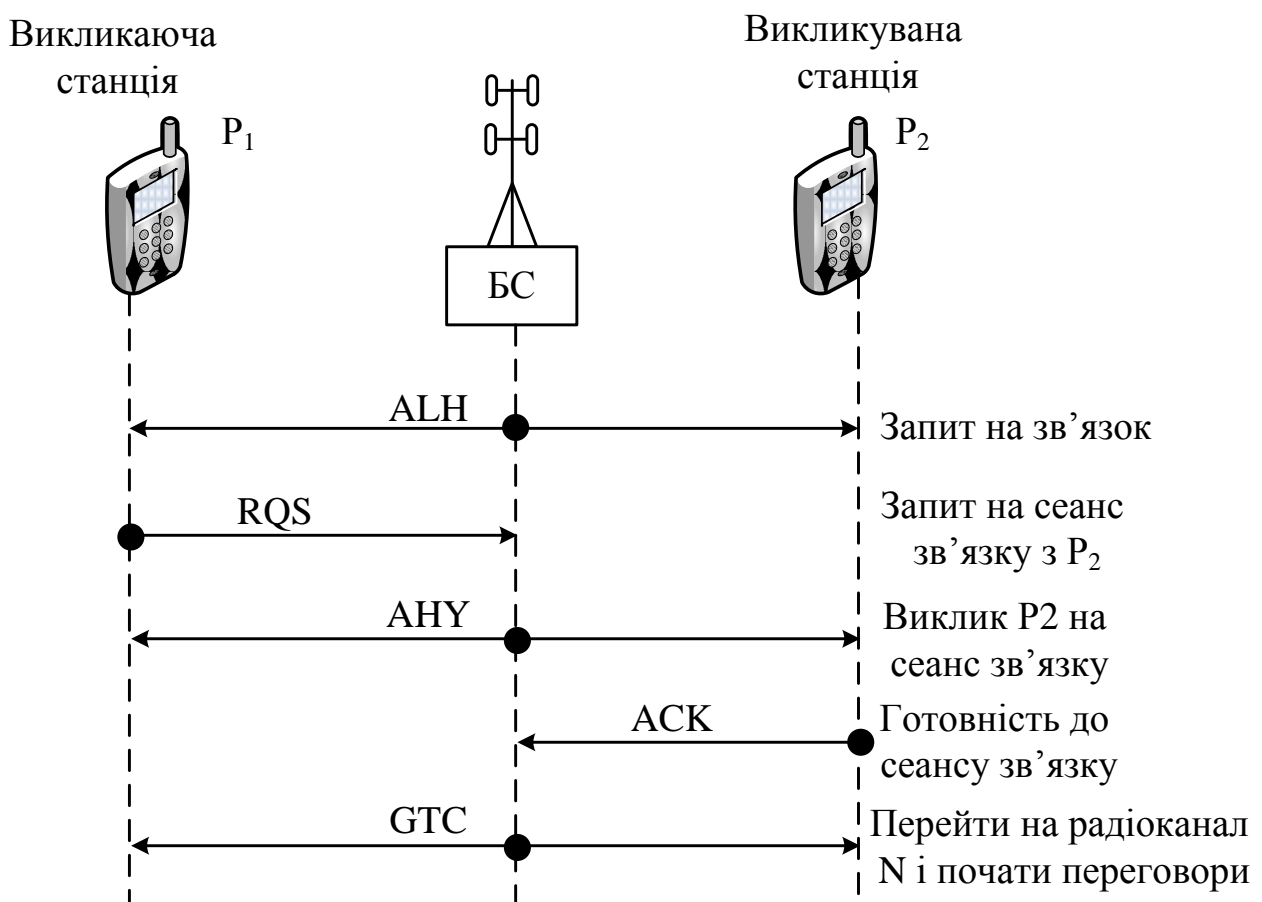


Рис.18.2 Обмін керуючими сигналами при встановленні з'єднання

Ємність системи

Специфікації протоколу MPT 1327 дають можливість одержати наступні максимальні значення параметрів транкінгової системи:

- 1 036 800 абонентських адрес;
- 32 768 ідентифікаційних кодів;
- 1024 керуючих каналів транкінгу.

Відповідно до величин цих параметрів, системи діляться на регіональні (до 16 сот у кожній системі) і національні (максимум 2 системи по 512 сот кожна).

Слід зазначити, що специфікації протоколу MPT 1327 не накладають принципових обмежень на інфраструктуру самої мережі і можуть використовуватись як для створення найпростіших однозонових, так і для створення великих мереж радіозв'язку із практично необмеженим числом абонентів. Конкретна система не реалізує всі функції, передбачені в стандарті MPT 1327 - вона може надавати лише необхідний мінімальний набір, що задовольняє вимоги замовника. Це забезпечує можливість створення на базі специфікацій даного протоколу широкого спектру прикладних систем.

Різниця в устаткуванні різних фірм-виробників (серед яких Rohde & Schwartz, Fylde Microsystems, Tait Electronics, Nokia, Zetron та ін.) визначається саме повнотою реалізації специфікацій MPT 1327.

На закінчення відмітимо, що даний протокол підтримують головним чином аналогові системи. Однак, сам по собі протокол MPT 1327 не накладає обмежень на тип радіоканалу і види модуляції. Сьогодні існують повністю цифрові системи, реалізовані на базі протоколу MPT 1327, наприклад система ACCESS-NET-D компанії Rohde & Schwartz.

19. ЦИФРОВА ТРАНКІНГОВА СИСТЕМА TETRA

19.1. Загальні зауваження

Наступним етапом розвитку транкінгового зв'язку стала поява цифрових систем, тобто систем, де службова інформація і голосові канали передаються в цифровій формі.

Цифрові транкінгові системи надають своїм користувачам ряд переваг перед аналоговими системами.

- Конфіденційність переговорів. Застосування криптистійких алгоритмів скремблювання дозволяє забезпечити гарантований захист від прослуховування інформації, що дуже важливо для більшості користувачів транкінгового зв'язку. При цьому, на відміну від аналогових методів шифрування, якість відновленого сигналу не погіршується.
- Ефективне використання радіочастотного спектру. Застосування низькошвидкісних кодерів мови (вокодерів) в поєднанні з методами цифрової модуляції і цифрових технологій множинного доступу дозволяє в порівнянні з аналоговими системами більш ефективно використовувати смугу частот. Зокрема, стандарт TETRA встановлює значення для смуги частот каналу рівним 6,25 КГц на один канал порівняно з смугою 12,5 КГц, прийнятою в аналогових системах. Передбачається, що в майбутніх цифрових стандартах цей показник буде ще меншим.
- Завадостійка ретрансляція сигналів. В аналогових системах проміжні ретранслятори підсилюють радіосигнал, але не “очищають” його від перешкод каналу. В результаті при багаторазовій ретрансляції шуми накопичуються і якість сигналу значно погіршується. Навпаки, у цифрових ретрансляторах відбувається відновлення сигналу, у результаті чого якість зв'язку практично не залежить від розмірів зони обслуговування.
- Ефективна передача даних. При передачі даних по цифрових каналах немає необхідності в застосуванні спеціальних модемів.

На даний момент випускається цілий ряд цифрових транкінгових систем. Однак найбільші перспективи пов'язуються із застосуванням стандарту TETRA.

Суттєво, що TETRA - відкритий стандарт. Це означає, що відповідне стандарту обладнання різних виробників абсолютно сумісне. Доступ до специфікацій TETRA вільний для всіх зацікавлених сторін, вступивши в асоціацію "Меморандум про взаєморозуміння і співдію стандарту TETRA" (MoU TETRA). Асоціація об'єднує виробників, розробників програмного забезпечення, випробувальні лабораторії та користувачів з 19 країн світу.

Призначення

З самого початку стандарт TETRA розроблявся як транкінгова система, яка ефективно і економічно підтримувала сумісне використання мережі декількома організаціями, забезпечуючи секретність і захищеність інформації. Особлива увага в стандарті була звернута на інтереси служб безпеки.

Стандарт забезпечує передачу чотирьох мовних каналів, або передачу даних з швидкістю до 28.8 Кбіт/с в смузі частот 25 КГц.

Історія розвитку

Самою першою цифровою системою транкінгового зв'язку була система EDACS (Enhanced Digital Communication System) шведської компанії Ericsson. Пізніше з'явилися системи TETRA, APCO 25, TETRAPOL (компанії Matra), iDEN (Motorola), ACCESNET-D (Rohde & Schwarz) та інші. Перші дві з них базувались на відкритих стандартах і лише в TETRA використовувався механізм часового розділення каналів (TDM). У всіх інших є частотне розділення каналів (FDM).

В грудні 1994 року за ініціативою Motorola і Nokia представники 14 найбільших виробників серед яких були Philips, Alcatel, Ericsson, GEC-Marconi підписали Меморандум про взаєморозуміння у створенні єдиного європейського стандарту транкінгового зв'язку TETRA. Через рік роботу над новим стандартом продовжила робоча група Європейського інституту

телекомунікаційних стандартів (ETSI). А ще через два роки стало очевидним, що незважаючи на наявність конкуруючих систем, стандарт TETRA все більше закріпив свої позиції, набуваючи всесвітнього значення. До квітня 1997 року аббревіатура TETRA означала Трансєвропейське транкінгове радіо (Trans-European Tranking Radio). Оскільки, велике зацікавлення проявляють до стандарту в Південній Америці, Африці, Азії, територія його дії вже не обмежується Європою. Тому, сьогодні TETRA розшифровують як Наземне транкінгове радіо (TErrestrial Tranking RADio).

Архітектура мережі

Завдяки модульному принципу побудови, архітектура системи може бути реалізована з різними ієрархічними рівнями і географічною протяжністю (від локальної до національної мережі). Функції управління базою даних і комутацією розподіляються по всій мережі. Це гарантує швидку передачу виклику і локальну дієздатність навіть при втраті зв'язку з її окремими елементами.

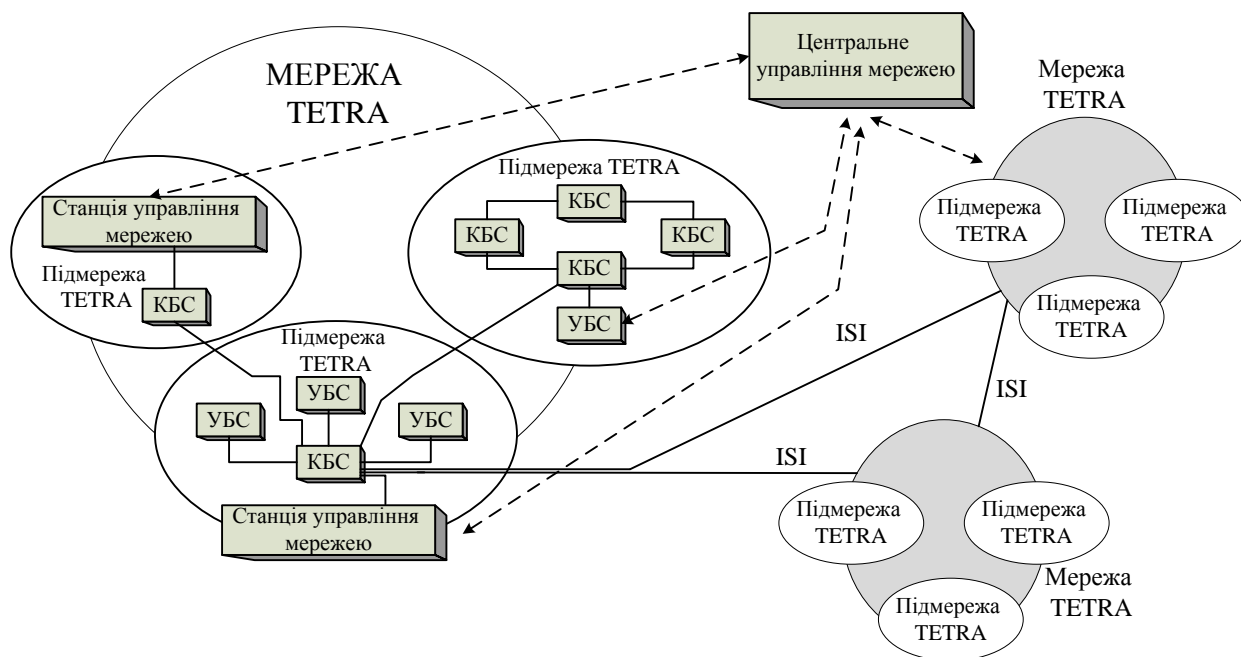


Рис.19.1 Структура мережі TETRA

На національному, або регіональному рівні структура мережі будується на

основі невеликих підмереж TETRA, з'єднаних між собою. Можливе централізоване управління всіма підмережами. Крім цього, для з'єднання мереж TETRA використовується і стандартний міжсистемний інтерфейс (ISI).

Структура підмережі залежить від трафіку та вимог до ефективності і доступності. Тому, в одних випадках вона може бути простою, а в інших, коли елементи мережі зв'язані один з одним кількома каналами зв'язку, відносно складною. Якщо резервування каналів непотрібне, оптимальною є конфігурація зірка.

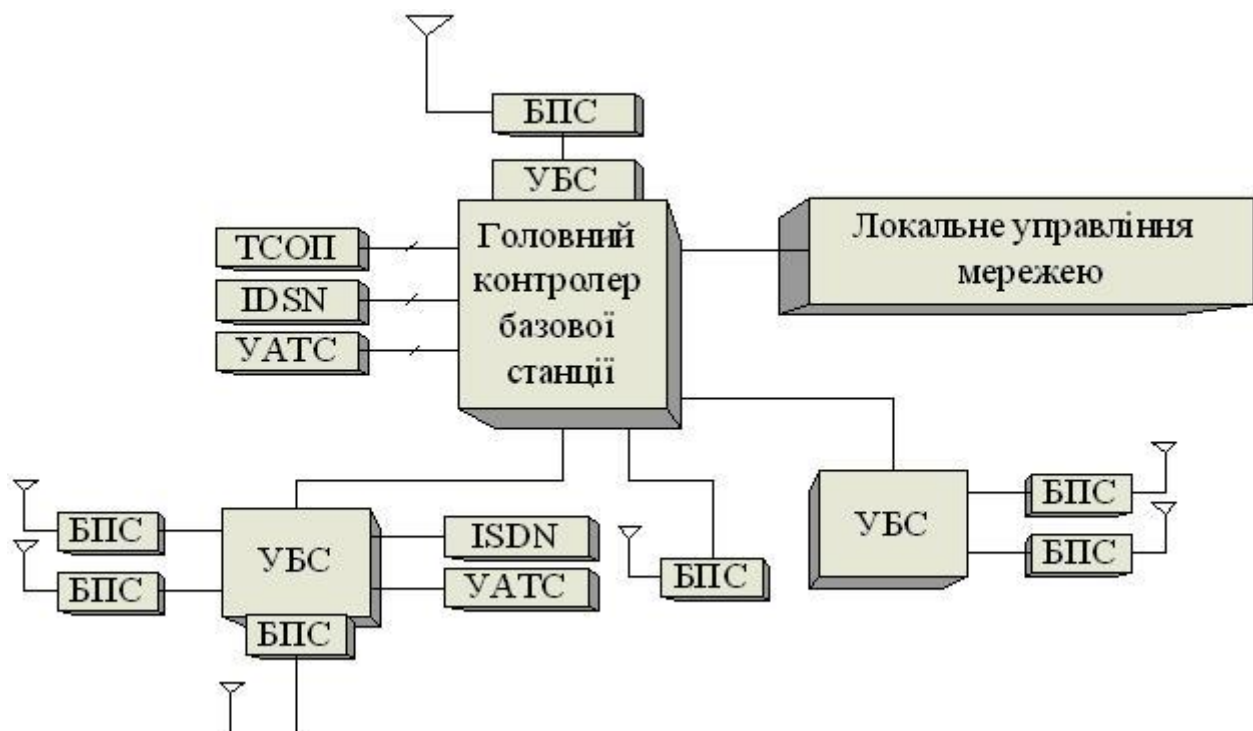


Рис.19.2 Підмережа TETRA типу “зірка”

При використанні лінійних трактів найкращим рішенням є структура кільце. В цьому випадку кожний модуль пристрою управління базовою станцією забезпечує необхідну дальність радіозв'язку та локальний доступ до зовнішніх мереж (телефонні мережі загального користування, АТС). Найпростіша конфігурація такої мережі включає лише один такий модуль.

