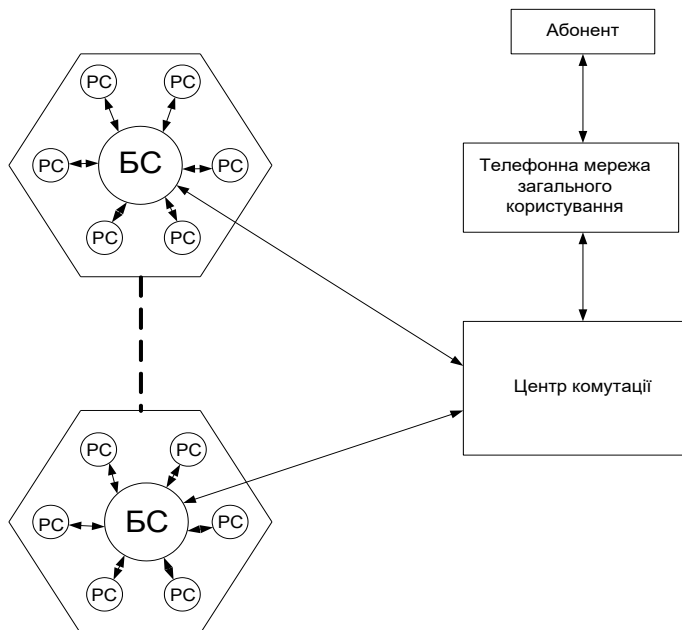
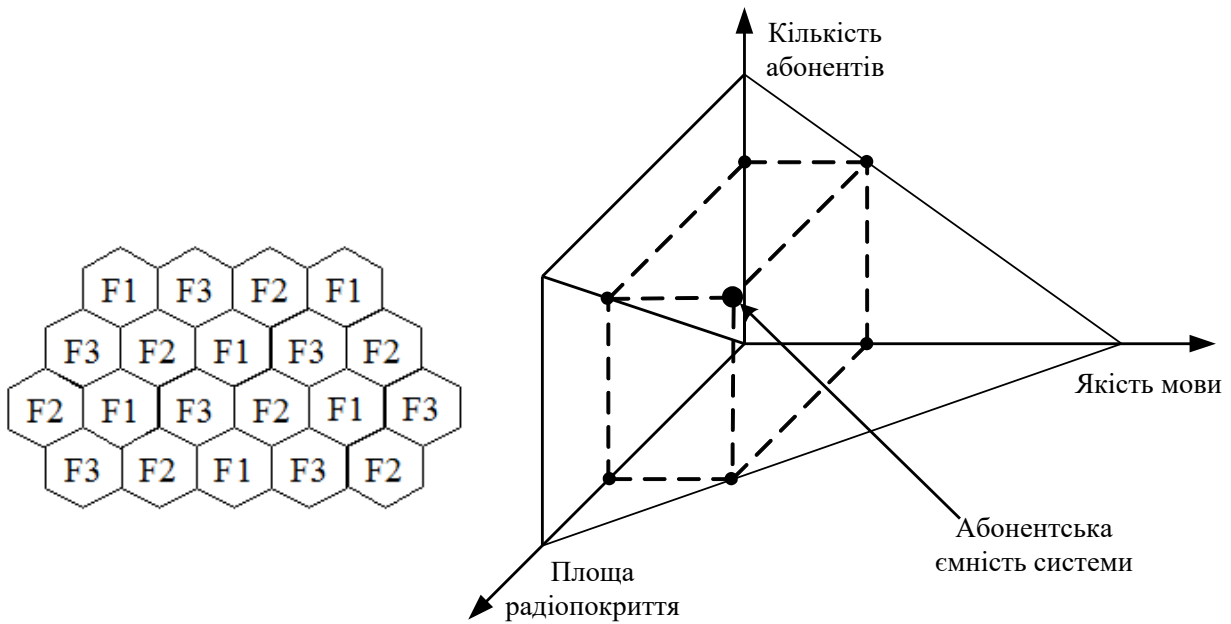


СИСТЕМИ РУХОМОГО ЗВ'ЯЗКУ

Навчальний посібник



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

О. О. Семенова, А. О. Семенов, В. С. Белов

СИСТЕМИ РУХОМОГО ЗВ'ЯЗКУ

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2017

УДК 621.396.2
ББК 32.84
С 30

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 10 від 26.05. 2011 р.)

Рецензенти:

В. Ю. Кучерук, доктор технічних наук, професор
В. С. Осадчук, доктор технічних наук, професор
О.Б. Шарпан, доктор технічних наук, професор

Семенова О. О.
С 30 Системи рухомого зв'язку. Навчальний посібник / О. О. Семенова, А. О. Семенов, В. С. Белов. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 185 с.

У навчальному посібнику розглядаються мережі стільникового (мобільного), супутникового та транкінгового (професійного) рухомого зв'язку, які використовують різноманітні міжнародні стандарти. Посібник розроблений відповідно до плану кафедри та програм дисциплін "Системи рухомого зв'язку" та "Системи зв'язку з рухомими об'єктами".

УДК 621.396.2
ББК 32.84

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 Мережі стільникового зв'язку.....	7
1.1 Виникнення та розвиток мереж стільникового зв'язку	7
1.2 Організація мережі стільникового зв'язку	10
1.3 Повторне використання частот	12
1.4 Алгоритм функціонування систем стільникового зв'язку	14
1.5 Структура центра комутації.....	16
1.6 Структура базової станції.....	17
1.7 Структура рухомої станції.....	18
1.8 Методи доступу із частотним і часовим розділенням.....	20
1.9 Метод доступу з кодовим розділенням.....	22
1.10 Побудова мереж зв'язку макро- і мікростільникової структури.....	23
1.11 Методи збільшення ємності мережі стільникового зв'язку.....	25
1.12 Перспективні мережі стільникового зв'язку.....	26
Запитання для самоперевірки.....	27
2 Аналогові системи стільникового зв'язку.....	28
2.1 Система стільникового зв'язку стандарту NMT	28
2.1.1 Принципи організації.....	28
2.1.2 Склад системи.....	29
2.1.3 Організація з'єднань і принципи адресації абонентів.....	31
2.1.4 Встановлення вхідного виклику.....	33
2.1.5 Встановлення вихідного виклику.....	34
2.1.6 Обмін повідомленнями в режимі естафетної передачі.....	34
2.2 Система стільникового зв'язку стандарту AMPS.....	35
2.2.1 Принципи побудови і загальні характеристики.....	35
2.2.2 Ефірний інтерфейс стандарту AMPS.....	37
2.2.3 Організація каналів керування.....	38
2.2.4 Встановлення вхідного виклику.....	39
2.2.5 Організація керування при вихідному виклику.....	40
2.2.6 Організація естафетної передачі абонента.....	41
2.3 Системи стільникового зв'язку стандарту TACS.....	42
2.3.1 Основні принципи.....	42
2.3.2 Принципи організації каналів керування.....	43
2.3.3 Встановлення вхідного виклику.....	44
Запитання для самоперевірки.....	44
3 Цифрова обробка сигналів.....	45
3.1 Роль і структура цифрової обробки сигналів.....	45
3.2 Аналого-цифрове перетворення.....	46
3.3 Кодування мови.....	47
3.4 Канальне кодування.....	62
3.5 Модуляція	68
Запитання для самоперевірки.....	76

4 Цифрові системи стільникового зв'язку.....	77
4.1 Система стандарту GSM.....	77
4.1.1 Загальні характеристики.....	77
4.1.2 Схема побудови і склад устаткування мереж.....	83
4.1.3 Структура і формування сигналів.....	88
4.1.4 Захист і безпека інформації.....	93
4.2 Система стільникового зв'язку CDMA.....	95
4.2.1 Загальна характеристика і принципи функціонування.....	96
4.2.2 Керування потужністю передавачів.....	99
4.2.3 Схема побудови і склад устаткування.....	101
4.2.4 Структура і формування сигналів.....	102
4.2.5 Організація естафетної передачі.....	103
4.2.6 Кодування в прямому каналі.....	103
4.2.7 Кодування в зворотному каналі.....	106
4.2.8 Встановлення вхідного і вихідного викликів.....	107
Запитання для самоперевірки.....	109
5 Мобільні системи зв'язку третього покоління.....	110
5.1 Загальна концепція мобільного зв'язку третього покоління	110
5.2 Радіоінтерфейс системи UMTS/FDD.....	112
5.2.1. Загальна характеристика та основні параметри.....	112
5.2.2 Логічні, транспортні та фізичні канали.....	113
5.2.3. Виділені фізичні канали лінії "вверх"	114
5.2.4 Загальні фізичні канали лінії "вверх"	115
5.2.5 Каналізуючі коди лінії "вверх".....	116
5.2.6 Скремблювання в лінії "вверх".....	118
5.2.7 Транспортні канали лінії "вниз" і їх відображення на фізичні.....	121
5.2.8 Організація фізичних каналів лінії "вниз".....	121
5.2.9 Каналізуючі коди лінії "вниз".....	122
5.2.10 Скремблювання в лінії "вниз".....	123
5.2.11 Канал синхронізації.....	124
5.2.12 Процедури фізичного рівня UMTS.....	126
5.3 Особливості радіоінтерфейса UMTS/TDD.....	129
Запитання для самоперевірки.....	130
6 Супутникові системи зв'язку.....	131
6.1 Класифікація систем супутникового зв'язку.....	131
6.2 Послуги, які надають системи супутникового зв'язку.....	133
6.3 Класифікація орбіт зв'язних космічних апаратів	134
6.4 Структура систем персонального супутникового зв'язку	136
6.5 Система Iridium	137
6.5.1 Основні параметри та характеристики системи Iridium.....	138
6.5.2 Послуги системи Iridium.....	138
6.5.3 Діапазони і смуги частот радіоліній.....	139
6.5.4 Склад системи Iridium.....	140
6.6 Система Globalstar.....	142

6.6.1 Послуги системи Globalstar.....	143
6.6.2 Діапазони частот радіоліній та канали зв'язку.....	144
6.6.3 Склад системи Globalstar.....	146
6.7 Система Inmarsat	148
6.7.1 Основні параметри та характеристики системи Inmarsat.....	148
6.7.2 Склад системи Inmarsat.....	150
6.7.3 Канали і радіолінії системи Inmarsat.....	152
Запитання для самоперевірки	154
7 Транкінгові системи радіозв'язку.....	155
7.1 Основні положення.....	155
7.2 Класифікація транкінгових систем радіозв'язку	157
7.3 Принципи побудови системи транкінгового радіозв'язку	164
7.3.1 Способи формування робочої зони.....	164
7.3.2 Повторне використання частот.....	164
7.3.3 Кількість каналів.....	165
7.3.4 Вибір розміру комірки.....	166
7.4 Склад і устаткування системи транкінгового зв'язку.....	166
7.4.1 Структура одноканальної транкінгової системи.....	167
7.4.2 Структура багатоканальної транкінгової системи.....	169
7.5 Стандарт TETRA	170
7.6 Стандарт SmartZone.....	172
7.7 Стандарт MPT 1327.....	175
Запитання для самоперевірки.....	179
Словник термінів.....	180
Список використаних джерел.....	184

ВСТУП

Системи рухомого зв'язку є одними з найбільш перспективних областей електрозв'язку, що швидко розвиваються. Хоча між відомими стандартами існують суттєві відмінності, всі вони базуються на загальних принципах, які розглядаються у дисциплінах «Системи рухомого зв'язку» та «Системи зв'язку з рухомими об'єктами».

Даний посібник складається з семи розділів, присвячених будові та характеристикам стільникових, супутникових та транкінгових систем зв'язку.

Зокрема, розділ 1 – «Мережі стільникового зв'язку» знайомить читача з основними поняттями систем рухомого зв'язку, а також з будовою їх основних складових частин – рухомої станції, базової станції, центра комутації.

Розділ 2 – «Аналогові системи стільникового зв'язку» містить загальні відомості про найбільш поширені аналогові стандарти систем рухомого зв'язку – NMT, AMPS, TACS.

Розділ 3 – «Цифрова обробка сигналів» ознайомлює з основними етапами обробки сигналів у рухомих станціях: аналого-цифрове перетворення, кодування, модуляція.

У розділі 4 – «Цифрові системи стільникового зв'язку» розглядаються структури та принципи функціонування цифрових систем найбільш поширених стандартів – GSM та CDMA.

Розділі 5 – «Мобільні системи зв'язку третього покоління» присвячений принципам організації систем UMTS.

У розділі 6 – «Супутникові системи зв'язку» розглядаються три мережі супутникового зв'язку – Iridium, Globalstar та Inmarsat.

Розділ 7 – «Транкінгові системи радіозв'язку» ознайомлює зі стандартами професійного зв'язку.

1 МЕРЕЖІ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Виникнення та розвиток мереж стільникового зв'язку

Перші радіотелефони використовували звичайні фіксовані канали і, якщо один з них був зайнятий, абонент вручну перемикався на інший. З розвитком техніки радіотелефонні системи вдосконалювалися, зменшувалися габарити пристроїв, освоювалися нові частотні діапазони, поліпшувалося комутаційне устаткування, зокрема, з'явилася функція автоматичного вибору вільного каналу (trunking). Але все це не могло вирішити головної проблеми – обмеженості частотного ресурсу при величезній потребі в наданні послуг.

Вихід був знайдений: територію, що обслуговується, розбили на невеликі ділянки, називані *стілками* (cell). Кожен зі стільників обслуговується передавачем з обмеженими радіусом дії та числом каналів. Це без завад дозволяє повторно використати ті ж самі частоти в іншому стільнику, але віддаленому на значну відстань. Теоретично їх можна використати в сусідньому стільнику. Але на практиці зони обслуговування стільників можуть перекриватися через різні фактори, наприклад зміни умов поширення радіохвиль. У результаті з'являються взаємні завади. Тому в сусідніх стільниках використовуються різні частоти.

За 20-літній період розвитку сформувалися три покоління систем стільникового зв'язку (ССЗ):

- перше покоління – аналогові системи;
- друге покоління – цифрові системи сьогодення;
- третє покоління – універсальні системи мобільного зв'язку .

В 1981 р. почалася експлуатація аналогової ССЗ першого покоління стандарту NMT-450 (Nordic Mobile Telephone) діапазону 450 МГц. Цей стандарт створювався як єдиний стандарт стільникового зв'язку для п'яти північноєвропейських країн – Ісландії, Швеції, Фінляндії, Норвегії й Данії. Надалі *мережі* (network) на основі його модифікованих версій почали використовуватися в багатьох країнах світу. Трохи пізніше, в 1985 р., на базі NMT-450 був розроблений стандарт NMT діапазону 900 МГц – NMT-900, що дозволив значно збільшити ємність системи за рахунок використання більшого частотного ресурсу й розширити його функціональні можливості.

В 1983 р. у США була запущена мережа стандарту AMPS (Advanced Mobile Phone Service) у діапазоні 800 МГц. Цей стандарт широко використовується в США, Канаді, Центральній і Південній Америці, Австралії і є серед аналогових систем найпоширенішим у світі.

В 1985 р. Великобританія прийняла як національний стандарт TACS (Total Access Communications System), розроблений на основі стандарту AMPS. Через два роки у зв'язку з різким збільшенням числа абонентів була розширена робоча смуга частот і нова версія одержала назву ETACS (Enhanced TACS). Однак через більш високі якісні показники найбільш

широке застосування знайшов американський стандарт AMPS.

Відомі ще кілька стандартів, що з'явилися в середині 80-х рр.:

- C-450 використовується в Німеччині й Португалії та працює в діапазоні 450 МГц;
- RTMS (Radio Telephone Mobile System) – використовується в Італії в діапазоні 450 МГц;
- Radiocom-2000 – використовується у Франції в діапазонах 170, 200, 400 МГц;
- NTT – використовується в Японії в діапазоні 900 МГц.

Всі названі вище стандарти є аналоговими ССЗ 1-го покоління й уже не завжди відповідають вимогам абонентів до якості й номенклатури послуг рухового зв'язку. У них використовується частотна модуляція для передачі мови й частотна маніпуляція для передачі сигналів керування (сигналізації). Застосовується метод *множинного доступу із частотним розділенням каналів* (FDMA – Frequency Division Multiple Access). Аналоговий спосіб передачі інформації за допомогою частотної модуляції має ряд істотних недоліків:

- відносно низька ємність через недостатньо раціональне використання виділеної смуги частот при частотному розділенні каналів;
- можливість прослуховування розмов;
- відсутність ефективних методів боротьби із завмираннями сигналів під впливом навколишнього ландшафту та будинків.

Використання різних стандартів стільникового зв'язку заважало його широкому застосуванню: іноді по одному і тому ж телефону неможливо було розмовляти навіть у межах двох сусідніх країн. Збільшувати число абонентів можна було лише двома способами – розширенням частотного ресурсу (як, наприклад, це було зроблено у Великобританії) і переходом до раціонального частотного планування, що дозволяє набагато частіше використати одні і ті ж частоти. До кінця минулого десятиліття стільниковий зв'язок підійшов до нового етапу свого розвитку – створення систем другого покоління на основі цифрових методів обробки сигналу.

В 1982 р. Європейська конференція адміністрації пошти й електровз'язку (CEPT) – організація, що поєднує адміністрації зв'язку 26 країн – створила спеціальну групу Group Special Mobile з метою розробки європейського стандарту цифрового стільникового зв'язку для виділеного в цих цілях діапазону 900 МГц. Її аббревіатура GSM і дала назву новому стандарту. Перші технічні вимоги до GSM були опубліковані в 1990 р., а вже в 1992 р. у Німеччині система вступила в комерційну експлуатацію. Пізніше, у зв'язку із широким поширенням стандарту в усьому світі, GSM стали розшифровувати як Global System for Mobile Communications.

У США аналоговий стандарт AMPS одержав дуже широке поширення, тому пряма його заміна повністю цифровим стандартом виявилася практично неможливою. Вихід був знайдений у розробці дворежимної аналого-цифрової системи, що дозволяє сполучати роботу аналогової й цифрової систем у одному і тому ж діапазоні. Робота над відповідним ста-

ндартом була почата в 1988 р., а в 1990 р. американська Промислова Асоціація в області зв'язку ТІА (Telecommunications Industry Association) затвердила стандарт IS-54 (IS – скорочення від Interim Standard, тобто проміжний стандарт) на цифрову систему стільникового зв'язку, відомий також як D-AMPS.