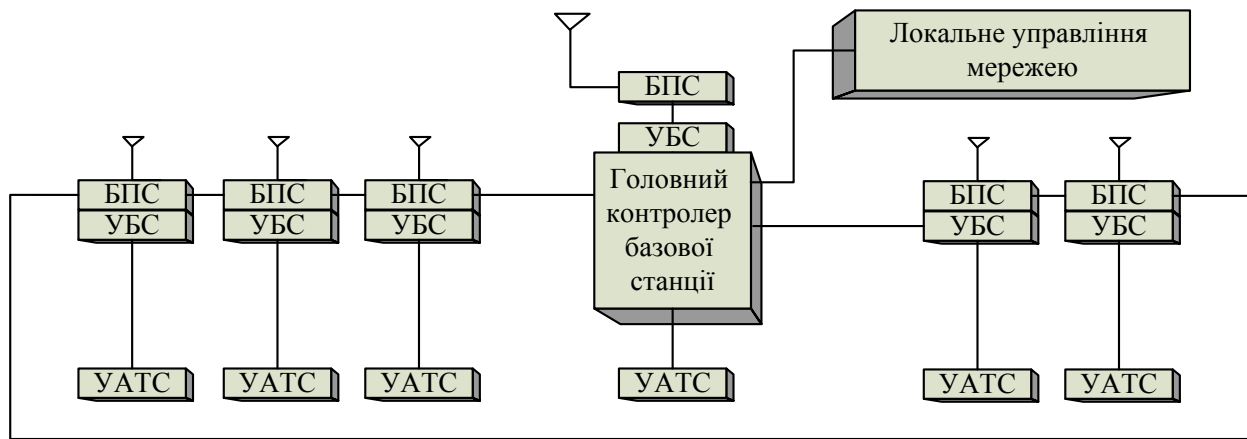


Рис.19.3 Підмережа TETRA типу “кільце”

19.2. Технічні особливості системи TETRA

TETRA представляє собою транкінгову систему зв'язку, основану на технічних рішеннях та рекомендаціях стандарту GSM.

Радіоканал та його формування

Для передачі інформації в стандарті використовується:

- частотне розділення дуплексних каналів (FDD);
- частотно-часове (FDMA/TDMA) розділення каналів

Згідно FDD розподілу різниця частот між дуплексними каналами повинна становити не менше 10 МГц. Наприклад, в якості дуплексних каналів використовуються діапазони частот:

- 380÷385/390÷395 МГц – службами безпеки;
- 410÷430/450÷470 МГц та 870÷876/915÷921 МГц – комерційними організаціями.

Аналогічно, згідно FDMA розподілу ширина смуги пропускання кожного частотного каналу становить 25 КГц. Також згідно TDMA розподілу основною часовою структурою передачі даних являється кадр (фрейм), який включає 4 часових інтервали (слоти), тобто на кожній частоті може обслуговуватись до 4 абонентів. Отже, кожен канал зв'язку між БС та АС характеризується (рис.

19.4):

- величинами пари дуплексних частот f_k, f_{ka} ;
- номером 1, 2, 3, або 4 часового інтервалу (слоту) у фреймі.

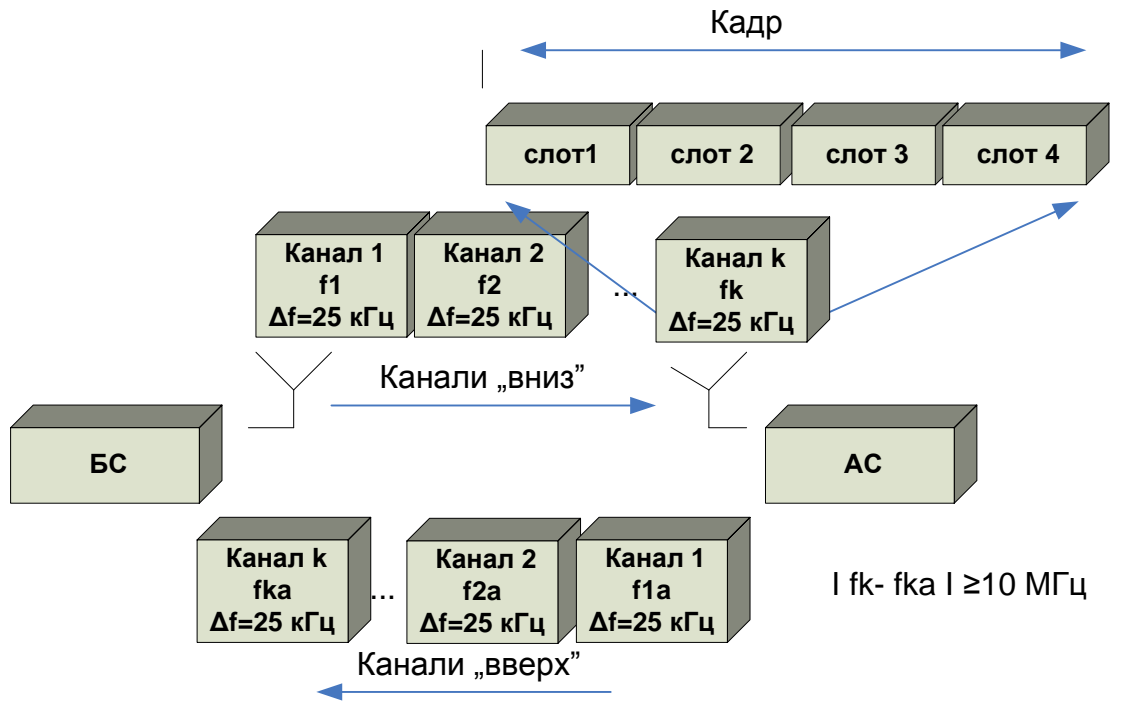


Рис.19.4 Частотне (FDD) розділення дуплексних каналів

Швидкість передачі

З однієї сторони для каналу з шириною смуги 25 КГц слід очікувати максимальної швидкості передачі даних до 12.5 КГц. З другої сторони, як видно з рис. 19.5, 216 біт передається за час 6 мс, отже швидкість передачі становить 36 Кбіт/с. Вказані протиріччя усуваються наступним чином:

- завдяки застосуванню в системі дворівневої $\pi/4$ DQPSK модуляції (в якій 1 символ передає 2 біти) швидкість модуляції може бути вдвоє меншою, тобто 18 кбіт/с;
- з метою зменшення ширини спектру модулюючий сигнал проходить через формуючий фільтр Найквіста типу “припіднятий косинус” з параметром згладжування $\alpha=0.35$ (значне звуження спектру модулюючого сигналу приводить до компактного спектру модульованого коливання –

при символній швидкості передачі інформації 18 Кбіт/с рівень високочастотного модульованого сигналу на віддалі більше чим 12.5 КГц відносно центрального значення несучої частоти, подавлений на величину не менше 60 дБ.

Отже завдяки застосуванню $\pi/4$ DQPSK модуляції та формуючого фільтра можна в смузі 25 КГц забезпечити швидкість передачі 36 Кбіт/с.

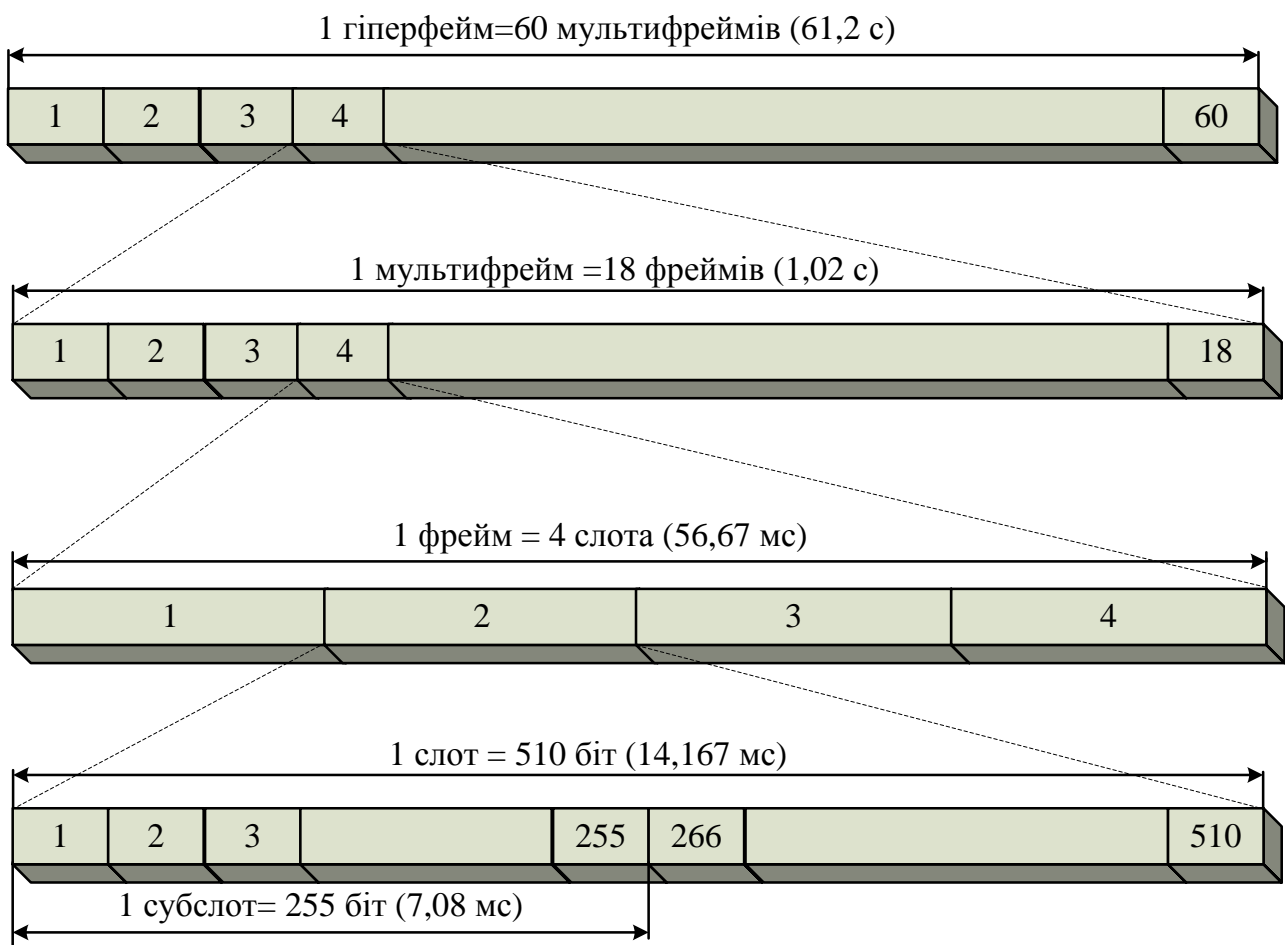


Рис.19.5 Часова структура кадру

Швидкості мовних сигналів

Стандарт TETRA передбачає перетворення аналогової мови в цифровий сигнал із швидкістю 4.8 Кбіт/с. Далі, цифровий сигнал піддається блочному і згортковому кодуванню та перемежуванню для підвищення завадостійкості передачі інформації, внаслідок чого швидкість передачі даних в каналі

підвищується до 7.2 Кбіт/с. На кожній несучій частоті може обслуговуватися до чотирьох абонентів, тому сумарна швидкість передачі інформації в каналі становить 28.8 Кбіт/с. Загальна швидкість передачі цифровій інформації в радіоканалі рівна 36 Кбіт/с за рахунок додання в інформаційний потік тестових послідовностей, синхроімпульсів, бітів управління потужністю і т.д.

Передача даних аналогічна передачі мовного сигналу. Швидкість обміну залежить від класу захисту від помилок та кількості слотів (часових інтервалів), виділених для зв'язку (таблиця 19.1). Кількість часових інтервалів задається при виклику та може змінюватись в процесі передачі.

Таблиця 19.1 Швидкість передачі даних в мережі

Рівень захисту	Швидкість передачі даних, Кбіт/с			
	1 інтервал	2 інтервал	3 інтервал	4 інтервал
Захист відсутній	7.2	14.4	21.6	28.8
Низький рівень захисту	4.8	9.6	14.4	19.2
Високий рівень захисту	2.4	4.8	7.2	9.6

Основні режими роботи

Система підтримує передачу мови і даних. Мова і дані можуть передаватися з одного терміналу одночасно.

Мова передається в 3 режимах:

- двоточкове з'єднання з комутацією між стаціонарними терміналами і мобільними абонентами; виклики можуть бути передані в телефонну мережу загального користування, або в зовнішнє відділення АТС; зв'язок – дуплексний;
- комутовані багатоточкові двонаправлені з'єднання між ініціатором зв'язку та декількома абонентами; зв'язок – симплексний;
- широкомовна передача мови (симплексна) від ініціатора зв'язку до декількох абонентів.

Режими передачі даних забезпечує доступ до централізованих баз даних, передачу факсимільних повідомлень, нерухомих зображень і т.п.

Комутовані пакети даних передаються віртуальними каналами, або у вигляді датаграм. В першому випадку можливі тільки двоточкові з'єднання, а в другому – багатоточкові з'єднання і ширококомвна передача. Користувачі системи можуть підключатися до зовнішніх мереж пакетної передачі даних. Короткі повідомлення (до 2048 біт) оперативно передаються незалежно від передачі мови і даних.

Комутовані пакети даних передаються віртуальними каналами, або у вигляді датаграм. В першому випадку можливі тільки двоточкові з'єднання, а в другому – багатоточкові з'єднання і ширококомвна передача. Користувачі системи можуть підключатися до зовнішніх мереж пакетної передачі даних. Короткі повідомлення (до 2048 біт) оперативно передаються незалежно від передачі мови і даних.