Стандарт D-AMPS додатково вдосконалився за рахунок введення нового типу каналів керування, тому що цифрова версія IS-54 зберегла структуру каналів керування аналогового стандарту AMPS, що обмежувало можливості системи. Нові, повністю цифрові канали керування, були введені у версії IS-136, що була розроблена в 1994 р. і почали застосовуватися в 1996 р. При цьому була збережена сумісність із AMPS й IS-54, але підвищена ємність каналу керування й помітно розширені функціональні можливості системи.

Стандарт GSM, продовжуючи вдосконалюватися технічно, знайшов застосування в новому частотному діапазоні 1800 МГц. Це напрямок відомий за назвою системи персонального зв'язку. Для неї характерні більш широка робоча смуга частот і менші розміри стільників, що дозволяє будувати стільникові мережі значно більшої ємності. Відповідний стандарт у вигляді доповнення до стандарту GSM-900 був розроблений у Європі в 1991 р. й одержав назву DCS-1800 (Digital Cellular System). У комерційну експлуатацію система вступила в 1993 р., а в 1996 р. цей стандарт одержав назву GSM-1800.

У США діапазон 1800 МГц виявився зайнятий, але була знайдена можливість виділити смугу частот у діапазоні 1900 МГц. Робота в цьому діапазоні передбачена стандартом D-AMPS (версія IS-136). Розроблена також версія стандарту GSM для цього діапазону («американський» варіант GSM-1900 – стандарт IS-661).

Японія розробила власний цифровий стандарт стільникового зв'язку JDC (Japan Digital Cellular), близький за своїми показниками до американського стандарту D-AMPS. В 1991 р. він був затверджений Міністерством пошти й зв'язку країни.

Перераховані цифрові системи другого покоління ґрунтовані на методі *множинного доступу з часовим розділенням каналів* (Time Division Multiple Access – TDMA). Однак у липні 1993 р. у США був розроблений стандарт системи стільникового зв'язку на основі методу *множинного доступу з кодовим розділенням каналів* (Code Division Multiple Access – CDMA). Одною з основних переваг цього стандарту є значне збільшення ємності системи. Якщо ємність стільникової системи стандарту D-AMPS приблизно в три рази вища в порівнянні з аналоговим стандартом AMPS, то стандарт CDMA перевершує цей показник в 10 разів.

ТІА прийняла CDMA як стандарт цифрового стільникового зв'язку IS-95. В 1996 р. він почав застосовуватися в Гонконгу, США та Південній Кореї, а в США почала використовуватися версія цього стандарту для діапазону 1900 МГц.

Роботи над створенням системи мобільного зв'язку третього покоління ще ведуться, її комерційна експлуатація розпочалася у 2002-2005 р.

1.2 Організація мережі стільникового зв'язку

Свою назву мережі стільникового зв'язку одержали відповідно до стільникового принципу організації зв'язку, відповідно до якого зона обслуговування (територія міста або регіону) ділиться на деяке число стільників (рис. 1.1).

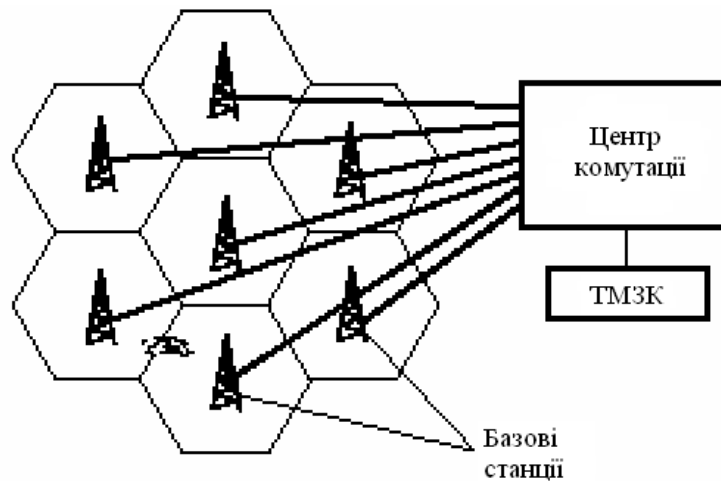


Рисунок 1.1 – Принцип організації мережі стільникового зв'язку

Поділити територію на стільники можна у два способи

1. Шляхом вимірювання статистичних характеристик поширення сигналів в системах зв'язку;
2. Шляхом вимірювання або обчислення параметрів поширення сигналів для конкретного району.

При реалізації першого способу вся територія ділиться на однакові за розміром стільники, а потім за допомогою закону статистичної радіофізики визначаються їх розміри та відстані до інших зон, у межах яких виконуються вимоги допустимого взаємного впливу.

Для оптимального (тобто, без перекриття або пропускання ділянок) розділення території на стільники можна використовувати лише три геометричні фігури: трикутник, квадрат та шестикутник. Найбільш підходящою фігурою є шестикутник, оскільки якщо антену з круговою діаграмою спрямованості встановити в його центрі, то буде забезпечено доступ до всього стільника.

При використанні першого способу інтервал між стільниками, в яких використовуються однакові робочі канали, є більшим, ніж потрібно для забезпечення допустимого рівня взаємних завад.

Більш доцільним є другий спосіб розділення на зони обслуговування. У цьому випадку вимірюють або обчислюють параметри системи для ви-

значення мінімальної кількості базових станцій, що забезпечують задовільне обслуговування абонентів на всій території, визначають оптимальне місце розташування базової станції з врахуванням рельєфу місцевості, можливість використання направлених антен, пасивних ретрансляторів і сумісних центральних станцій у момент пікового навантаження.

Стільник звичайно схематично зображують у вигляді правильних шестикутників, які мають подібність із бджолиними стільниками, це й було приводом назвати систему стільниковою. Стільникова структура мережі безпосередньо пов'язана із принципом повторного використання частот, відповідно до якого ті самі частоти можуть повторюватися в стільниках, вилучених друг від друга на певну відстань. У центрі кожного стільника розташована базова станція (БС) (base station), яка обслуговує всі *рухомі станції* (mobile station) у межах свого стільника. При переміщенні абонента з одного стільника до іншого відбувається передача його обслуговування від однієї БС до іншої.

У дійсності стільники ніколи не бувають строгої геометричної форми. Реальні границі стільників мають вигляд неправильних кривих, що залежать від умов поширення й загасання радіохвиль, тобто від рельєфу місцевості, щільності забудови й інших факторів (рис. 1.2). Крім того, у межах зони впевненого прийому часто мають місце області, у яких прийом сигналу неможливий (тіньові зони). Відповідно положення базової станції лише приблизно збігається із центром стільника, який складно визначити однозначно. Якщо на БС використовуються спрямовані антени, то БС фактично виявляються на границях стільників.

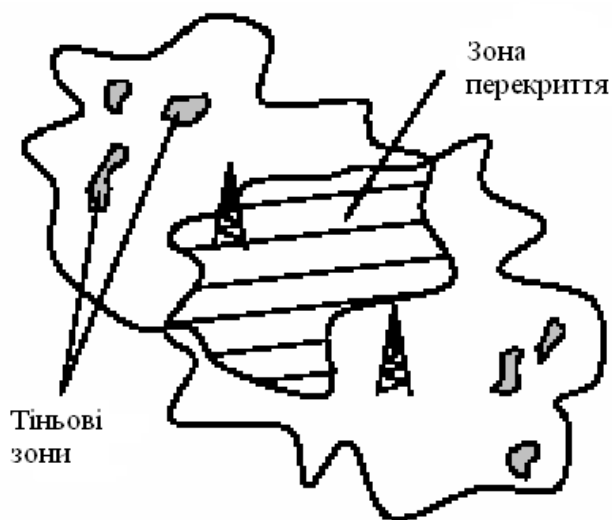


Рисунок 1.2 – Реальні границі стільників

Кількість каналів базової станції кратна 8, наприклад, 8, 16, 32. Один з каналів є *керуючим* (control channel). У деяких випадках його також називають *каналом виклику* (calling channel). На цьому каналі відбувається безпосереднє встановлення з'єднання при виклику рухомого абонента мережі, а сама розмова розпочинається тільки після того, коли буде знайдено віль-

ний у даний момент канал і відбудеться переключення на нього. Всі ці процеси відбуваються дуже швидко і непомітно для абонента.

Будь-який з каналів стільникового зв'язку використовує при роботі пару частот для дуплексного зв'язку, тобто частоти базової і рухомої станції рознесені. Це робиться для того, щоб покращити фільтрацію сигналів і усунути взаємний вплив передавача на приймач одного і того ж пристрою при їх одночасній роботі.

Комутація каналів базових станцій здійснюється в *центрі комутації* (ЦК) (Mobile Switching Center), що підключається до телефонної мережі загального користування (ТФЗК) на правах кінцевої телефонної станції.

У цифрових системах стільникового зв'язку (наприклад GSM) використовується поняття «система базової станції» (СБС), у яку входить контролер базової станції (КБС) і декілька базових станцій прийому-передачі (БППС), як показано на рис. 1.3.