Канали передачі даних виділяються трьома способами

1. Канал присвоюється на спочатку сеансу зв'язку і звільняється після його завершенні. Зазвичай даний сценарій використовується для дуплексного зв'язку, або при резервуванні каналу у випадку його неперервної експлуатації певною групою користувачів (наприклад, режим відкритого каналу). Його недолік полягає в тому, що канал неможливо задіяти при динамічному розподілі ресурсів (система малоефективна з точки зору управління радіоресурсами).
2. Канал присвоюється тільки на час однієї транзакції (інтервал передача/прийом), після чого він звільняється. Для наступної транзакції з тим самим викликом може бути виділений новий канал. Цей метод ефективний при групових викликах, коли для різних викликів спільно використовується вся сукупність каналів.

3. В режимі квазіпередачі даних канал звільняється з деякою затримкою. Якщо наступна транзакція починається під час затримки, вона активує той самий канал, що і попередня. Перевага методу – в зменшенні необхідних керуючих сигналів в мережі.

В режимі з відкритим каналом група користувачів організує з'єднання за схемою “точка-багатоточка” без процедур встановлення та без затримки. Приєднавшись до групи, можна скористатись цим каналом в будь-який момент. Зв'язок – двочастотний і симплексний.

При безпосередній передачі між терміналами встановлюються дво- і багатоточкові з'єднання по радіоканалам, не пов'язаних з каналом управління мережею, без передачі сигналів через базові прийомопередаючі станції. Радіостанції працюють в симплексному режимі на одній частоті. В цьому режимі окремі мобільні станції можуть виконувати функцію ретрансляції (повторювача) для збільшення зони дії інших станцій, а також працювати шлюзом між мобільною станцією, яка працює в режимі безпосередньої передачі даних і мережею TETRA.

Користувачі мережі реєструються відповідно до їхньої приналежності до відповідної зони, яка обслуговується декількома базовими прийомопередаючими станціями. В межах даної зони абоненти можуть вільно пересуватися і встановлювати зв'язок один з одним. Розміри зони обслуговування конкретного користувача визначаються його вимогами і привілеями. Різні зони пропонують однакові послуги, які можуть підтримуватись всіма радіотерміналами. Кожний користувач має особистий “профіль” – список доступних послуг, які зберігаються в його терміналі та мережі.

Якщо в процесі з'єднання мобільна станція реєструє погіршення зв'язку, вона перевіряє можливість встановлення зв'язку в сусідніх комірках (повторний вибір комірки) і посилає в мережу запит про надання нового радіоканалу (якщо виклик не втрачений). Для повторного вибору комірки

передбачено три типи процедур. Процедуру першого типу можна порівняти з переключенням в мережі коміркового зв'язку, наприклад GSM. В цьому випадку мобільна станція повинна володіти інформацією про нову комірку та про розподіл її каналів (при необхідності попередньо запит для реєстрації передається в колишній комірці). При процедурі другого типу мобільна станція володіє інформацією про нову комірку, але не володіє інформацією про розподіл каналів. При процедурі третього типу мобільна станція нічого не знає про нову комірку, але вона передає попередній комірці повідомлення про зміну комірки.

19.3. Опис системної моделі

Модель стандарту TETRA (рис. 19.6) побудована на основі моделі відкритих мереж зв'язку OSI-7. Стандарт TETRA визначає 3 рівні (1, 2, 3-й), відповідні трьом нижнім рівням моделі OSI-7 (фізичному, каналному, мережевому). Всі сигнали управління, позначені як C-plane, надходять на рівень 3 (мережевий); дані користувача для передачі, позначені як U-plane, надходять на рівень 2 (каналний).

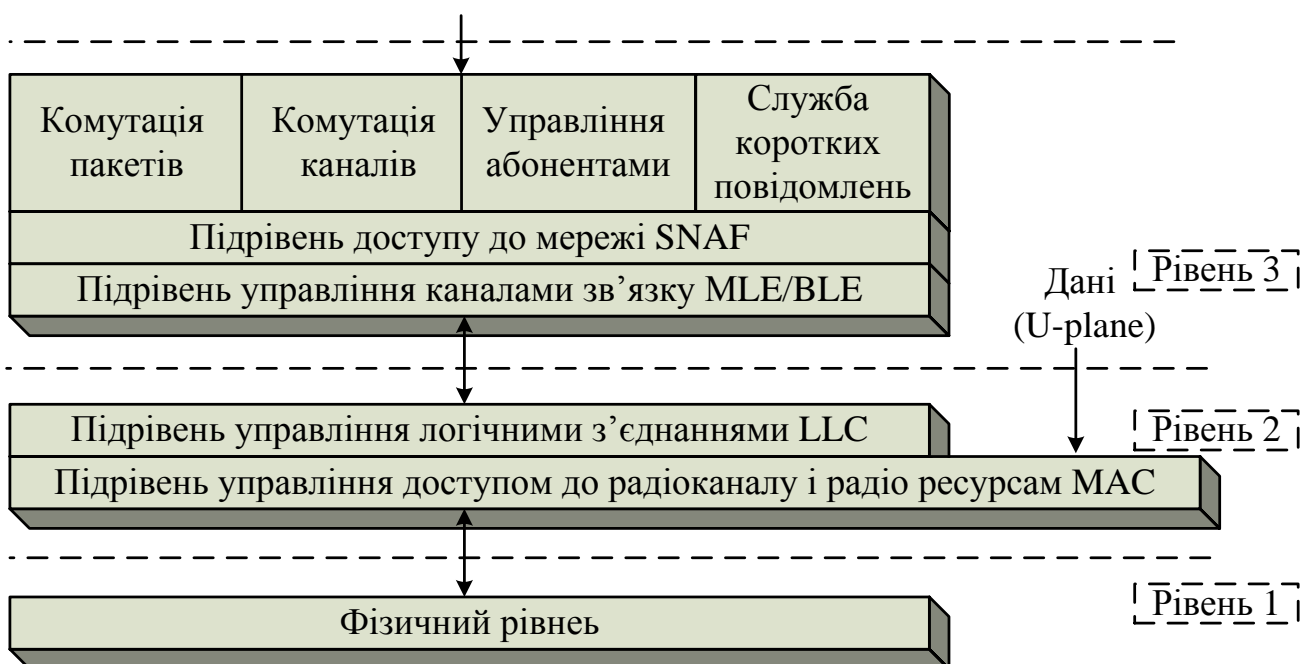


Рис.19.6 Системна модель стандарту TETRA

Перший рівень радіоінтерфейсу TETRA повністю відповідає фізичному рівню моделі OSI-7. На першому рівні відбувається передача-прийом пакетів даних, які складаються із бітів і символів (у кожному символі 2 біти); при цьому виконуються функції, серед яких основними є наступні:

- модуляція-демодуляція;
- перемикання режиму прийом-передача;
- встановлення частоти робочого каналу (несучої частоти передавача/частоти першого гетеродина приймача).

Другий рівень радіоінтерфейсу TETRA відповідає канальному рівню моделі OSI-7 і призначений для підтримки логічного з'єднання двох радіостанцій, а також для передачі інформації від мережевого рівня на фізичний і від фізичного на мережевий. Як і в моделі OSI-7, другий рівень радіоінтерфейсу TETRA складається з двох підрівнів: MAC і LLC. Підрівень MAC здійснює керування доступом до радіоканалу і керування радіоапаратурою фізичного рівня; при цьому виконуються наступні основні функції:

- перемежування бітів в межах блоку, який передається з метою усунення групових помилок, що виникають при поширенні сигналу через ефір;
- згорткове кодування із швидкістю 2/3: передача двох інформаційних бітів за допомогою трьох бітів з метою усунення локальних помилок;
- підрахунок контрольної суми з метою визначення наявності помилок в прийнятому пакеті.

Підрівень LLC підтримує логічне з'єднання в конфігурації підмережі “точка-точка” між базовою і мобільною станціями і використовується тільки для формування і передачі керуючої інформації. Підрівень LLC забезпечує виконання наступних основних функцій:

- обмін даними керування з підрівнем MLE третього рівня;

- вибір типу логічного каналу;
- планування передачі даних;

Третій рівень радіоінтерфейсу TETRA відповідає мережевому рівню моделі OSI-7 і призначений для підтримки мережевих процедур.

Підрівень керування каналами зв'язку між мобільними і базовими станціями MLE/BLE (Mobile/Base Link Control Entity) забезпечує виконання наступних основних функцій:

- визначення протоколу;
- керування з'єднанням в групі базових і мобільних станцій;
- керування алгоритмами ідентифікації і аутентифікації;
- встановлення параметра якості обслуговування (GOS);

Апаратурна реалізація функцій канального і фізичного рівнів в радіоканалі стандарту TETRA показана на рис. 19.7. Сигнали керування, що надходять на канальний рівень від мережевого рівня, і дані для передачі, які безпосередньо надходять на канальний рівень, об'єднуються в логічні канали. Логічним каналом називається впорядкована послідовність даних, призначена для передачі через радіоканал. Всього в стандарті передбачено 9 різних типів логічних каналів.

На канальному рівні здійснюється об'єднання логічних каналів в єдиний потік, що передається на фізичний рівень. Далі, дані шифруються, об'єднуються в пакети, передаються на модулятор і підсилювач потужності передавача. У приймачі послідовність дій є зворотна: виділення прийнятого радіосигналу із загального спектру, демодуляція високочастотного сигналу, декомпозиція прийнятого пакету, дешифрування, розділення на логічні канали, передача керуючої інформації і даних на третій (мережевий) рівень.

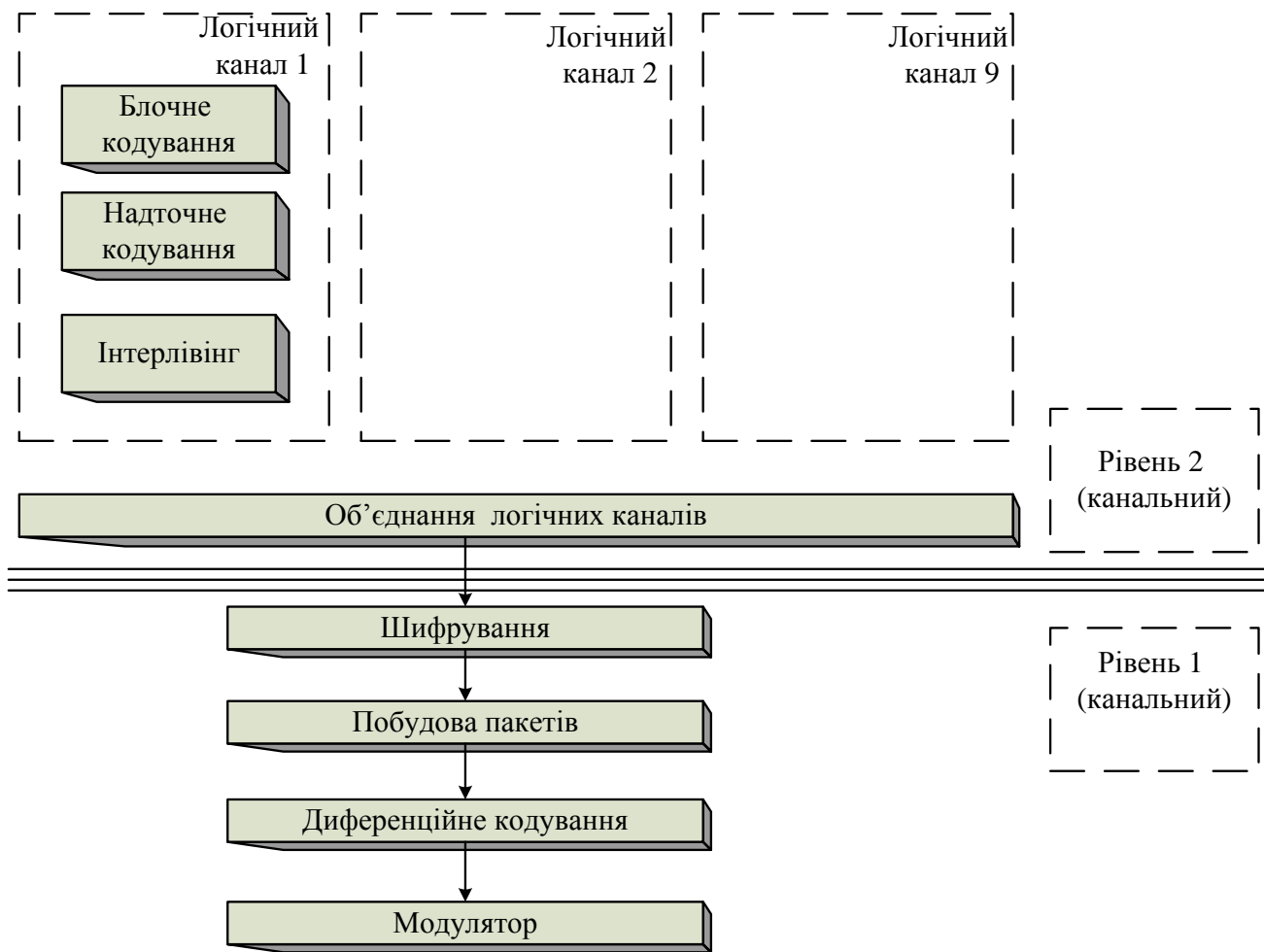


Рис.19.7 Радіоканал стандарту TETRA

Організація фізичних каналів

Як вже згадувалось вище, основою часової структури передачі даних являється фрейм з 4 слотів (рис. 19.5), причому інформація кожного абонента передається в назначеному йому слоті.

Об'єднання фреймів в мультифрейми та гіперфрейми зумовлено вимогами щодо кодування та шифрування. Базова одиниця передачі інформації, слот, включає 511 біт інформації і має тривалість $85/6 = 14,17$ мс. Слоти нумеруються послідовно і циклічно від 1 до 4. Тривалість фрейму $14,17 \cdot 4 = 56,67$ мс, фрейми нумеруються послідовно і циклічно від 1 до 18. Останній, 18-й фрейм є контрольним і призначається тільки для каналів керування. Як видно на рис. 19.5

TDMA-кадр складається із 4-ох часових пакетів довжиною 510 біт, 432 біти (два блоки довжиною 216 біт) відносяться до інформаційного

повідомлення. В вередині пакету наявна синхрорпослідовність (SYNCH) для синхронізації та навчання адаптивного канального еквалайзера приймача. Пакети в каналі “вверх” містять поле PA (Power Amplifier) для встановлення потужності випромінювання. В цьому випадку в кінці пакету розміщується захисний інтервал GP (Guard Period) тривалістю 0.167 мс для усунення можливості перекриття сусідніх пакетів.

В стандарті TETRA передбачена жорстка часова прив'язка пакетів при обміні інформацією між АС ті БС, а саме послідовність пакетів, що передаються абонентською радіостанцією, зміщена на два часові слоти відносно прийнятих пакетів. Іншими словами, якщо в каналі “вниз” для мобільної станції призначений перший часовий слот, інформація в каналі “вверх” від мобільної радіостанції до базової передаватиметься в третьому слоті (рис.19.4). Інтервал часу між прийомом і передачею інформації в два слоти дозволяє провести необхідну оперативну обробку отриманого пакету, визначити правильність його прийому і підготувати пакет даних для відповіді. Використання часового зміщення в два слоти дає можливість підвищити пропускну здатність радіоканалу, оскільки цей інтервалу часу цілком достатньо для проведення всіх необхідних операцій і немає необхідності затримувати повідомлення відповіді на 4 слоти.

Структура пакету даних

Формування пакету даних відноситься до системних функцій першого (фізичного) рівня. Пакет даних є фізичним вмістом слота. Пакет, що передається в межах слота, може містити інформацію трьох видів: службову, керуючу і трафіку. У кожному окремому пакеті можуть передаватися всі 3 види інформації, або тільки деякі з них. Тривалість пакету непостійна, вона залежить від типу даних, які передаються. Не тільки тривалість, але і початок пакету відносно початку часового слота є різними для різних типів пакетів. Всього в стандарті TETRA передбачено 8 різних типів пакетів, деякі з них вказані в табл. 19.2, їх структура показана на рис. 19.8.

Таблиця 19.2 Типи пакетів даних

Пакет	Кількість символів у слоті	Затримка відносно початку слота (кількість символів)
Пакет керування (“вверх”)	206	17
Нормальний пакет (“вверх”)	231	17
Нормальний безперервний пакет (“вниз”)	255	0

Нормальний безперервний пакет “вниз” використовується базовою радіостанцією в безперервному режимі роботи для передачі інформації трафіку і керування. Синхронізований безперервний пакет низхідного зв'язку (“вниз”) використовується базовою радіостанцією в режимі безперервної роботи для передачі синхронізованих повідомлень загального каналу та інформації керування мобільній радіостанції. Нормальний розривний пакет “вниз” використовується базовою радіостанцією в режимі часового поділу фізичних каналів для передачі трафіку, або інформації керування мобільній радіостанції. Синхронізований розривний пакет “вниз” використовується базовою радіостанцією в режимі часового поділу фізичних каналів зв'язку для передачі інформації загального каналу і інших повідомлень керування мобільній радіостанції. Пакет керування “вверх” використовується мобільними радіостанціями для передачі сигналів керування на базову радіостанцію. Пакет лінеаризації “вверх” застосовується мобільними радіостанціями для лінеаризації їх передавачів. Пакет лінеаризації “вниз” використовується тільки базовою радіостанцією для лінеаризації базового передавача. Нормальний пакет “вверх” застосовується мобільними радіостанціями для передачі інформації логічних каналів трафіку, або керування на базову радіостанцію.

У блоках 1 і 2 пакету даних (рис. 19.8) передається інформація трафіку і керування роботою мережі. Службова інформація, необхідна для підтримки

роботи радіоканалу, передається поза інформаційними блоками в наступних полях.

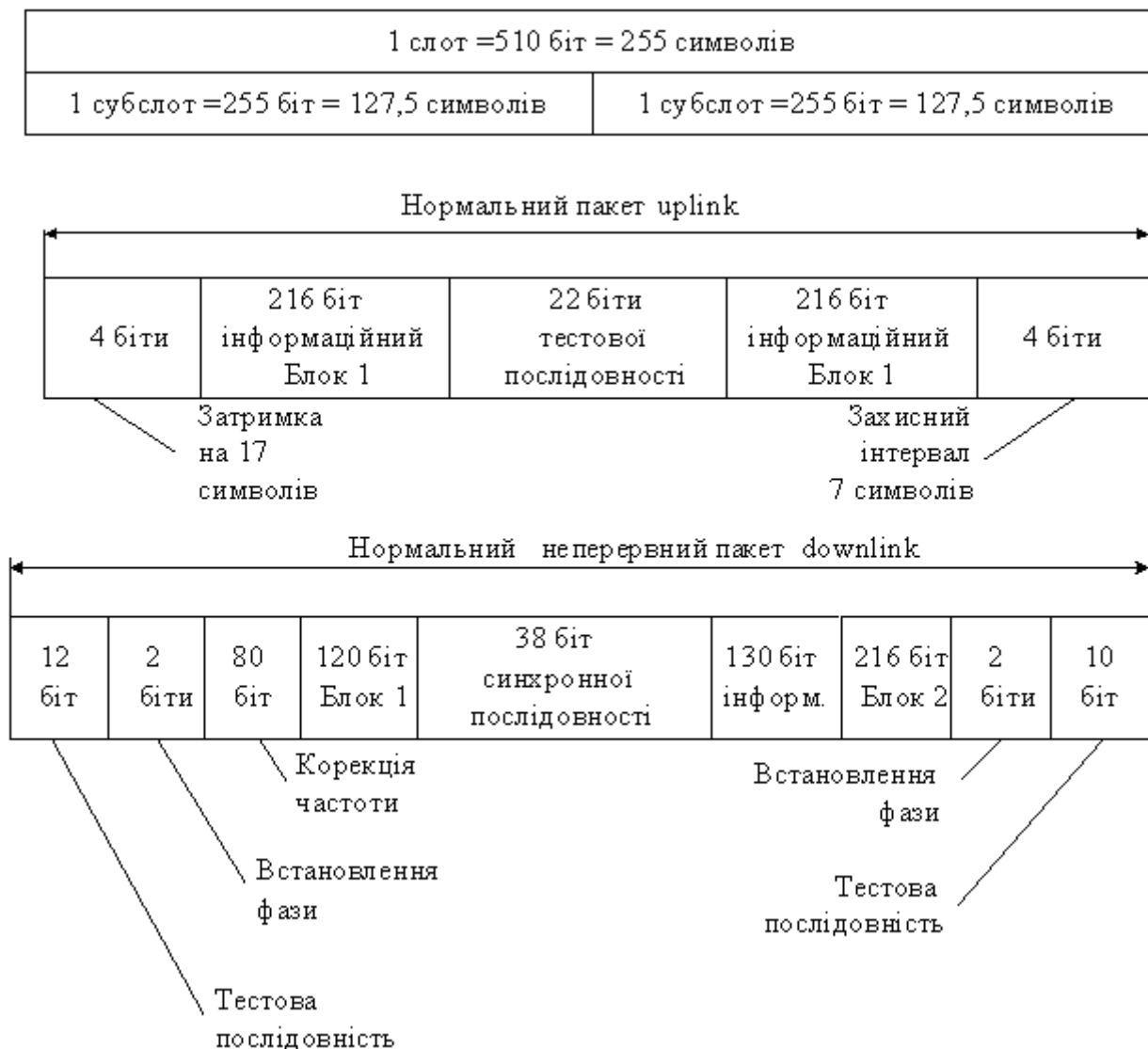


Рис.19.8 Структура пакетів даних

Аутентифікація

Аутентифікація є механізмом засвідчення достовірності абонента, обладнання, або логічного з'єднання і використовується для запобігання несанкціонованому доступу в мережу зв'язку. У стандарті TETRA передбачено декілька алгоритмів аутентифікації абонента.

Загальна процедура аутентифікації базується на періодичній передачі в тексті повідомлення спеціального коду, відомого тільки відправникові і

одержувачеві. Для виконання процедури аутентифікації абонент використовує стандартний модуль достовірності абонента (SIM-карту). У цьому модулі записаний індивідуальний ключ ідентифікації і програмне забезпечення, яке забезпечують виконання процедури аутентифікації. Базова радіостанція посилає на абонентську радіостанцію випадкове число RAND. Абонентська радіостанція виконує над цим числом стандартну криптографічну операцію з використанням індивідуального ключа ідентифікації. Результатом обробки є повідомлення RES RAND, яке відправляється на базову радіостанцію. Базова радіостанція виконує таку саму криптографічну операцію з використанням того ж самого індивідуального ключа ідентифікації абонента, який був записаний в базі даних при первинній реєстрації абонента в мережі. Порівнюючи отриманого від абонента значення RES RAND та самостійно розрахованого, базова радіостанція встановлює достовірність абонента.

Зберігання на базовій радіостанції індивідуальних ідентифікаторів всіх абонентів є істотним недоліком з погляду захисту процедури аутентифікації. Внаслідок цього в стандарті передбачена процедура аутентифікації з використанням сеансових ключів. Ця процедура відрізняється від описаної вище тим, що додатково (крім ключа аутентифікації абонента) використовуються сеансові ключі індивідуальної аутентифікації, котрі тимчасово призначаються базовою радіостанцією в даному сеансі зв'язку, тому обчислення відгуку в мобільній і базовій радіостанціях відбувається відразу на основі двох ключів. Приблизно таким же способом проводиться і аутентифікація обладнання, яке використовується.

Остаточне рішення про надання каналу зв'язку встановлюється базовою радіостанцією після виконання процедур аутентифікації користувача і обладнання, а також після порівняння ідентифікаторів користувача і обладнання з “чорним”, “сірим” і “білим” списками. Канал зв'язку встановлюється, якщо коди користувача і обладнання знаходяться в “білому” списку. Якщо один з кодів знаходиться в “чорному” списку (номер обладнання визначається як вкрадений, абонент не сплатив рахунку, або має двійника і т.

д.), канал зв'язку не надається. При знаходженні одного з кодів в “сірому” списку канал зв'язку, як правило, встановлюється, але абонентові може бути повідомлено, що у нього є певні проблеми.

20. Connect 2000

CONNECT-2000 – пристрій управління і комутації, який дозволяє на базі радіотелефонів “SENAO” створювати дуплексну транкінгову радіотелефонну систему.

В системі застосовуються потужні прийомопередавачі SN-568 з платою автоматики фірми “RCS”. До контролера максимально підключаються 64 двопровідні лінії від АТС. При цьому кожна трубка може мати міський номер, або викликатись тональним донабором, якщо кількість телефонних ліній обмежена.

Контролер одночасно підтримує протоколи зв'язку з трубками SN-258, SN-358, SN-868(R), STAR-2000(2001) і забезпечує дуплексний зв'язок радіоабонентів між собою, або з абонентом АТС.

Система є відкритою, нарощується модульно:

- телефонних ліній від 1 до 64 (4x16);
- радіопортів від 1 до 8;
- радіоабонентів від 1 до 256.

Технічні характеристики

Параметри радіоканалу визначаються моделями радіотелефонів, які використовуються в якості прийомопередавачів:

- телефони, які підтримуються: Senao SN-258, SN-358, SN-568, SN-868, STAR-2000;
- частотний діапазон: 267/392 МГц, 264/390 МГц, 254/380 МГц;
- кількість зовнішніх телефонних ліній: до 64;
- кількість радіотелефонів: до 256;
- кількість блоків прийомопередавачів: до 8;
- максимальний рівень вихідного сигналу: не менше +2 dBm;
- коефіцієнт гармонік: не гірше 1.2%.

Параметри імпульсного набору:

- період імпульсів: 100 +/-5 мс;
- тривалість розриву/замикання шлейфу: 40/60 мс +/-5%;
- нормований розрив шлейфу: 800 +/-40 мс;
- інтервал між серіями імпульсів: 400...1000 мс;
- програмована пауза в наборі 2000 мс +/-100 мс.

Параметри тонального набору:

- тривалість послідовності DTMF: 50+2 мс;
 - тривалість паузи: 50+2 мс;
 - рівень сигналу групи ВЧ: -4 +/-2 dBm;
 - рівень сигналу групи НЧ: -6 +/-2 dBm;
 - різниця рівнів ВЧ-НЧ: 2 dBm;
 - девіація частоти, не більше: +/- 1.5%.
-
- живлення: ~170-264 В, не більше 50 Вт;
 - габаритні розміри: 385 x 360 x 95 мм;
 - вага: від 5.3 до 7.3 кг;
 - вимоги по електробезпеці: відповідно до норм ІЕС.

Особливості:

- Можливе використання сертифікованих моделей радіотелефонів спільно з CONNECT-2000.
- В корпусі передбачені місця для встановлення 16 контролерів телефонних ліній і 8 контролерів радіопортів для нарощування комутаційної потужності системи, при цьому ємність системи складає 64 телефонних ліній і 8 радіоканалів. Також передбачені місця для встановлення контролера голосових банків і журналу подій.

- Додаткові контролери постачаються окремо у вигляді завершених модулів, які легко підключаються до системи

Функціональні можливості:

- можливість управління з комп'ютера через порт RS-232 (COM-порт);
- можливість віддаленого управління контролером з комп'ютера за допомогою модему;
- до 64 міських телефонних ліній (4 x 16);
- до 8 радіопортів;
- підтримка до 256 радіоабонентів;
- виклик конкретного радіоабонента безпосередньо, або за допомогою тонового донабору;
- розвинута система голосових повідомлень про некоректні дії і сервісні послуги;
- тарифікація – врахування вартості телефонних розмов;
- автоматичний дистанційний контроль і діагностика;
- апаратура не потребує обслуговування і вимагає мінімальних затрат на монтаж та експлуатацію;
- програмування умов роботи кожного радіоабонента:
 - пріоритет зв'язку;
 - спосіб роботи з міськими і внутрішніми лініями;
 - заборона вихідного міжміського зв'язку;
 - обмеження тривалості розмов;
 - можливість роботи автовідповідача;
 - автодозвін;
 - набір останнього номера;
- світлодіодна індикація режимів роботи і несправностей;
- автоматичний контроль температури;
- створення бази даних клієнтів та налаштуванням наступних параметрів:

- прив'язка до виділеної міської телефонної лінії з індивідуальним номером;
- вихід на міську телефонну лінію в загальному порядку з набором префіксу для виходу на внутрішню телефонну лінію;
- вихід на внутрішню телефонну лінію з набором префіксу для виходу на міську телефонну лінію (максимально спрощує внутрішні з'єднання типу трубка-трубка) ;
- префікс для всіх абонентів однаковий і задається під час встановлення, або оператором під час обслуговування;
- залежно від прив'язки номеру лінії, на яку надійшов виклик, переключення виклику абоненту, або тональний набір внутрішнього номеру абонента;
- контролер надає наступні сервісні функції:
 - гнучке підключення та відключення клієнтів;
 - ідентифікація трубки клієнта і автоматичне занесення її атрибутів в базу даних, або занесення цих даних вручну;
 - налаштування атрибутів клієнта згідно пріоритетів, вимог і умов експлуатації;
 - пріоритет виходу на зв'язок (при завантаженні робочих каналів, клієнти з нижчим пріоритетом відключаються, або з рівним пріоритетом, коли мінімальний ліміт часу вичерпаний);
 - прив'язка до телефонної лінії;
 - визначення пріоритету внутрішня/міська лінія;
 - можливість роботи автовідповідача;
 - тарифікація телефонних розмов;
- енергонезалежний годинник-календар;
- цифрова комутація і передача звуку;
- визначення номера телефонуючого абонента і занесення його в базу даних;
- автодозвін;

- повтор останнього набраного номеру для кожного клієнта;
- ведення бази даних ідентифікаторів і робочих каналів кожного радіопорта;
- ведення постійного обліку наявних в системі радіопортів і у випадку зміни статусу вільний-зайнятий, або навпаки будь-якого радіопорту, оповіщати кожен з радіопортів про зміну діапазону сканування робочих каналів;
- висока надійність (резервування і дублювання даних).