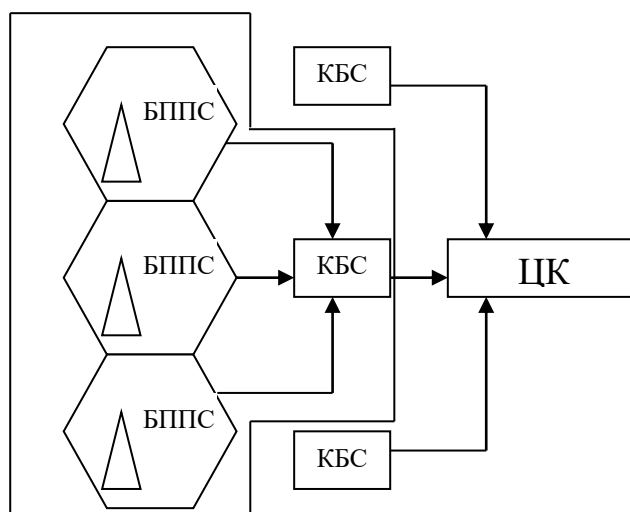


Рисунок 1.3 – Система базової станції (СБС)

Один контролер може управляти декількома БППС і виконує такі функції: управляє розділенням радіоканалів; контролює з'єднання й регулює їхню черговість; забезпечує режим роботи зі «стрибучою» частотою, модуляцію й демодуляцію сигналів, кодування та декодування повідомлень. Три БППС, які підключаються до одного загального КБС, можуть обслуговувати кожна свій 120-градусний сектор, а шість БППС із одним КБС – шість 60-градусних секторів.

1.3 Повторне використання частот

Кожен зі стільників обслуговується своїм передавачем з невисокою вихідною потужністю і обмеженою кількістю каналів зв'язку. Це дозволяє повторно використовувати частоти каналів цього передавача у іншому, віддаленому на значну відстань, стільнику. Теоретично такі передавачі

можна використовувати і у сусідніх стільниках. Але на практиці зони обслуговування можуть перекриватися під впливом різних чинників, наприклад, через зміну умов поширення радіохвиль. Тому в сусідніх стільниках використовуються різні частоти. Приклад побудови стільників при використанні трьох частот показано на рис.1.4.

Група стільників з різними наборами частот називається кластером. Визначальним параметром кластера є розмірність – кількість частот, що використовуються в сусідніх стільниках. Розмірність кластера, наведеного на рис. 1.4, дорівнює трьом. На практиці це значення може досягати п'ятнадцяти.

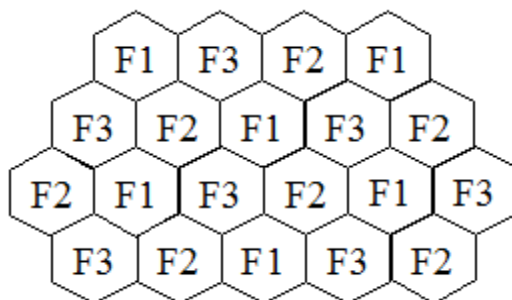


Рисунок 1.4 – Побудова стільників для трьох частот

Основною ідеєю, на якій базується принцип стільникового зв'язку, є повторне використання частот у несуміжних стільниках. Першим способом організації повторного використання частот, який застосовувався у аналогових системах, був спосіб, що використовує антени базових станцій з однаковими діаграмами спрямованості. Він пропонує передачу сигналу однакової потужності у всі напрямки, що для абонентських станцій еквівалентне прийманню завад від всіх базових станцій зі всіх напрямків.

Базові станції, на яких допускається повторне використання виділеного набору частот, віддалених одна від одної на відстань D , яка називається захисним інтервалом (рис. 1.5). Саме можливість повторного застосування одних і тих же частот визначає високу ефективність використання частотного спектра у стільникових системах зв'язку.

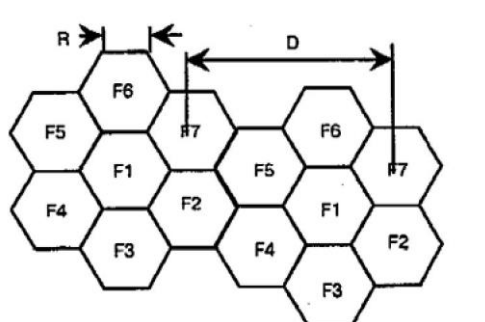


Рисунок 1.5 – Повторне використання частот у несуміжних стільниках

Суміжні базові станції, що використовують різні частотні канали, утворюють групу з C станцій. Якщо кожній базовій станції виділяється набір з m каналів з шириною смуги F_K , то загальна ширина смуги F_C , яку займає дана система стільникового зв'язку, складе $F_C = F_K \cdot m \cdot C$.

Таким чином, величина C визначає мінімальну можливу кількість каналів у системі, тому її називають частотним параметром системи або коефіцієнтом повторення частот. Коефіцієнт C не залежить від кількості каналів і збільшується зі зменшенням радіуса комірки.

Застосування шестикутних стільників дозволяє мінімізувати ширину смуги частот, оскільки така форма забезпечує оптимальне співвідношення між значеннями C і D . Окрім того шестикутна форма найкращим чином вписується у кругову діаграму спрямованості антени базової станції, встановленої у центрі стільника.

Розмір стільника R визначає захисний інтервал D між стільниками, у яких одні і ті ж частоти можна застосовувати повторно. Значення захисного інтервалу D також залежить від допустимого рівня завад і умов поширення радіохвиль. Оскільки інтенсивність викликів у межах всієї зони обслуговування є приблизно однаковою, то стільники вибираються одного розміру. Розмір R визначає також кількість абонентів N , які здатні одночасно вести переговори по всій території обслуговування. Тому зменшення цього розміру дозволяє не лише підвищити ефективність використання виділеної смуги частот і збільшити абонентську ємність системи, але і зменшити потужність передавачів і чутливість приймачів базових і рухомих станцій. Це, в свою чергу, покращує умови електромагнітної сумісності засобів стільникового зв'язку з іншими радіоелектронними засобами і системами. Ефективним способом зниження рівня завад є використання секторних антен з вузькими діаграмами спрямованості. У секторі такої вузьконаправленої антени сигнал випромінюється переважно у одну сторону, а рівень випромінювання у протилежному напрямку скорочується до мінімуму. Поділ стільників на сектори дозволяє частіше застосовувати частоти у стільниках повторно. Загальновідомий спосіб повторного використання частот у організованих таким чином стільниках оснований на застосуванні трисекторних антен для кожної базової станції і трьох сусідніх базових станцій з формуванням ними дев'яти груп частот (рис. 1.6). У цьому випадку застосовуються антени з шириною діаграми спрямованості до 120° .

1.4 Алгоритм функціонування систем стільникового зв'язку

Коли стільниковий телефон знаходиться у режимі очікування (слухавка покладена), його приймальний пристрій постійно сканує або всі канали системи або тільки керуючі. Для виклику відповідного абонента всіма базовими станціями по керуючих каналах передається сигнал виклику. Стільниковий телефон абонента, що викликається, при отриманні цього сигналу відповідає по одному з вільних каналів керування. Базові станції, що

прийняли сигнал-відповідь, передають інформацію про його параметри у центр комутації, який перемикає розмову та ту базову станцію, де зафіксовано максимальний рівень сигналу стільникового телефону абонента, що викликається.

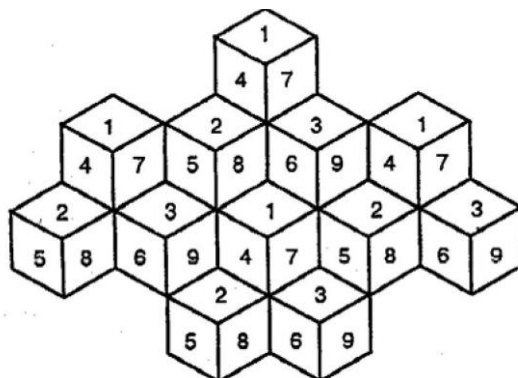


Рисунок. 1.6 – Модель повторного використання частот для трьох БС

Під час набору номера стільниковий телефон займає один з вільних каналів, в якому рівень сигналу базової станції у даний момент є максимальним. По мірі віддалення абонента від базової станції або через погіршення умов поширення радіохвиль рівень сигналу зменшується, що призводить до погіршення якості зв'язку. Покращення якості досягається шляхом автоматичного переключення абонента на інший канал зв'язку. Це відбувається таким чином. спеціальна процедура, яка називається передачею управління викликом або *естафетною передачею* (handover або handoff), дозволяє переключити розмову на вільний канал іншої базової станції, у зоні дії якої в цей час опинився абонент. Аналогічні дії виконуються при зниженні якості зв'язку через завади або при виникненні несправностей комутаційного обладнання. Для контролю таких ситуацій базова станція обладнана спеціальним приймачем, який періодично вимірює рівень сигналу стільникового телефону і порівнює його з допустимим порогом. Якщо рівень сигналу менше цього порогу, то інформація при це автоматично передається в центр комутації по службовому каналу зв'язку. Центр комутації видає команду на найближчі до нього базові станції при вимірювання рівня сигналу стільникового телефонного абонента. Після отримання інформації від базових станцій про рівень сигналу центр комутації переключить телефон на ту з них, де рівень сигналу є найбільшим.

Іноді виникає ситуація, коли потік заявок на обслуговування перевищує кількість каналів всіх близько розташованих базових станцій. Це відбувається тоді, коли всі канали зайняті і поступає наступна заявка на обслуговування від рухомого абонента. У такому випадку застосовується принцип естафетної передачі всередині стільника. При цьому відбувається почергове переключення каналів у межах однієї базової станції для забезпечення всіх абонентів зв'язком.

1.5 Структура центра комутації

Центр комутації є «мозковим» центром й одночасно диспетчерським пунктом системи стільникового зв'язку. На ньому замикаються потоки інформації із всіх БС. Через ЦК здійснюється вихід на інші мережі зв'язку - телефонну мережу загального користування, супутникову мережу зв'язку або на інші стільникові мережі. До складу ЦК входить декілька процесорів (контролерів) і він являє типовий приклад багатопроесорної системи.

Блок-схема ЦК мережі цифрового стільникового зв'язку подана на рис. 1.7.

Комутатор здійснює перемикання потоків інформації між відповідними лініями зв'язку. Зокрема він може направити потік інформації від однієї БС до іншої або від БС до стаціонарної мережі зв'язку або навпаки – від стаціонарної мережі зв'язку до необхідної БС.

Комутатор підключається до ліній зв'язку через відповідні контролери зв'язку, що здійснюють проміжну обробку (упакування/розпакування, буферне зберігання) потоків інформації. Загальне керування роботою центра комутації й системи в цілому виконується від центрального контролера, що має потужне математичне забезпечення, що включає перепрограмувальну частину. Робота центра комутації припускає активну участь операторів, тому до складу центра входять відповідні термінали, а також засоби відображення та реєстрації (документування) інформації. Зокрема, оператором вводяться дані про абонентів і умови їхнього обслуговування, вихідні дані по режимах роботи системи, у необхідних випадках оператор видає команди, які потребуються по ходу роботи.

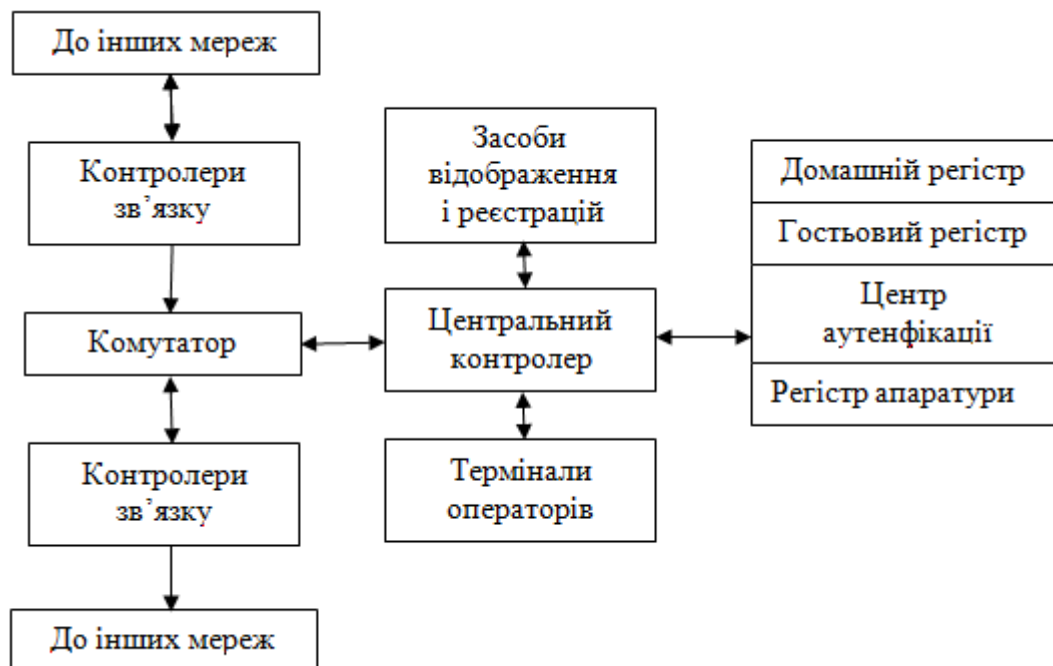


Рисунок 1.7 – Блок-схема центра комутації

Важливим елементом системи є база даних, до якої входять: домашній реєстр, гостьовий реєстр, центр аутентифікації та реєстр апаратури (останній є не у всіх системах).

Домашній реєстр (домашній реєстр місця розташування – Home Location Register, HLR) містить відомості про всіх абонентів, зареєстрованих у даній системі, і про види послуг, які можуть бути їм зроблені, тому що при укладанні договору на обслуговування для різних абонентів може бути передбачене надання різних наборів послуг. Тут же фіксується місце розташування абонента для організації його виклику та реєструються фактично зроблені послуги.

Гостьовий реєстр (гостьовий реєстр місця розташування – Visitor Location Register, VLR) містить приблизно такі ж відомості про абонентів-гостей, тобто про абонентів, зареєстрованих в іншій мережі стільникового зв'язку, але вони користуються в дійсний час послугами зв'язку у даній мережі того ж стандарту.

Центр аутентифікації (Authentication Center) забезпечує процедури аутентифікації (перевірки дійсності) абонентів і шифрування повідомлень.

Реєстр апаратури (реєстр ідентифікації апаратури – Equipment Identity Register) містить відомості про експлуатовані рухомі станції на предмет їхньої справності й санкціонованого використання. Зокрема у ньому можуть відзначатися украдені абонентські апарати, а також апарати, що мають технічні дефекти, які, наприклад, є джерелами завад неприпустимо високого рівня. Як і у базовій станції, у центрі комутації передбачається резервування основних елементів апаратури, включаючи джерело живлення, процесори та бази даних.

Бази даних часто не входять до складу центра комутації, а реалізуються у вигляді окремих елементів. Крім того, пристрій центра комутації може бути істотно різним у виконанні різних фірм-виробників. Якщо інтерфейс між центром комутації й базових станцій не відповідає загальноприйнятому стандарту, або такий загальноприйнятий стандарт взагалі відсутній, виникає необхідність використовувати базові станції й центр комутації однієї й тієї ж фірми-виробника.

1.6 Структура базової станції

Для організації декількох частотних каналів на БС є відповідне число приймачів і передавачів, що дозволяє вести одночасну роботу на декількох каналах з різними частотами. Група приймачів і передавачів можуть підключатися до загальної антени. Однак найчастіше базова станція має різні антени на прийом і на передачу. Для боротьби з багатопроблемним завмиранням у деяких системах використовується метод рознесеного прийому. У цьому випадку БС має дві приймальні антени (рис. 1.8).

Одноийменні приймачі й передавачі мають загальні опорні генератори, що забезпечують їхню узгоджену перебудову при переході з одного каналу

на інший. Конкретне число N приймачів-передавачів залежить від конструкції й комплектації БС. Для забезпечення одночасної роботи N приймачів на одну приймальну антену між прийомною антеною й приймачами встановлюється роздільник потужності на N виходів. Для роботи N передавачів з однією передавальною антеною між ними встановлюється суматор потужності на N входів.

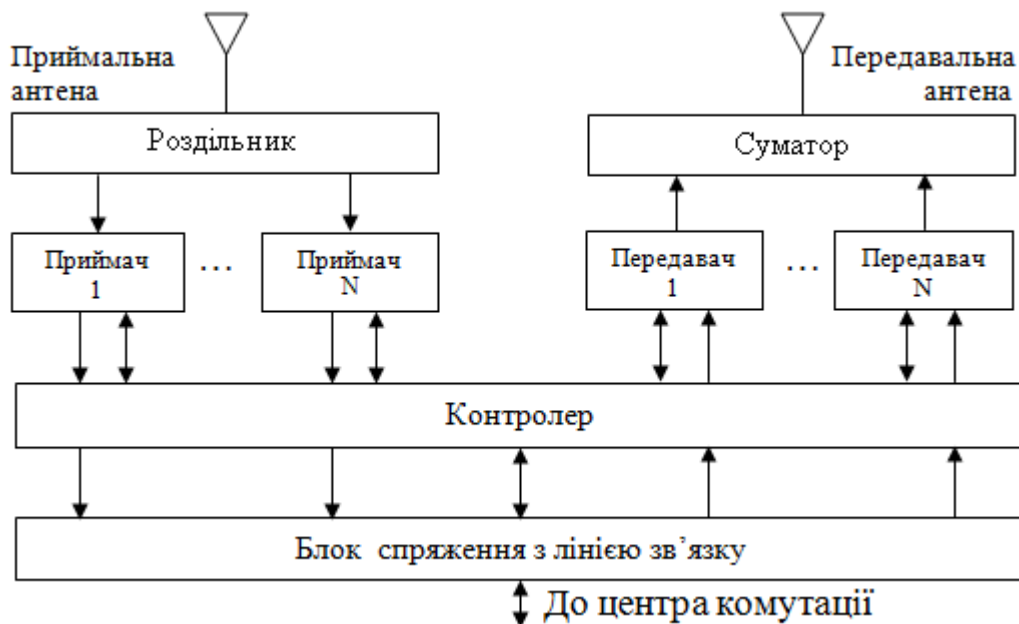


Рисунок 1.8 – Блок-схема базової станції

Блок сполучення з лінією зв'язку забезпечує узгодження устаткування БС із лінією для передачі інформації від контролера на центр комутації й навпаки. Як лінія зв'язку БС зі ЦК звичайно використовується радіорелейна або ІКМ-лінія, якщо вони не розташовуються територіально в одному місці.