Комплект

У склад комплекту апаратури “CONNECT 2000” в мінімальній конфігурації входять контролер чотирьох телефонних ліній і два контролера радіопортів, встановлених в один корпус, інтерфейсна трубка з індикатором і клавіатурою для управління, налаштування і контролю системи, а також дві плати автоматики для встановлення в прийомопередавачі SN-568 або SN-868.

Додаткове обладнання:

- контролер чотирьох телефонних ліній;
- контролер радіопортів;
- плати автоматики для встановлення в прийомопередавачі SN-568, або SN-868;
- прийомопередавачі – радіотелефони Senao SN-568, SN-868, та їх модифікації;
- абонентські трубки радіотелефонів Senao SN-258, SN-358, SN-868, STAR-2000, Рауд та їх модифікації (згідно встановлених прийомопередавачів);
- емулятори телефонних ліній RCS Line (згідно встановлених прийомопередавачів) ;
- емулятори телефонних ліній на базі TC-096;
- зовнішні направлені антени;

- зовнішні кругові антени;
- автомобільна антена;
- антенний кабель.

Контролер телефонного зв'язку "CONNECT 2000" призначений для забезпечення мобільного зв'язку в місцях, де встановлення сотових систем внаслідок певних причин є неефективним, або неможливим, а також для організації системи таксофонів на базі вищезгаданих мобільних абонентських станцій. Може застосовуватись на великих підприємствах. В обласних центрах, містах для створення оперативного радіозв'язку, максимально наближеного до роботи із звичайною міською лінією в зоні радіусом 12 – 100 км.

21. ЦИФРОВА БЕЗПРОВІДНА ТЕЛЕФОНІЯ DECT

21.1. Загальні зауваження

Призначення

На даний час існує кілька технологій безпроводного зв'язку, які вирішують певну низку завдань. Для здійснення розмов людина використовує телефон безпосередньо підключений до телефонної мережі загального користування (ТМЗК), що накладає певні обмеження у пересуванні. Тому виникла потреба забезпечення безпроводної телефонії.

Дослідження та розробки привели до появи кількох окремих стандартів безпроводного зв'язку. DECT (Digital European Cordless Telecommunications), стандартизацію якого було покладено на Європейський інститут стандартизації в телекомунікаціях (ETSI), представляє собою набір окремих стандартів, що визначають радіоінтерфейси для роботи з різними мережами та обладнанням.

DECT є орієнтованим на телефонію – радіоподовжувачі з підключенням до місцевої ТМЗК. Крім цього, обладнання стандарту DECT розвивається в напрямку надання послуг передачі даних зі швидкістю до 72 Кбіт/с та мультимедійних послуг.

Стандартом передбачується можливість обслуговування абонентів з сумарним навантаженням 10000 Ерл/кв. км., що дозволяє обслуговувати велику кількість абонентів.

Віддаль обслуговування

Стандарт DECT був розроблений для обслуговування великих та малих територій. Завдяки використанню ретрансляторів радіус комірок обслуговування може досягати кількох кілометрів:

- пікосотові комірки - $R = 100$ м.;
- мікросотові комірки - $R = 500$ м.;
- макросотові комірки - $R = 1\div 15$ км.

DECT належить до стандартів ETSI і затверджений ITU, як стандарт який відповідає вимогам для систем 3G.

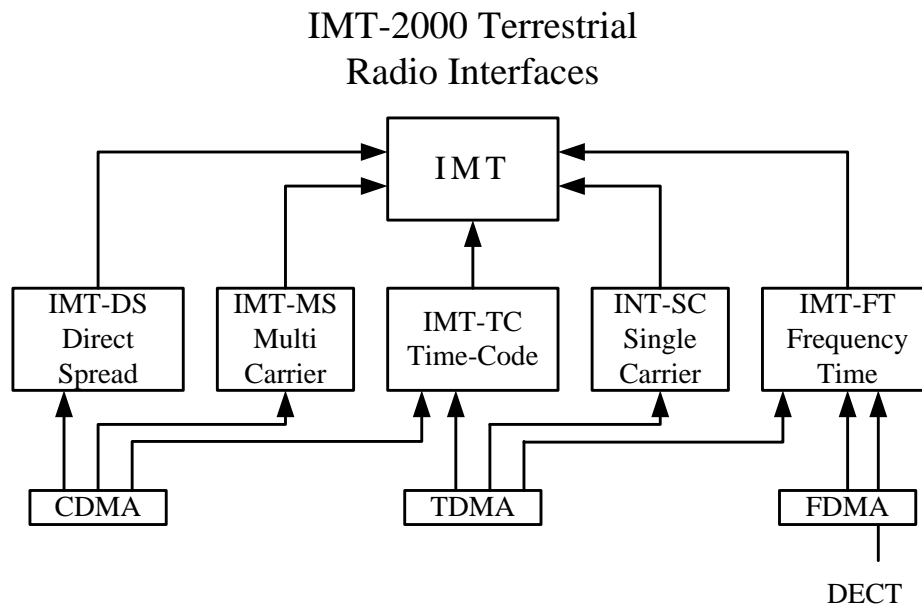


Рис.21.1 Радіоінтерфейси IMT-2000

Історія розвитку

Робота над вирішенням цього завдання почалася у Великобританії та Швеції з 1980 року. В результаті досліджень в 1990 р. було створено стандарт безпроводного зв'язку DECT, як для використання радіотелефонів так і для корпоративних цілей. Стандарт DECT крім використання в телефонії дозволяє здійснювати безпроводну передачу даних.

Як згадувалося вище, для роботи звичайних телефонів є необхідним провідне під'єднання до телефонної мережі. Його було запропоновано замінити радіоканалом. Тому почалася розробка радіоподовжувачів. Перші радіоподовжувачі були аналоговими. Вони не забезпечували хорошу якість зв'язку та захист від підслуховування. Покоління цих телефонів називають СТ-0. Наступне покоління телефонів СТ-1 також було аналоговим, проте вони мали додаткові функції, наявність яких була кроком назустріч сучасним засобам зв'язку. Стандарт СТ-2, який з'явився у Великобританії в 1987 році,

вже передбачав роботу з цифровими сигналами. Цей стандарт визначав параметри пов'язані з частотою, потужністю передавачів, спектром частот та взаємодію з телефонною мережею загального користування. Проте, він не давав точного визначення протоколу зв'язку. В результаті подальшої роботи над стандартом для множинного доступу було вирішено використовувати схему TDMA/TDD/MC (Time-Division Multiple Access/Time Division Duplex/Multi Carrier) і робочу частоту біля 2 ГГц. Новий стандарт було названо DECT.

Системи та обладнання стандарту DECT є поширеним в багатьох країнах світу.

21.2. Структура системи радіодоступу

Типова структура мережі DECT для офісу, або дому містить:

- абонентські станції - АС;
- термінальне обладнання - ТО;
- базові станції - БС.

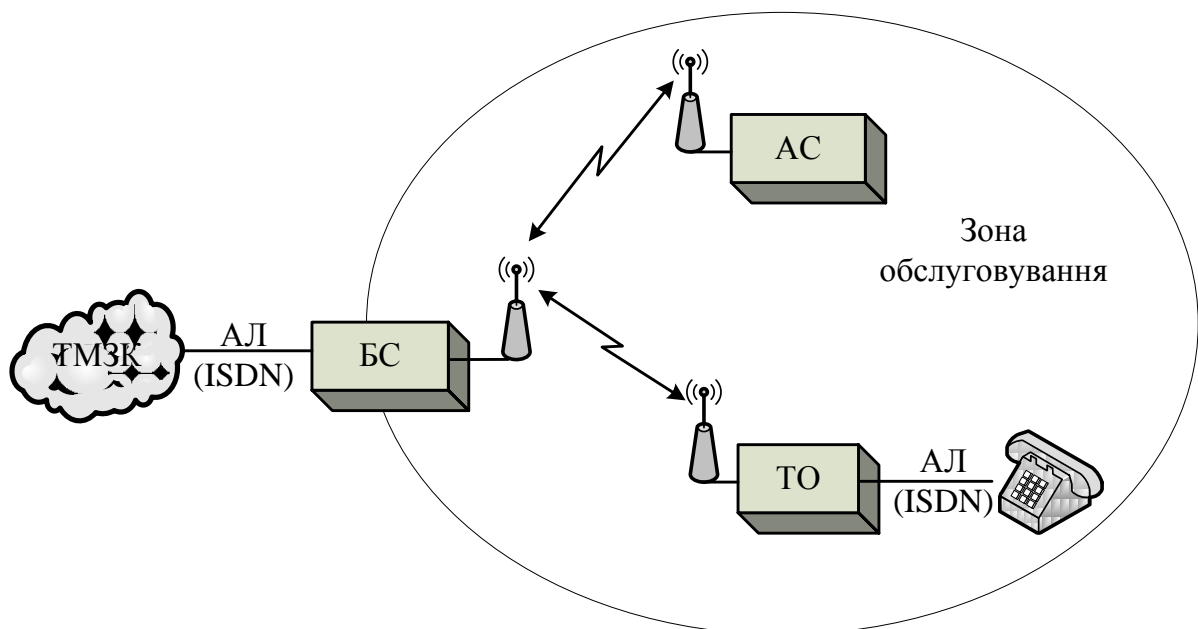


Рис.21.2 Спрощена структурна схема домашньої мережі DECT

Абонентські станції виготовляються у вигляді портативної радіотелефонної трубки з широкими можливостями. Термінальне обладнання

використовується для під'єднання обладнання користувачів: персональний комп'ютер, аналоговий телефон та ін. Базова станція представляє собою радіостанцію, яка дозволяє підключення кількох користувачів та працює через спеціальний інтерфейс з ТМЗК, або цифровими мережами, наприклад, мережею з інтеграцією послуг (ISDN).

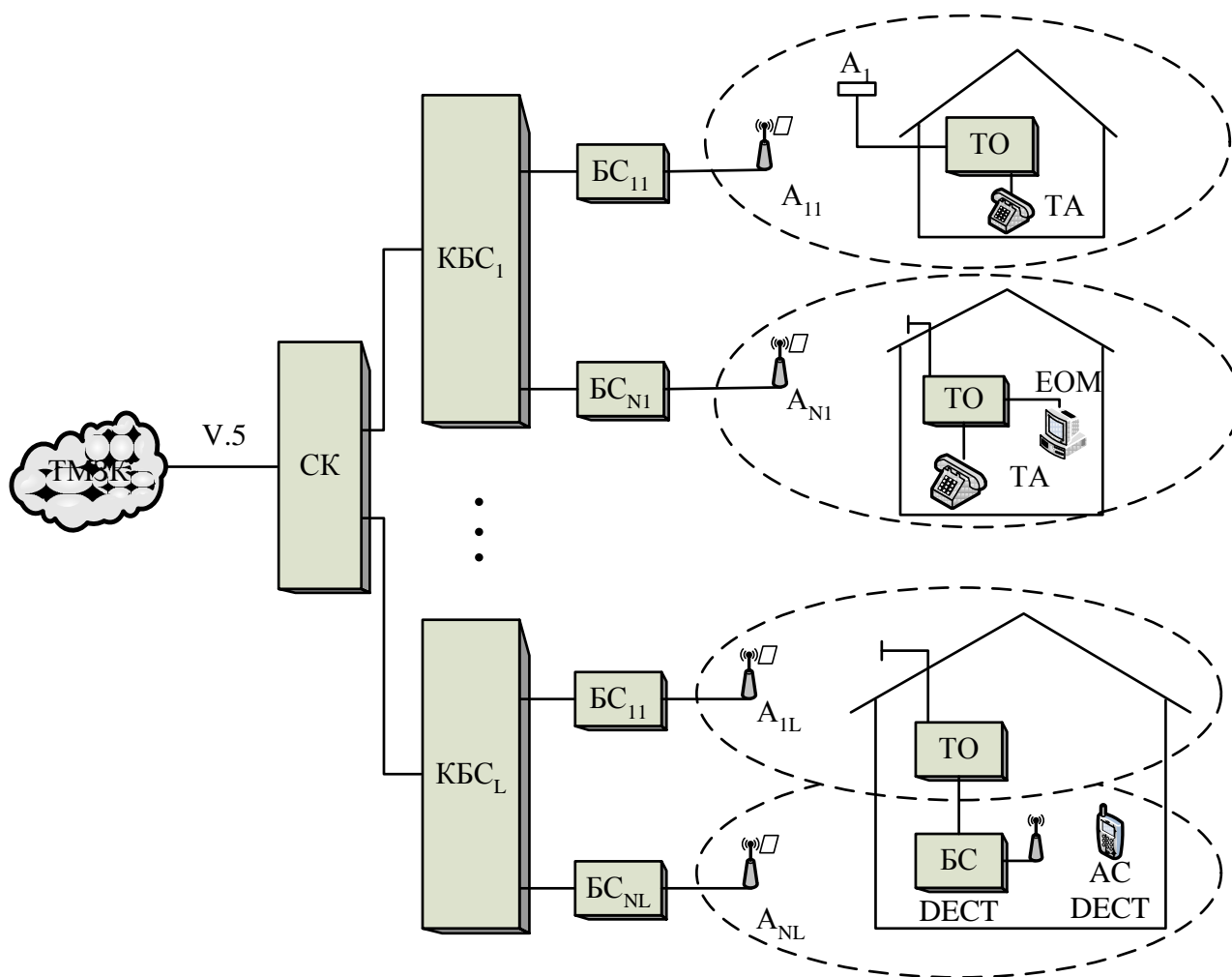


Рис.21.3 Спрощена структурна схема безпроводної АТС стандарту DECT

Таким чином, базова станція забезпечує підключення обладнання кінцевих користувачів через ТО та радіотелефонів до ТМЗК, або цифрової мережі. Надання таких послуг є ще одною перевагою стандарту DECT, оскільки крім вирішення завдання забезпечення офісу, або підприємства телефонним зв'язком з'являється можливість користуватися послугами цифрових мереж [12].

Для великих будівель чи приміщень краще підходить варіант безпроводної АТС з можливістю формування кількох зон обслуговування (рис. 21.3). Кожна БС обслуговує певну зону. Група БС підключається до контролера базових станцій (КБС), який забезпечує необхідні з'єднання та додаткові функції. Залежно від кількості зон обслуговування та БС до СК (система керування) підключається декілька КБС. Розширення зон обслуговування БС можна виконати із використанням ретрансляторів.

21.3. Фізичний рівень DECT

Основні параметри радіоінтерфейсу стандарту DECT приведені в таблиці 21.1.

Таблиця 21.1 Основні параметри радіоінтерфейсу стандарту DECT

Параметр	Значення
1. Діапазон частот, МГц	1880÷1900
2. Смуга частот каналу, МГц	1,728
3. Кількість несучих	10
4. Множинний доступ до каналів зв'язку	TDMA/FDMA
5. Тип розділення каналів зв'язку	TDD
6. Швидкість передачі мови, Кбіт/с	32
7. Пікова потужність, мВт	250
8. Середня потужність, мВт	10
9. Тип модуляції	GMSK, DBPSK DQPSK D8PSK
10. Чутливість, дБп: BER = 10 ⁻³ BER = 10 ⁻⁵	≤-83 ≤-73
11. Захисний інтервал, мкс	54
12. Кількість дуплексних каналів в системі	120

13. Швидкість передачі інформації при використанні GMSK модуляції, Кбіт/с: R = 300 м R = 3 км R = 30 км	516,8 508 436
14. Звуковий кодек	G.726
15. Надання каналів	динамічне

Розглянемо детальніше приведені параметри.