Контролер БС являє собою потужний комп'ютер, що забезпечує керування роботою станції, а також контроль роботоздатності всіх блоків і вузлів, що входять до неї.

Для забезпечення достатнього ступеня надійності багато блоків і вузлів БС резервуються. До складу станції також включаються автономні джерела безперебійного живлення (акумулятори). Оскільки апаратури БС споживає значну потужність і виділяє велику кількість тепла, у ній передбачаються спеціальні пристрої охолодження.

1.7 Структура рухомої станції

Будь-яку рухому станцію умовно можна розділити на три основних блоки (рис. 1.9):

- антенний блок;

- блок керування;
- приймально-передавальний блок.

Антенний блок складається із самої антени, що являє собою чвертьхвильовий штир, і дуплексного роздільника каналів прийому й передачі.

Блок керування включає мікрофон, динамік, клавіатуру та дисплей.

Більше складним за своєю структурою є *приймально-передавальний блок*. Для аналогових рухомих станцій характерна відсутність АЦП/ЦАП і кодків. До складу передавача цифрової рухомої станції входять такі елементи:

- аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) – для перетворення сигналу з виходу мікрофона в цифрову форму;
- кодер мови здійснює кодування мовного сигналу, тобто перетворення цифрового сигналу за певними законами з метою скорочення обсягу інформації, переданої по каналі зв'язку;
- кодер каналу – додає в цифровий сигнал, одержуваний з виходу кодера мови, додаткову (надлишкову) інформацію, призначену для захисту від помилок при передачі сигналу по лінії зв'язку; крім того, кодер каналу вводить до складу переданого сигналу інформацію керування, що надходить від логічного блока;
- модулятор – здійснює перенесення інформації кодованого цифрового сигналу на несучу частоту.

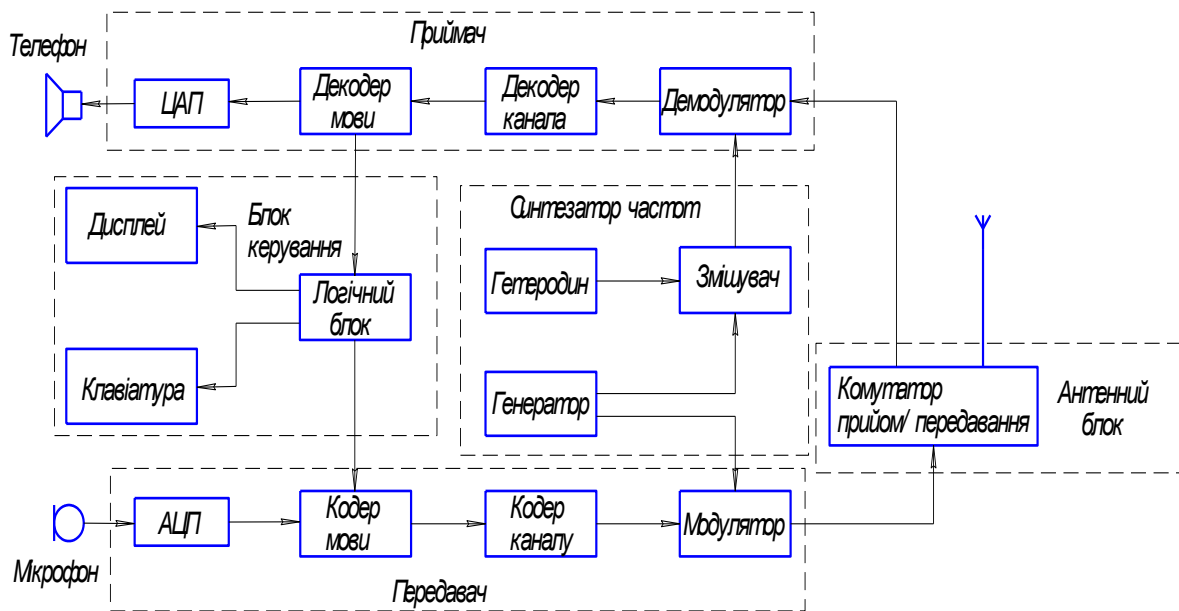


Рисунок 1.9 – Блок-схема рухомої станції

Приймач за складом в основному відповідає передавачу зі зворотними функціями вбудованих у нього блоків:

- демодулятор виділяє з модульованого радіосигналу кодований сигнал, що несе інформацію;

- еквалайзер служить для часткової компенсації спотворень сигналу внаслідок багатопроменевого поширення; він є адаптивним фільтром, який настроюють за навчальною послідовністю символів, що входить до складу переданої інформації; у деяких випадках блок еквалайзера може бути відсутній.
- декодер каналу виділяє із вхідного потоку керуючу інформацію та направляє її на логічний блок; прийнята інформація перевіряється на наявність помилок, і виявлені помилки по можливості виправляються;
- декодер мови відновлює сигнал мови, який поступає на нього з кодера каналу, переводячи його в природну форму, із властивою йому надмірністю, але в цифровому вигляді;
- цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) перетворює прийнятий сигнал мови в аналогову форму й подає його на вхід динаміка.

У приймально-передавальний блок також входить логічний блок і синтезатор частот. Логічний блок – це мікрокомп'ютер зі своєю оперативною й постійною пам'яттю, який здійснює керування роботою рухомої станції. Синтезатор є джерелом коливань несучої частоти, використовуваної для передачі інформації з радіоканалу.

1.8 Методи доступу із частотним і часовим розділенням

Поняття *множинного доступу* (multiple access) пов'язане з організацією спільного використання обмеженої ділянки спектра багатьма користувачами. Відомі п'ять варіантів множинного доступу:

- з частотним розділенням каналів зв'язку;
- з часовим розділенням каналів зв'язку;
- з кодовим розділенням каналів зв'язку;
- з просторовим розділенням каналів зв'язку;
- з поляризаційним розділенням каналів зв'язку.

Для стільникового зв'язку практичний інтерес становлять перші три. Четвертий метод фактично використовується при реалізації принципу вторного використання частот, зокрема при розподіленні стільника на сектори з використанням спрямованих антен, але звичайно цей прийом не вважається одним з методів множинного доступу.

Множинний доступ із частотним розділенням (FDMA – Frequency Division Multiple Access) – найбільш простий із трьох методів множинного доступу як за своєю ідеєю, так і за можливістю реалізації. У цьому методі кожному користувачеві на час сеансу зв'язку виділяється один з вільних частотних каналів смугою частот Δf , яку він використовує безроздільно (рис. 1.10).

Метод *FDMA* використовується у всіх аналогових системах стільникового зв'язку (системах першого покоління) – при цьому смуга Δf становить 10...30 кГц. Основне слабе місце *FDMA* – недостатньо ефективне ви-

користання смуги частот. Ця ефективність помітно підвищується при переході до більш досконалого методу розділення каналів – *TDMA*, що дозволяє підвищити ємність мережі стільникового зв'язку.

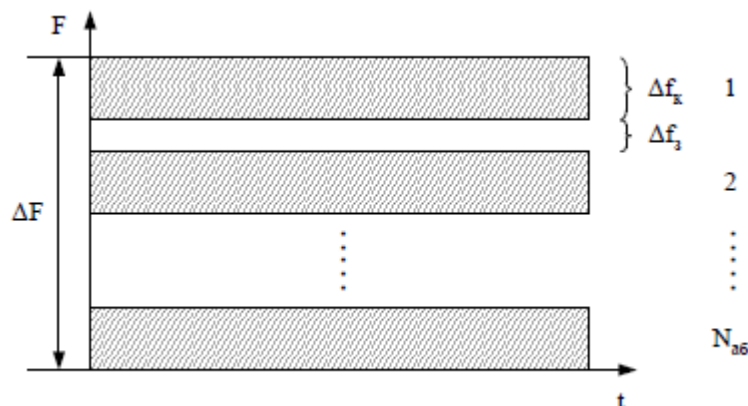


Рисунок 1.10 – Метод частотного розділення каналів (*FDMA*)

Множинний доступ з часовим розділенням (TDMA – Time Division Multiple Access) також досить простий за ідеєю, але значно складніший в реалізації у порівнянні з *FDMA*. Суть методу *TDMA* полягає в тому, що кожен частотний канал розділяється в часі між декількома користувачами, тобто частотний канал по черзі надається декільком користувачам на певні проміжки часу. Як приклад (рис. 1.11) поданий випадок, коли кожен частотний канал ділиться між трьома користувачами. Тут розглядається випадок не одного, а декількох частотних каналів, кожний з яких ділиться в часі між декількома користувачами. Отже, цей метод використовує поєднання методу *FDMA* з *TDMA*. Саме така схема знаходить практичне застосування в цифрових системах стільникового зв'язку й саме її звичайно називають схемою *TDMA*.

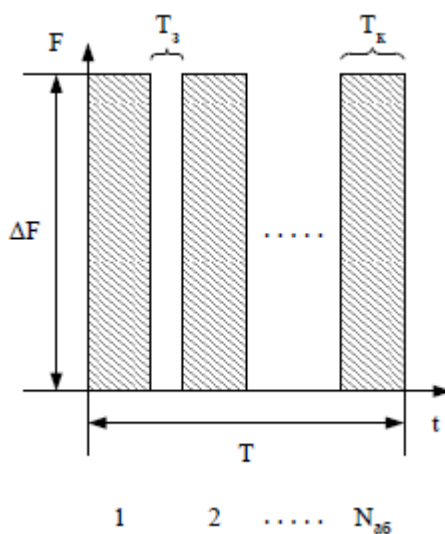


Рисунок 1.11 – Метод часового розділення каналів (*TDMA*)

Практична реалізація методу *TDMA* вимагає перетворення сигналів у цифрову форму й «стиску» інформації в часі. Цифрова обробка сигналів і схема *TDMA* використовуються в стандартах стільникового зв'язку другого покоління *D-AMPS*, *GSM* й інших. Наприклад, у стандарті *D-AMPS* при збереженні тієї ж смуги частотного каналу $\Delta f = 30$ кГц, що й в аналоговому стандарті *AMPS*, число фізичних каналів у ньому зростає втричі.

Крім того, розділення у часі може використовуватися й для реалізації прямих і зворотних каналів дуплексного зв'язку (часовий дуплекс) в одній і тій же смузі частот (*TDD – Time Division Duplex*). Таке технічне рішення знаходить застосування в системах бездротових телефонів стандарту DECT. У стільниковому зв'язку звичайно використовується дуплексне розділення за частотою (*FDD – Frequency Division Duplex*), тобто прямі й зворотні канали займають різні смуги частот, зміщені одна відносно одної.

Метод *TDMA* сам по собі не реалізує всіх потенційних можливостей за ефективністю використання спектра. Додаткові резерви відкриваються при використанні ієрархічних структур й адаптивного розділення каналів.

1.9 Метод доступу з кодовим розділенням

Множинний доступ з кодовим розділенням (CDMA – Code Division Multiple Access) є досить складним не тільки за принципом побудови, але й з погляду практичної реалізації. При використанні цього методу більша група користувачів одночасно використовує загальну відносно широку смугу частот – не менше 1 МГц (рис. 1.12).

Особливістю методу *CDMA* є робота в широкій смузі частот, яка значно перевищує смугу мовного сигналу. При цьому для розрізнення каналів однієї базової станції інформація кожного каналу модулюється спеціальною кодовою послідовністю, що формується за допомогою функції Уолша. *Функції Уолша* широко використовуються в цифровій обробці сигналів й є дискретним аналогом синусоїд кратних частот.

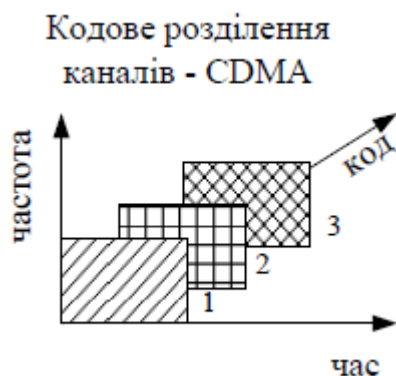


Рисунок 1.12 – Метод кодового розділення каналів (*CDMA*)

У приймачі є можливість виділення інформації із загальної широкої смуги, що використовується одночасно всіма фізичними каналами. Прин-

цип кодової модуляції й демодуляції поданий на рис. 1.13.

Система зв'язку, що реалізує метод *CDMA*, є системою з *розширеним спектром (spread spectrum)*. Спектр інформаційного повідомлення штучно розширюється за допомогою модуляції (кодування) періодичною псевдовипадковою послідовністю імпульсів з досить малим дискретом. Для одержання ширини спектра більше 1 МГц тривалість дискрета моделюючої послідовності повинна бути менша 1 мкс. Розширення спектра за рахунок модуляції псевдовипадковою послідовністю в сполученні з кодовим розділенням фізичних каналів визначають такі переваги методу *CDMA*, як високу завадостійкість, гарну пристосованість до умов багатопроменевого поширення, високу ємність системи.

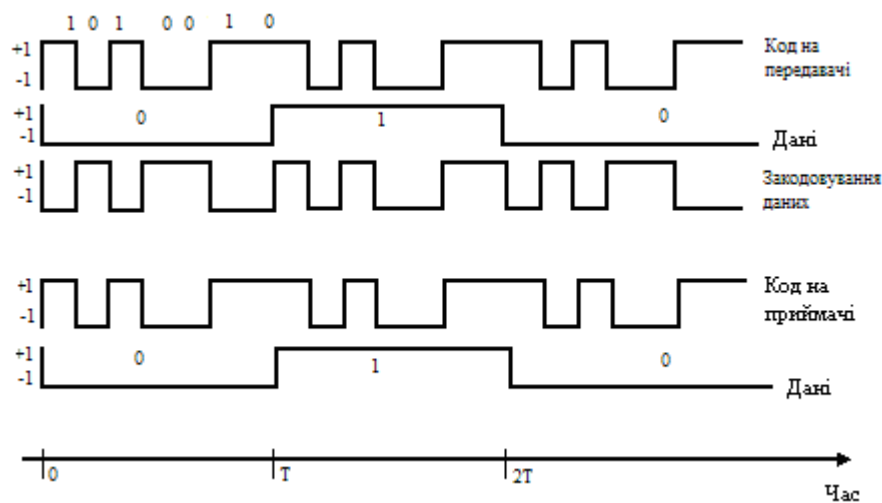


Рисунок 1.13 – Принцип кодової модуляції і демодуляції у методі CDMA

1.10 Побудова мереж зв'язку макро- і мікростільникової структури

Принципи побудови цифрових ССЗ дозволили застосувати при організації стільникових мереж нові більш ефективні моделі повторного використання частот, ніж в аналогових мережах. У результаті без збільшення загальної смуги частот системи зв'язку значно зросла кількість каналів у стільнику. Вид модуляції, способи кодування й формування сигналів у каналах зв'язку, прийняті в GSM, забезпечують прийом сигналів з теоретично досяжним відношенням сигнал/завада 9 дБ, у той час як в аналогових системах той же показник дорівнює 17...18 дБ, Тому передавачі базових станцій, що працюють на збіжних частотах, можуть розміщатися більш близько один до одного без втрати високої якості прийому повідомлень.

У загальному випадку відстань D між центрами стільників, у яких використовуються однакові смуги частот, пов'язана із кількістю стільників N у зоні з неповторюваними частотами (кластері) співвідношенням

$$D = \sqrt{3NR},$$

де R - радіус стільника (радіус кола, описаного навколо правильного шестикутника).

У будь-якій ССЗ ємність мереж залежить від кількості каналів зв'язку у стільнику N , що, наприклад, для стандартів з часовим розділенням каналів визначається виразом

$$N = \frac{F}{kf},$$

де F – смуга частот ССПС;

$f = F_k/n$ – еквівалентна смуга частот, що виділяється на один мовний канал;

F_k – смуга частот одного радіоканалу;

n – число часових позицій в TDMA кадрі;

F/f – число мовних каналів зв'язку;

k – коефіцієнт повторного використання частот.

Наступний крок розвитку стільникових систем рухомого зв'язку після введення цифрової технології – перехід до мікростільникової структури мереж. При радіусі стільників у кілька сотень метрів ємність мережі може бути збільшена в 5...10 разів у порівнянні з макростільниками. Крім того, можливе застосування абонентських радіостанцій існуючих стандартів цифрових ССЗ поряд з портативними малопотужними абонентськими радіостанціями, що служать основою для створення систем персонального зв'язку (PCS).

Мікростільникова структура ССЗ органічно сполучається з макростільниками. Мікростільники будуються на основі БС невеликої потужності, що обслуговують ділянки вулиць, приміщення в будинках (магазини, аеропорти, вокзали й т. д.). Мікростільникова структура може розглядатися як розвиток устаткування макростільникової базової станції з керуванням єдиним контролером. Мікростільники беруть на себе навантаження від абонентів, що повільно переміщуються, наприклад пішоходів і нерухомих автомобілів. Приклад побудови мережі з використанням мікростільників подано на рис. 1.14.

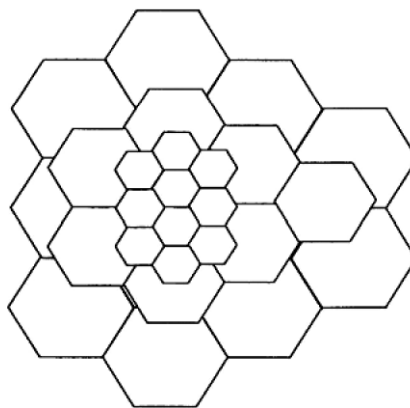


Рисунок 1.14 – Використання стільників менших розмірів у районах з інтенсивним трафіком

Мікростільникова структура використовується також при реалізації мереж у рамках концепції персонального зв'язку (PCN), які в Європі створюються на основі стандарту GSM-1900. У структуру мережі передбачається введення пікосот з радіусом дії 10...60 м. Вони призначені для обслуговування абонентів у міських районах з великою щільністю населення й у закритих зонах (офіси, житлові приміщення, підземні гаражі, вокзали й т. д.).