Діапазон та смуга частот, кількість каналів, доступ FDMA

Для забезпечення роботи пристроїв стандарту DECT в Європі виділено смугу частот 1880÷1900 МГц.

В стандарті використовується 10 радіоканалів (рис. 21.4) з шириною смуги частот 1,728 МГц та центральними частотами, які визначаються наступним чином

$$f_n = 1897.334 - 1.728 \cdot N, \text{ МГц} \quad (21.1)$$

де $N = 0, 1, 2, \dots, 9$.

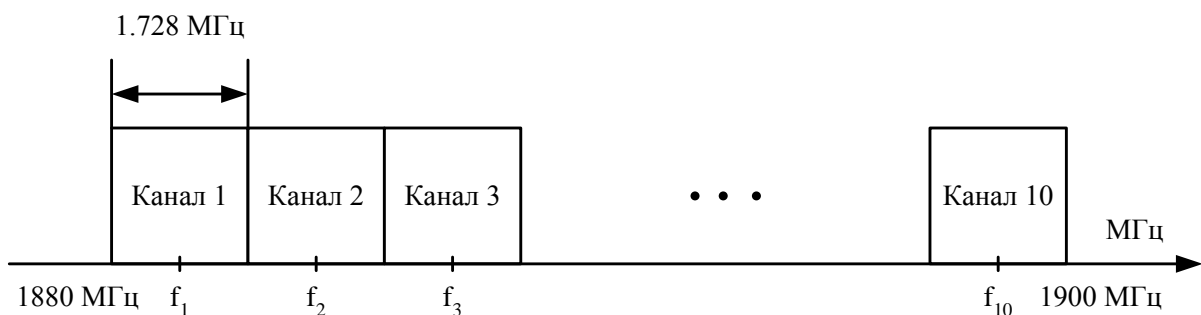


Рис.21.4 Розподіл частотних каналів

Таким чином виконане частотне (FDMA) розділення каналів.

Множинний доступ та розділення дуплексних каналів

В стандарті DECT застосовується технологія доступу з часовим розділенням каналів - TDMA (Time Division Multiple Access). Часовий спектр розділений на окремі кадри по 10 мс. Кожен кадр розбитий на 24 часові інтервали: 12 інтервалів для прийому (з погляду абонентського терміналу) і 12 - для передачі. Таким чином, на кожній з 10 несучих частот формується 12 дуплексних каналів зв'язку, загальна кількість каналів зв'язку складає 120.

Структура пакету в системі DECT представлена на рис. 21.5.

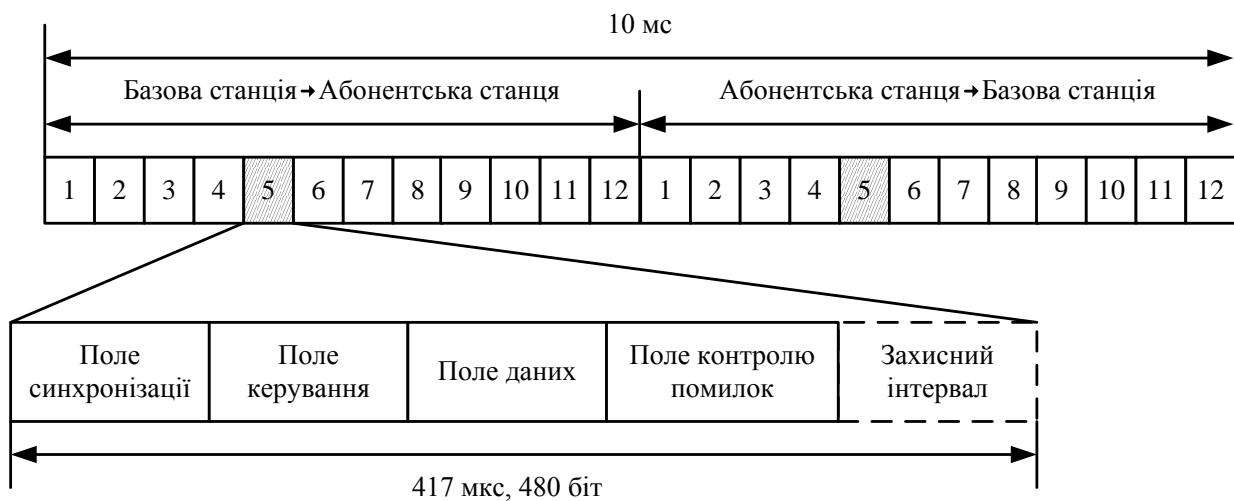


Рис.21.5 Структура пакету в системі DECT

Довжина кожного пакету 480 біт. Пакет містить таку інформацію:

- поле синхронізації 32 біти;
- поле керування 64 біти;
- поле даних 320 біт;
- поле контролю помилок 4 біти.
- в кінці кожного пакету наявний захисний інтервал довжиною 60 біт для усунення взаємного впливу пакетів між собою.

Тривалість одного пакету складає 417 мкс.

$$t_{\text{им}} = \frac{1}{n_k \cdot n_i} = \frac{1}{100 \cdot 24} \approx 417 \text{ мкс}, \quad (21.2)$$

де n_k – кількість кадрів; n_i – кількість часових інтервалів в одному кадрі.

Сумарна швидкість передачі інформації в системі DECT – 1152 Кбіт/с (тривалість одного біту $t_b = 10 \text{ мс} / 24 / 480 = 0.868 \text{ мкс}$). Швидкість передачі даних в одному каналі реалізованому в конкретному часовому інтервалі складає 32 Кбіт/с (320 біт · 100 кадрів). Мультикадр складається із 16 кадрів і триває 160 мс. Поле синхронізації містить 16-ти бітову преамбулу і 16-ти бітову синхропослідовність. Поле керування є дуже важливим, тому містить 8 бітовий заголовок, блок службових даних (40 біт) та поле для перевірки наявності помилок CRC (16 біт). Поле керування може містити різні повідомлення, пов'язані з роботою MAC-рівня:

- ідентифікаційна інформація;
- системна інформація та маркер мультикадру;
- пейджингова інформація;
- керуюча інформація MAC-рівня;
- керуюча інформація вищих рівнів.

Поле даних може кодуватися для виправлення помилок (FEC), або залишатися незахищеним. При використанні FEC-кодування дані користувача діляться на блоки 64 біт, до яких додається 16-ти бітовий CRC-блок.

Модуляця

Як видно з таблиці 21.1 ширина смуги сигналу збільшується в $N_g = 1.5$ раз ($N_g = 1.728 / 1.152 = 1.5$). Це досить добрий показник (нагадаємо, що при модуляції прямокутними імпульсами, які містять 1 і 3 гармоніки $N_g = 3$, а при модуляції “згладженими” імпульсами, близькими до гармонічного коливання,

$N_g = 1$). Для забезпечення необхідного значення $N_g = 1.5$, використовується гаусова частотна модуляція з мінімальним частотним зсувом (GMSK) з параметром гаусового фільтру згладжування $BT = 0,5$.

21.4. Принцип роботи

Вибір каналів зв'язку

Стандарт DECT передбачає безперервний динамічний вибір та надання каналів зв'язку. Приймальне обладнання вимірює потужність радіосигналу та рівень завад. Ця операція відбувається у фоновому режимі і на основі отриманих результатів формується список вільних та зайнятих каналів (список RSSI – Received Signal Strength Indication), для подальшого вибору каналу. Вміст списку RSSI містить інформацію про стан каналу зв'язку, де низьке значення потужності сигналу представляє вільні канали та відсутність завад в них.

Якщо значення є великими канал може бути зайнятим, або в ньому присутні сильні завади. За допомогою інформації RSSI, можна вибрати найбільш оптимальний (з найменшим рівнем завад) канал для встановлення з'єднання. Сканування доступних каналів відбувається мінімум один раз за 30 секунд.

Ініціатива встановлення з'єднання в мережах стандарту DECT завжди належить АС. Базова станція сканує власні канали прийому для виявлення спроби встановлення з'єднання з нею АС, та надає вільні канали за необхідності.

Хендовер

Завдяки безперервному динамічному вибору та наданню каналів зв'язку в стандарті DECT передбачене переключення між зонами обслуговування (хендовер). Якщо потужність сигналу від нової базової станції стає більшою за потужність попередньої АС розпочинає процедуру переключення.

Захист інформації

В стандарті передбачене використання ідентифікації абонентів. Оператор мережі, або постачальник послуг надає користувачеві секретний код, який використовується під час встановлення з'єднання. Щоб не передавати його радіоканалом БС передає АС випадкове число. Після прийому випадкового числа від БС, АС згідно заданого алгоритму знаходить ідентифікаційну відповідь, яку передає БС. Аналізуючи ідентифікаційну відповідь БС визначає чи має право абонент користуватися послугами мережі. Таким кодом може бути ідентифікаційний ключ користувача (UAK – User Authentication Key) довжиною 128 біт, або ідентифікаційний код АС (Authentication Code) довжиною $16 \div 32$ біти.

На даний час мережі стандарту DECT є дуже поширеними, а кількість виробників обладнання перевищує 40. Завдяки гнучкій сумісності з стандартами ISDN, GSM, DECT є потужним засобом розширення абонентської ємності відповідних мережі.

При сумісній роботі двох систем – GSM і DECT необхідний спеціальний телефон. Цей телефон може працювати як телефон GSM, де доступна система GSM. Якщо система GSM не може обслужити виклик, телефон переключається в режим DECT.

Переваги

- велика ємність системи - стандартом DECT передбачується можливість обслуговування навантаження до 10000 Ерл/км^2 ;
- масштабованість системи – забезпечується можливість створення зон обслуговування із радіусом до 15 км.;
- універсальність – можлива робота із місцевими АТС та цифровими мережами зв'язку, підтримується аналогове та цифрове обладнання користувача;
- низька потужність випромінювання;
- велика кількість виробників обладнання та поширеність мереж стандарту.

Додатки

Додаток 1. Моделювання систем безпроводного зв'язку

Д1.1. Загальні зауваження

При розгляді мереж CDMA приводились найвні в системі MATLAB моделі окремих стандартів (IS-95, cdma2000, WCDMA). Розгляд та застосування таких моделей складних мереж, серед іншого, сприяє також кращому розумінню принципів їх функціонування та використанню в учбовому процесі.

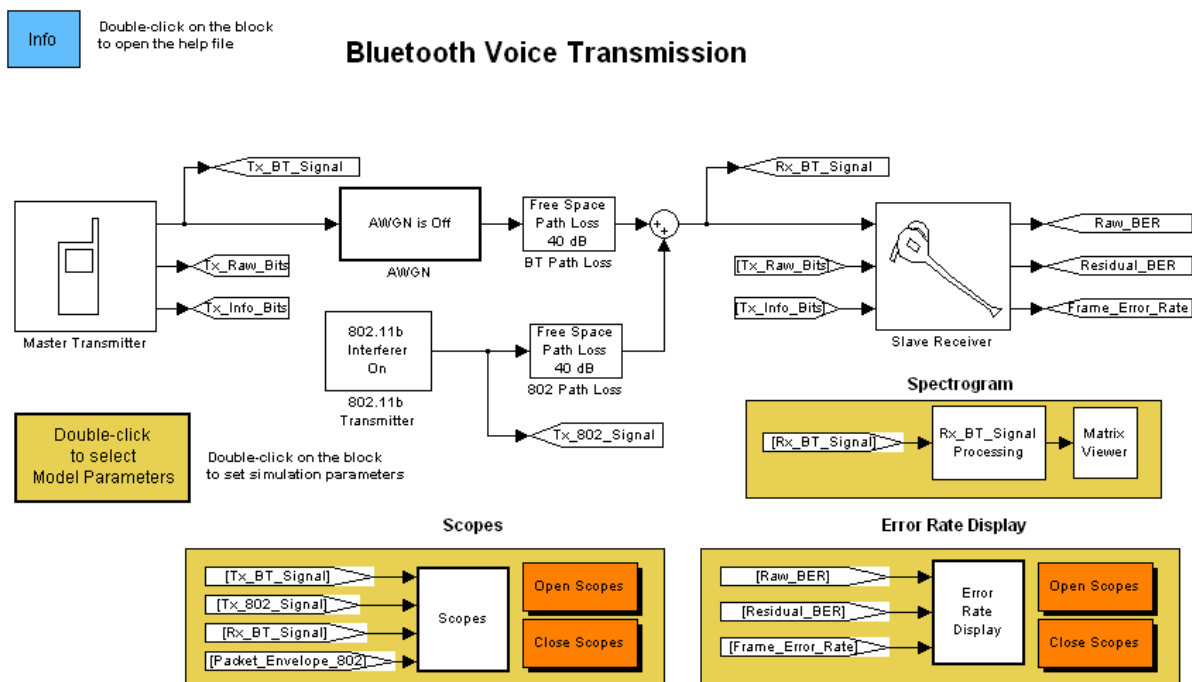
Але в системі MATLAB приведені, крім мереж CDMA, також моделі багатьох інших безпроводних мереж, які розглядалися в даній роботі, а саме:

- Bluetooth Voice Transmission
- HIPERLAN/2
- IEEE 802.11a WLAN Physical Layer

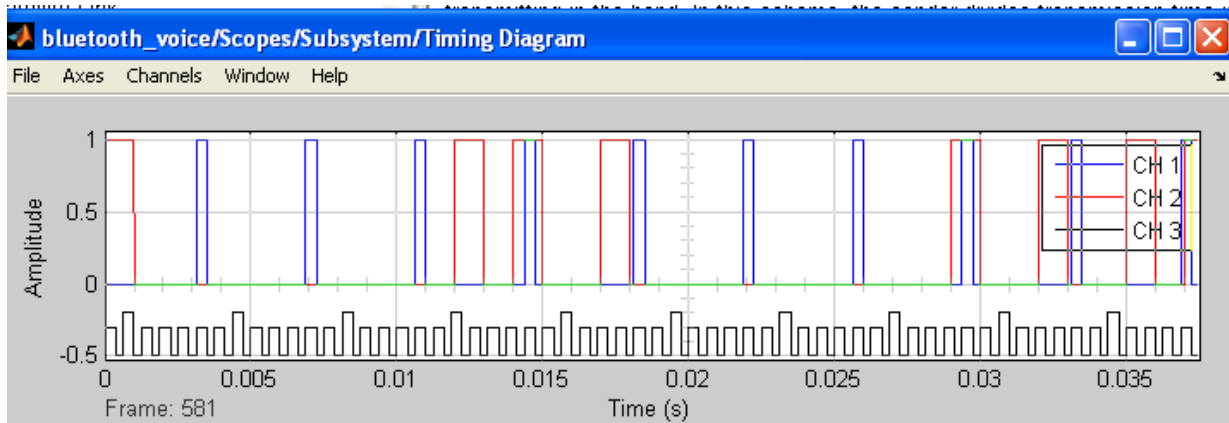
Розглянемо детальніше кожен з моделей.

Д1.2. Моделювання системи Bluetooth

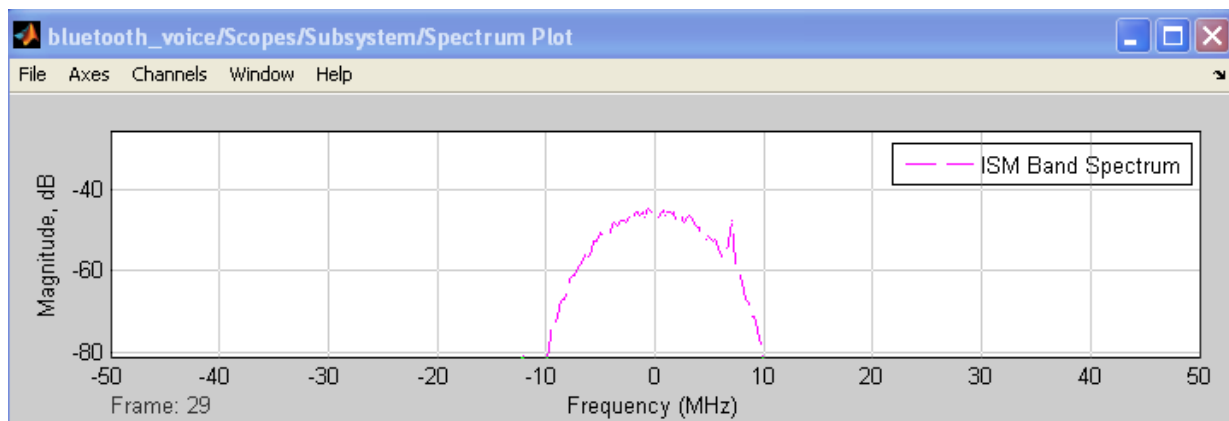
На рис. Д.1.1. приведена модель системи Bluetooth та осцилограми в окремих точках.



а)



б)



в)

Д.1.1. Модель системи Bluetooth (а) та осцилограми (б, в) в окремих точках

Д1.3. Моделювання системи HIPERLAN/2

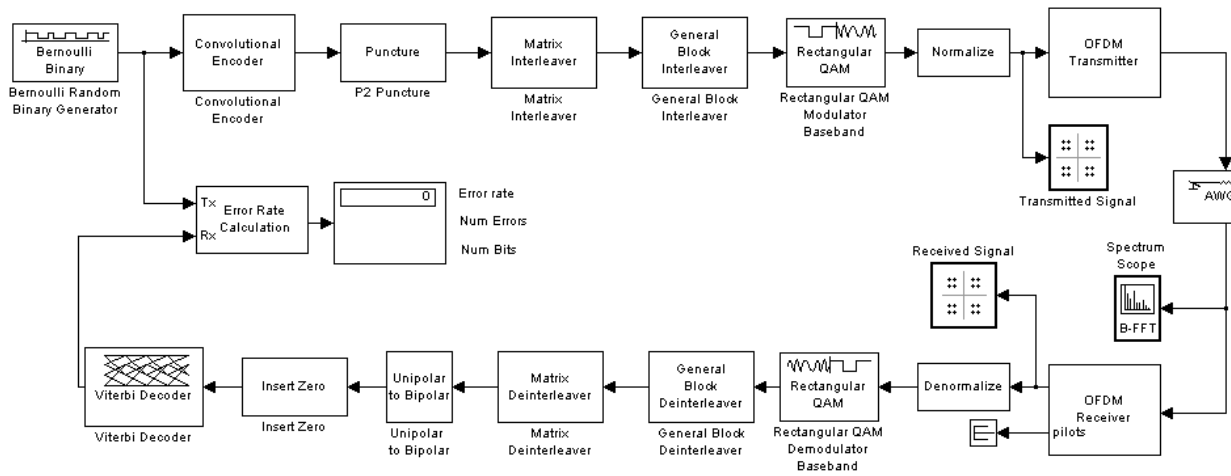
На рис. Д.1.2. приведена модель системи HIPERLAN/2 та осцилограми в окремих точках.

Double-click on the block to open the help file

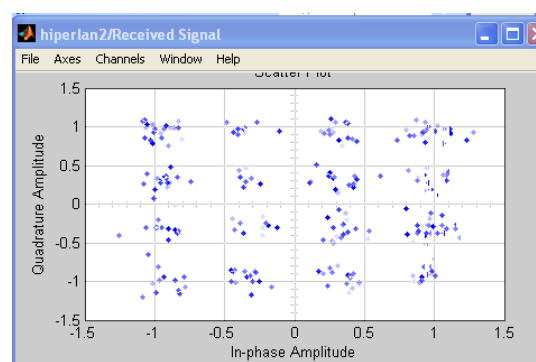
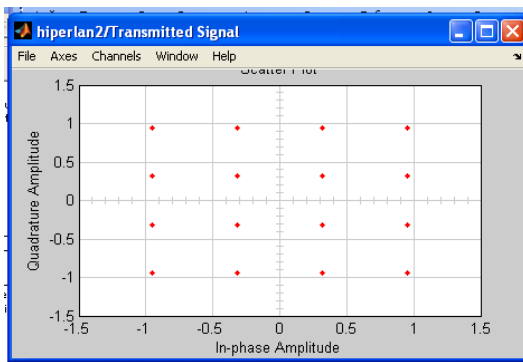
Info

HIPERLAN/2

16QAM Mode with 3/4 Code Rate (4/6 P2 Puncturing Rate)

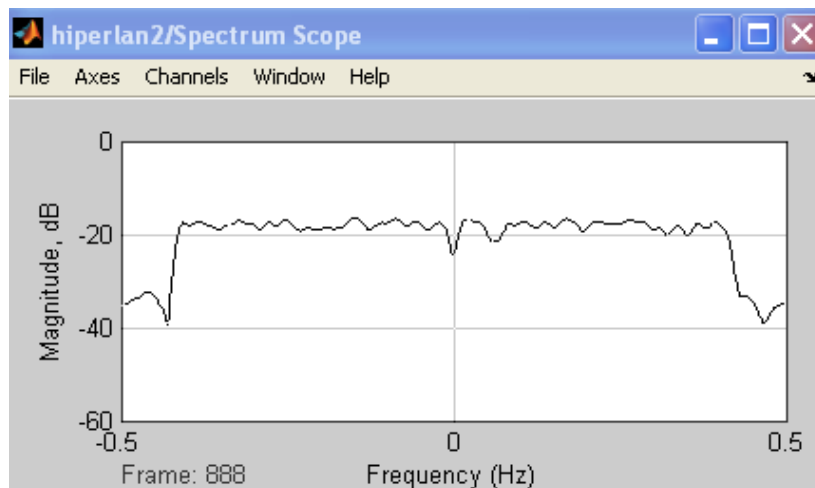


a)



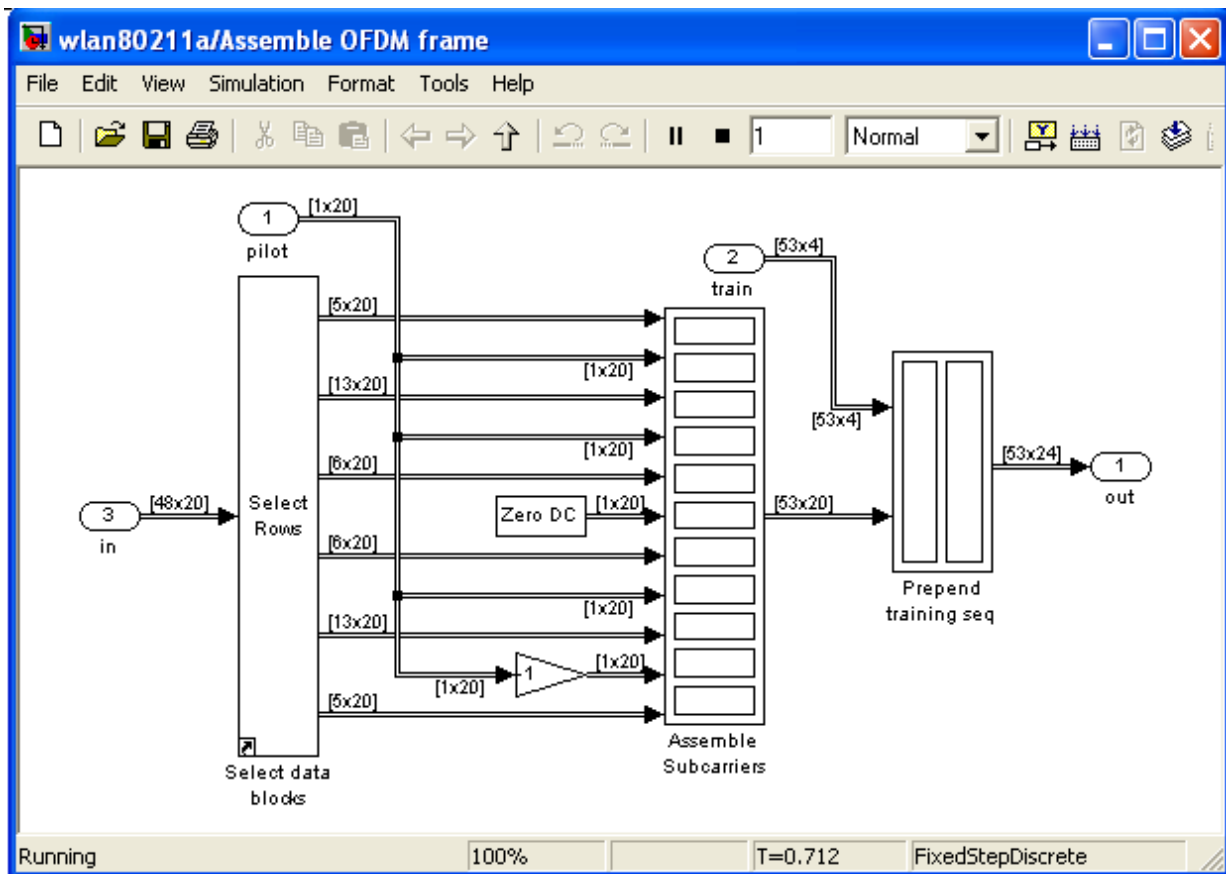
б)

в)



г)

Д.1.2. Модель системи HIPERLAN/2 (а) та осцилограми (б, в, г) в окремих точках



в)

Д.1.3. Модель системи системи IEEE 802.11a (а), блок вибору початкових даних для моделювання (б) та структура блоку формування паралельних каналів при OFDM модуляції (в)

Додаток 2. Моделювання окремих складових систем безпроводного зв'язку

Д.2.1. Кодування

В розділі 1 розглядалися різні коди, більшість з яких наявна в блоці розширення Communications Blockset.

[Barker Code Generator](#)

[Gold Sequence
Generator](#)

[Hadamard Code
Generator](#)

[Kasami Sequence
Generator](#)

[OVSF Code Generator](#)

[PN Sequence Generator](#)

[Walsh Code Generator](#)

Бачимо, що серед приведених кодів наявні генератори псевдовипадкових послідовностей Уолша, Голда, Касамі, OVSF коди та інші. Нижче приведена інформація про деякі наявні генератори послідовностей.

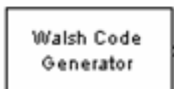
Walsh Code Generator

Generate **Walsh** code from orthogonal set of codes

Library

Sequence Generators sublibrary of Comm Sources

Description



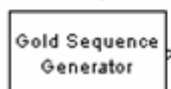
Gold Sequence Generator

Generate **Gold** sequence from set of sequences

Library

Sequence Generators sublibrary of Comm Sources

Description



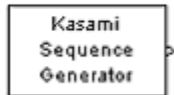
Kasami Sequence Generator

Generate Kasami sequence from set of Kasami sequences

Library

Sequence Generators sublibrary of Comm Sources

Description



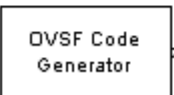
OVSF Code Generator

Generate orthogonal variable spreading factor (OVSF) code from set of orthogonal codes

Library

Spreading Codes

Description



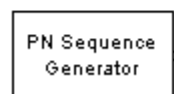
PN Sequence Generator

Generate pseudonoise sequence

Library

Sequence Generators sublibrary of Comm Sources

Description



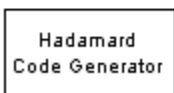
Hadamard Code Generator

Generate Hadamard code from orthogonal set of codes

Library

Sequence Generators sublibrary of Comm Sources

Description



Д.2.2. Модуляція

Модулятори та демодулятори

В розділі вказувалось, що в системах CDMA широко використовуються модулятори та демодулятори з цифровою модуляцією BPSK, QPSK, OQPSK.

Communications Blockset

Всі типи згаданих модуляторів та демодуляторів наявні в блоці розширення Communications Blockset. Нижче приведена коротка інформація про згадані блоки.

BPSK Modulator Baseband

Modulate using binary phase shift keying method

Library

PM, in Digital Baseband sublibrary of Modulation

Description



The BPSK Modulator Baseband block modulates using the binary phase shift keying method. The output is a baseband representation of the modulated signal.

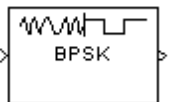
BPSK Demodulator Baseband

Demodulate BPSK-modulated data

Library

PM, in Digital Baseband sublibrary of Modulation

Description



The BPSK Demodulator Baseband block demodulates a signal that was modulated using the binary phase shift keying method. The input is a baseband representation of the modulated signal.

QPSK Modulator Baseband

Modulate using the quaternary phase shift keying method

Library

PM in Digital Baseband sublibrary of Modulation

Description



The QPSK Modulator Baseband block modulates using the quaternary phase shift keying method. The output is a baseband representation of the modulated signal.

QPSK Demodulator Baseband

Demodulate QPSK-modulated data

Library

PM, in Digital Baseband sublibrary of Modulation

Description



The QPSK Demodulator Baseband block demodulates a signal that was modulated using the quaternary phase shift keying method. The input is a baseband representation of the modulated signal.

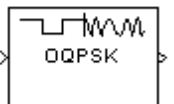
OQPSK Modulator Baseband

Modulate using offset quadrature phase shift keying method

Library

PM, in Digital Baseband sublibrary of Modulation

Description



The OQPSK Modulator Baseband block modulates using the offset quadrature phase shift keying method. The output is a baseband representation of the modulated signal.

OQPSK Demodulator Baseband

Demodulate OQPSK-modulated data

Library

PM, in Digital Baseband sublibrary of Modulation

Description



The OQPSK Demodulator Baseband block demodulates a signal that was modulated using the offset quadrature phase shift keying method. The input is a baseband representation of the modulated signal.

Communications Toolbox

Також згадані модулятори наявні в блоці Communications Toolbox. Нижче приведено приклад модулятора BPSK, та файл програми, на основі якої він функціонує. Особливою перевагою системи є те, що на основі даної програми можна написати модернізовану, згідно вимог користувача. Наприклад, в Україні використовується система телеметрії та передачі даних «Эстакада-1», з нестандартною модуляцією, модулятор якої відсутній в системі MATLAB. Але досвіченому користувачеві досить декількох десятків хвилин, щоб створити файл з потрібною нестандартною FSK модуляцією.

При побудові сузір'я також можна врахувати коди Грея.

pskmod

Phase shift keying modulation

Syntax

```
y = pskmod(x,M)
y = pskmod(x,M,ini_phase)
y = pskmod(x,M,ini_phase,symbol_order)
```

Description

`y = pskmod(x,M)` outputs the complex envelope `y` of the modulation of the message signal `x` using phase shift keying modulation. `M` is the alphabet size and must be an integer power of 2. The message signal must consist of integers between 0 and `M-1`. The initial phase of the modulation is zero. If `x` is a matrix with multiple rows and columns, then the function processes the columns independently.

`y = pskmod(x,M,ini_phase)` specifies the initial phase of the modulation in radians.

`y = pskmod(x,M,ini_phase,symbol_order)` specifies how the function assigns binary words to corresponding integers. If `symbol_order` is set to 'bin' (default), the function will use a natural binary-coded ordering. If `symbol_order` is set to 'gray', it will use a Gray constellation ordering.

```
function y = pskmod(x,M,varargin)
```

```
%PSKMOD Phase shift keying modulation
```

```
% Y = PSKMOD(X,M) outputs the complex envelope of the modulation of the
% message signal X, using the phase shift keying modulation. M is the
% alphabet size and must be an integer power or 2. The message signal X
% must consist of integers between 0 and M-1. For two-dimensional
% signals, the function treats each column as 1 channel.
```

```
%
```

```
% Y = PSKMOD(X,M,INI_PHASE) specifies the desired initial phase in
% INI_PHASE. The default value of INI_PHASE is 0.
```

```
%
```

```
% Y = PSKMOD(X,M,INI_PHASE,SYMBOL_ORDER) specifies how the
function
```

```
% assigns binary words to corresponding integers. If SYMBOL_ORDER is set
% to 'bin' (default), then the function uses a natural binary-coded ordering.
```

```
% If SYMBOL_ORDER is set to 'gray', then the function uses a Gray-coded
% ordering.
```

```
%
```

```
% See also PSKDEMOD, PAMMOD, PAMDEMOM, QAMMOD, QAMDEMOM,  
MODNORM.
```

```
% Copyright 1996-2005 The MathWorks, Inc.
```

```
% $Revision: 1.1.6.3 $ $Date: 2004/12/10 19:22:55 $
```

```
% Error checks
```

```
if(nargin<2)
```

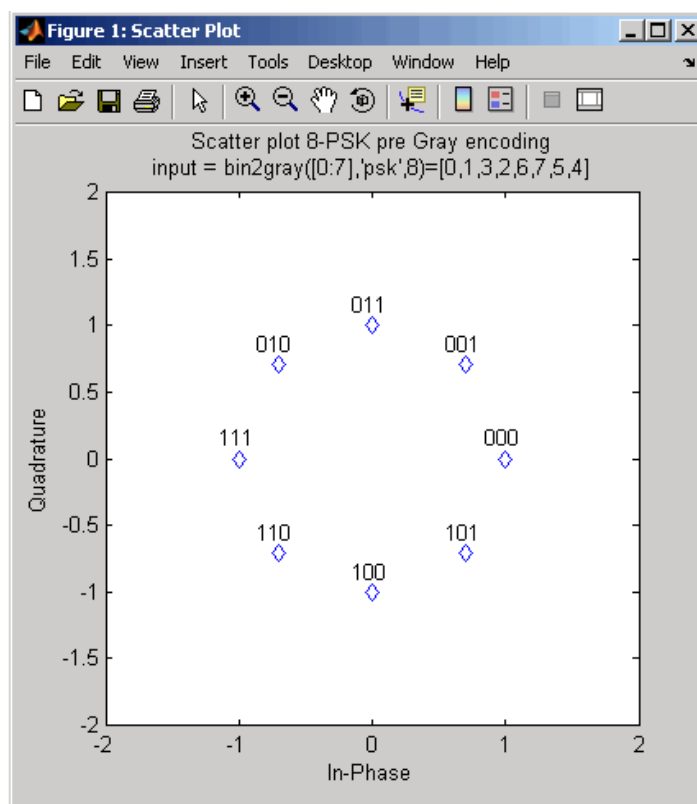
```
    error('comm:pskmod:numarg','Too few input arguments.');
```

```
end
```

```
if (nargin > 4)
```

```
    error('comm:pskmod:numarg', 'Too many input arguments. ');
```

```
end
```



Д.2.3. Фільтри

В модуляторах систем CDMA широко використовуються фільтри. Найбільш поширеними являються гаусові фільтри та фільтри з характерною «припіднятий косинус». Такі фільтри, а також інші наявні в блоці розширення Communications Blockset.

[Gaussian Filter](#)

[Ideal Rectangular Pulse Filter](#)

[Integrate and Dump](#)

[Raised Cosine Receive Filter](#)

[Raised Cosine Transmit Filter](#)

[Windowed Integrator](#)

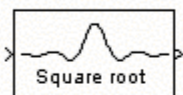
Raised Cosine Transmit Filter

Upsample and filter input signal using raised cosine FIR filter

Library

Comm Filters

Description



The Raised Cosine Transmit Filter block upsamples and filters the input signal using a normal raised cosine FIR filter or a square root raised cosine FIR filter. The block's icon shows the filter's impulse response."

Characteristics of the Filter

The **Filter type** parameter determines which type of filter the block uses; choices are `Normal` and `Square root`.

The impulse response of a normal raised cosine filter with rolloff factor R and symbol period T is

$$h(t) = \frac{\sin(\pi t / T)}{(\pi t / T)} \cdot \frac{\cos(\pi R t / T)}{(1 - 4R^2 t^2 / T^2)}$$

The impulse response of a square root raised cosine filter with rolloff factor R is

$$h(t) = 4R \frac{\cos((1 + R)\pi t / T) + \frac{\sin((1 - R)\pi t / T)}{(4Rt / T)}}{\pi\sqrt{T}(1 - (4Rt / T)^2)}$$

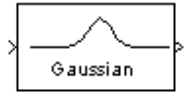
Gaussian Filter

Filter input signal, possibly downsampling, using Gaussian FIR filter

Library

Comm Filters

Description



The Gaussian Filter block filters the input signal using a Gaussian FIR filter. The block expects the input signal to be upsampled, so that the **Input samples per symbol** parameter, N , is at least 2. The block's icon shows the filter's impulse response."

Крім приведених прикладів моделей в системі MATLAB міститься багато інших моделей, призначених для дослідження окремих складових систем безпроводного зв'язку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеева Л. Телефоны стандарта D-AMPS //Потребитель. Техника для бизнеса, 2000. - № 6. – С.56-57.
2. Андрианов В.И., Соколов А.В. Средства мобильной связи. - СПб.: ВНУ-Санкт-Петербург, 1998. -256 с.
3. Борисов В.И., Гармонов А.В., Савинков А.Ю. ”Сравнительный анализ радиointерфейсов систем подвижной связи 3-го поколения”. Мобильные системы, 1999, №7, с.21.
4. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. - М.: Радио и связь, 1985.-384с.
5. Варакин Л.Е. и др. Интеллектуальная сеть: концепция и архитектура // Электросвязь, 1992. - № 1.
6. Варакин Л.Е., Трубин В.Н. Сотовые системы подвижной связи// Зарубежная радиоэлектроника. - 1986. -№ 2. -С. 3-32.
7. Величко В.В. Передача данных в сетях мобильной связи третьего поколения / Под ред. чл.-кор. РАН Ю.Б. Зубарева – М.: Радио и Связь, Горячая линия – Телеком, 2005. – 332с., ил.
8. Весоловский Кшиштоф Системы подвижной радиосвязи /Пер. с польск. И.Д. Рудинского; под ред. А.И. Ледовского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 536с.
9. Вишневский В. М., Ляхов А. И. Широкополосные беспроводные сети передачи информации // М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
10. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. Учебное пособие для вузов.-М.: Горячая линия-Телеком, 2007.-432с., ил. ISBN 5-93517-252-6.
11. Горностаев Ю.М. “Мобильные системы 3-го поколения”. М., МЦИТИ, 1998.
12. Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А. Сети и системы радиодоступа.-М.: Эко-Трендз, 2005.-384 с.: ил. ISBN 5-88405-060-7
13. Дежурный И.И. Классификация и основные характеристики систем

сухопутной подвижной радиосвязи // Электросвязь, 1993, №8

14. Громаков Ю. А. Структура TDMA кадров и формирование сигналов в стандарте GSM // Электросвязь, 1993. - № 10.- С. 9-12.

15. Громаков Ю. А. Сотовые системы подвижной радиосвязи. ТЭК. Т 48. — М.: Эко-Трендз, 1994.

16. Громаков Ю.А. „Стандарты и системы подвижной радиосвязи”. Мобильные телесистемы – Эко-Трендз, М., 1997.

17. Дьяконов В. П. Matlab 6.5 SP1/7.0 + Simulink 5/6. Основы применения. Солон-Пресс 2005. – 800 с.: ил.

18. Емельянов В.В., Назаренко В.В. Транкинговая радиосвязь: Учебное пособие - ХНУРЭ 2000. - 224с.

19. Емельянов В.В. Системы сотовой подвижной радиосвязи. – Х.: Торсин 2005. – 278с., 141 ил.

20. Зюко А.Г. Кловский Д. Д. Теория передачи сигналов: Учебник для вузов. – М.: "Связь", 1980 г. – 288 с. ил.

21. Зюко. А.Г. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации - М.: Радио и связь, 1985.

22. Злотник Б. М. Помехоустойчивые коды в системах связи. – М.: Радио и связь, 1989. – 232 с.

23. Карташевский В.Г., Семенов С.Н., Фиретова Т.В. Сети подвижной связи. - М.: Эко-Трендз, 2001, - 299с.

24. Кловский Д. Д. Теория передачи сигналов. Учебник для вузов. М., "Связь", 1973 г. - 376 с. ил.

25. Корнеев Ю.В., Чумак М.А. Сети и системы мобильной связи- Часть 1: I Учебное пособие - Одесса:УГАС, 1996, - 54с.

26. Корнеев Ю.В., Сукачев Э.А., Чумак М.А. Принципы построения систем и сетей мобильной связи: Учебное пособие - Одесса: УГАС, 1997. - 68с.

27. Кузьмин И. В., Кедрус В. А. Основы теории информации и кодирования. Изд -2-е, перераб. и доп. – К.: Вища школа, 1986. – 236 с.

28. Мотивы внедрения систем подвижной связи третьего поколения, (по материалам Telecommunications). // Технологии и средства связи, 2000 г.
29. Невдяев Л. "Сравнительные характеристики схем кодирования для GPRS, EDGE и IS-136HS". Мобильные телекоммуникации, 2000, №1, с.32.
30. Невдяев Л. М. Долог путь к единому стандарту. // Сети. — Январь 2000 г.
31. Невдяев Л. М. Стандарты 3G. // Сети. — Июнь 2000 г.
32. Невдяев Л.М. "CDMA: Архитектура радиointерфейса". Мобильные телекоммуникации, 2000, №1, с.34.
33. Невдяев Л.М. Мобильная связь 3-го поколения. - М.: Связь и бизнес, 2000. -208с.
34. Петрович Н.Г., Размахнин М.К. Системы связи с шумоподобными сигналами. - М.: Советское радио, 1969. - 232с.
35. Пугачев Р., Фильчаков А. Телефоны стандарта GSM // Потребитель. Техника для бизнеса, 2000. — № 6. — С. 47-55.
36. Пышкин И.М. Теория кодового разделения сигналов.— М.: Связь, 1980.
37. Ратынский М.В. Основы сотовой связи. /Под редакцией Зимина Д.Б. – М., Радио и связь, 1998. – 248 с.
38. Ратынский М.В. Основы сотовой связи. / Под ред. Зимина. Д.Б. - 2-е изд., переработанное и дополненное. - М.; Радио и связь, - 2000.-248с.
39. Рид Ричард. Основы теории передачи информации.: Пер. с англ.-М.: Издательский дом "Вильямс", 2005.-320с.: ил.
40. Рошан Педжман, Лиэри Джонатан Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. – 304 с.
41. Сергиенко А.Э. "Использование радиочастотного спектра для систем третьего поколения UMTS". 5-й Бизнес-Форум "Мобильные системы-2000", 20-24 марта, М., 2000, т.1, с.41.
42. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. Питер 2002. – 608 с.:ил.
43. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, исп.: Пер. с англ. - М.: Издательский дом "Вильямс",

2004 г. - 1104 с.

44. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Н Нові інформаційні технології: Транспортні мережі телекомунікацій. – К.: Техніка, 2004. – 488с.

45. Столлингс В. Компьютерные системы передачи данных, 6-е изд. — М.: Издательский дом "Вильямс", 2002.

46. Столингс В. Беспроводные линии связи и сети: Пер. с англ. - М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. - 640с.

47. Сухопутная подвижная радиосвязь. Кн.1. Основы теории. / И.М. Пышкин, И.И. Дежурный и др.; Под ред. В.С. Семенихина и И.М.Пышкина. - М.: Радио и связь, 1990.-432С.

48. Туляков Ю.М. Системы персонального радиовызова. - М.: Радио и связь, 1988. - 168с.

49. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра: Пер. с англ. / Под ред. В.И. Журавлева - М.: Радио и связь, 2000. - 520с.

50. Цымбал В. П. Теория информации и кодирование. Изд. 3-е – Киев: Вища школа, 1982 г., 302 с.

51. Шляконов А. и др."EDGE – Эволюция системы улучшенной передачи данных для GSM и IS-136". Мобильные системы, 1999, №7, с.16.

52. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. Издание второе, исправленное и дополненное Москва: Техносфера, 2006.-288с.

53. Gibson J., "Mobile Communications Handbook". CRC Press in cooperation with IEEE Press, США, 1996.

54. Webb W. Introduction to Wireless Local Loop: Broadband and Narrowband Systems. — Boston: Artech House, 2000.

55. Zeng M., Annamalai A., Bhargava V. Harmonization of Global Third-Generation Mobile Systems/ - IEEE Communications Magazine, December 2000.

56. <http://www.cdg.org/>

57. <http://www.qualcomm.com/>

58. <http://www.3gpp.org/>

59. <http://exponenta.ru/>

60. <http://www.mathsoft.com/>

Михайло Миколайович Климаш
Володимир Олексійович Пелішок
Петро Михайлович Михайленич

ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗПРОВІДНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Комп'ютерна верстка:

Білак Ярослав Павлович
Снігура Геннадій Микитович

Підписано до друку 01.05.2007 р. Формат 70x100/16.
Папір офсетний. Друк офсетний.
Тираж 300. Зам № .

Віддруковано у НВВД УАД
79008, м. Львів, вул. Винниченка, 12.