1.11 Методи збільшення ємності мережі стільникового зв'язку

У рамках макростільникової структури мереж зв'язку, на основі якої побудовані існуючі аналогові та цифрові ССЗ, подальше збільшення їхньої ємності може бути досягнуто розширенням використовуваної смуги частот і зниженням рівня каналних завад, що дає можливість частіше повторювати частоти. Перший спосіб очевидний, але рідко реалізується через дефіцит частотного ресурсу. Другий спосіб оснований на методах, що дозволяють знизити рівень завад по збіжних каналах:

- зменшення радіуса дії стільників у районах з інтенсивним трафіком;
- застосування секторних антен у стільниках;
- адаптивне розділення каналів по стільниках з урахуванням навантаження;
- використання інтелектуальних антенних систем.

Перший метод ґрунтується на використанні багаторівневих (ієрархічних) схем побудови стільникової мережі. При цьому число базових станцій збільшується, а потужність випромінювання сигналу в мікростільниках зменшується. Той же ефект досягається при використанні на БС секторних антен.

Третій метод оснований на адаптивному розділенні каналів, при якому частотні канали, всі або частково, перебувають в оперативному розпорядженні центра комутації. Центр комутації виділяє канали для користування окремим стільникам (базовим станціям) по мірі надходження викликів, тобто відповідно до реальної інтенсивності трафіка, але при дотриманні необхідного територіально-частотного рознесення. Такий адаптивний алгоритм є більш складним, але забезпечує підвищення ємності за рахунок гнучкого відстеження змін реального навантаження. Алгоритми адаптивного розділення каналів використовуються в системах бездротової телефонії.

У цей час розвивається новий напрямок у рухомому зв'язку, оснований на використанні інтелектуальних антенних систем, що автоматично перебудовують свої діаграми спрямованості на джерело випромінювання сигналу (рис. 1.15).

Використання інтелектуальних антенних систем до останнього часу в

комерційних системах було не вигідне до появи дешевих сигнальних процесорів, зручних для реалізації алгоритмів керування діаграмою спрямованості антен, розроблених відповідно до цифрових стільникових систем зв'язку.

Спосіб побудови інтелектуальних антенних систем оснований на збільшенні коефіцієнта підсилення антени в напрямку абонентської станції. При цьому адаптивні антени забезпечують максимальний коефіцієнт підсилення та мінімальний рівень каналних завад.

Інтелектуальна антенна система складається з декількох антен, об'єднаних електронною схемою з фазовими й амплітудними аналізаторами. У результаті аналізу прийнятих сигналів, що надходять на різні елементи антени, обчислюється напрямок оптимального прийому. Сигнальний процесор у реальному масштабі часу формує сумарну діаграму спрямованості антен на джерело випромінювань з урахуванням частоти прийнятого сигналу й деяких інших параметрів. Практична реалізація інтелектуальних антенних систем є перспективною для мереж стільникового зв'язку третього покоління, а також стандартів GSM, DECT і т. д.

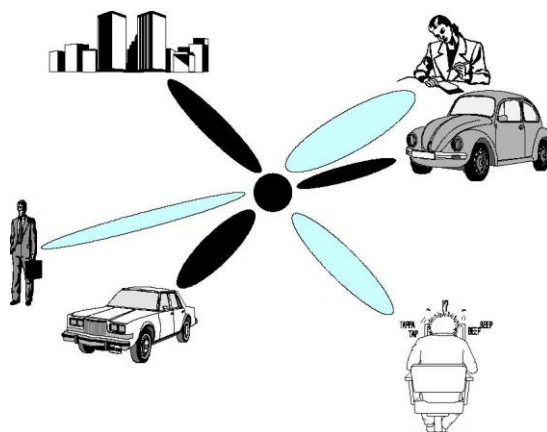


Рисунок 1. 15 – Технологія інтелектуальних антен

1.12 Перспективні мережі стільникового зв'язку

На етапі створення ССЗ другого покоління топологічний розвиток мереж на принципах переходу від макростільників до мікро- і пікостільників, а також впровадження ефективних методів повторного використання частот служать основними напрямками збільшення їхньої ємності. Якщо не враховувати перехід на напівшвидкісні канали зв'язку, то ріст ємності ССЗ другого покоління може відбуватися тільки шляхом переведення існуючих стандартів у нові діапазони частот. Як приклад можна навести поширення рекомендацій стандарту GSM-900 на стандарт GSM-1800.

Подальше збільшення ємності ССЗ без значного розширення робочої смуги частот можливе при створенні нових протоколів зв'язку та методів керування мережею, що включає процедури розділення частотних і часо-

вих каналів по мережі, визначення положення рухомих абонентів та «естафетної передачі». Дані завдання вирішуються в рамках створення ССЗ третього покоління, які будуть відрізнятися уніфікованою системою радіодоступу, що поєднує існуючі стільникові й бездротові системи з інформаційними службами XXI століття.

У сполученні із широкосмуговими мережами ISDN (B-ISDN) ССЗ третього покоління будуть мати архітектуру єдиної мережі й надавати зв'язок абонентам у різних умовах, включаючи транспорт, що рухається, житлові приміщення, офіси й т. д. У Європі ведуться роботи зі створення ССЗ третього покоління, що одержала назва UMTS (універсальна система рухомого зв'язку). Передбачається об'єднання функціональних можливостей існуючих систем у єдину систему третього покоління з наданням стандартизованих послуг рухомого зв'язку (стільникового, бездротового, персонального виклику й т. д.). Одне із завдань проекту – створення універсального радіотерміналу, що забезпечує всі види послуг зв'язку (мова, дані, відео і т. д.) при швидкості передачі інформації з радіоканалу 2 Мбіт/с в умовах мікростільникової та пікостільникової структур мережі.

Сьогодні в рамках створення UMTS досліджуються принципи побудови каналів зв'язку й керування, а також розглядаються методи доступу, модуляція й кодування повідомлень, організація керування, аутентифікація абонентів і шифрування повідомлень із обліком міжмережної взаємодії.

Роботи зі створення єдиної міжнародної мережі рухомого зв'язку третього покоління проводяться Міжнародним союзом електрозв'язку (МСЕ). Для системи рухомого зв'язку загального користування третього покоління рекомендується діапазон частот 1...3 ГГц.

Запитання для самоперевірки

1. Охарактеризуйте всі покоління стільникового зв'язку.
2. Поясніть принцип повторного використання частот.
3. Охарактеризуйте канал виклику.
4. Поясніть алгоритм функціонування системи стільникового зв'язку.
5. Наведіть структуру базової станції.
6. Що таке кластер?
7. Охарактеризуйте множинний доступ з кодовим розділенням.
8. Наведіть методи збільшення ємності мережі стільникового зв'язку.

2 АНАЛОГОВІ СИСТЕМИ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

2.1 Система стільникового зв'язку стандарту NMT

2.1.1 Принципи організації

Спочатку системи стандарту NMT (Nordic Mobile Telephone) були призначені для п'яти північноєвропейських країн. Це були аналогові системи першого покоління, що працювали в діапазоні 450-467 МГц і мали 180 каналів зв'язку із шириною смуги по 25 кГц кожний. За рахунок багаторазового використання частот ефективна кількість каналів складала 5568.

Характерною рисою стандарту є те, що всі рухомі абоненти мають можливість працювати в кожній із країн, що входять у систему, завдяки тому, що рухомі станції цілком сумісні з усіма базовими станціями даної системи будь-якої країни.

До основних переваг стандарту NMT варто віднести надійну роботу на відкритих просторах і можливість брати телефон із собою в подорож в ті країни, де використовується цей стандарт. Система стільникового зв'язку стандарту NMT забезпечує:

1. Вхідження в зв'язок і реєстрацію вартості розмови в автоматичному режимі;
2. Організацію зв'язку між рухомим абонентом і будь-яким абонентом стаціонарної телефонної мережі або з будь-якою включеною в систему рухомою станцією, незалежно від країни;
3. Автоматичний пошук рухомого абонента в межах об'єднаних мереж стільникового зв'язку.

Системи стільникового зв'язку цього стандарту, окрім передачі мовних повідомлень на місцевому, міжміському і міжнародному рівнях, дозволяють відправляти телефакси і мати доступ до різних баз даних (швидкість передачі даних не повинна перевищувати 4,8 Кбіт/с), а також надають абонентам такі сервісні послуги: переадресацію виклику на інший номер, обмеження виклику (тривалості розмови), конференц-зв'язок трьох абонентів, організацію груп користувачів зі скороченим набором номера і под.

Основні характеристики стандарту NMT-450 збережені у NMT-900, більш нової його версії. Основні технічні характеристики стандартів наведені у табл.2.1.

Оскільки загальна кількість каналів обмежена (рознесення частот сусідніх каналів дорівнює 20-25 кГц), то для того, щоб збільшити абонентську ємність системи, передбачається організація малих зон зв'язку.

Таблиця 2.1 – Характеристики стандартів NMT-450 і NMT-900

Найменування параметра	NMT-450	NMT-900
Смуга частот: для передачі рухомою станцією, МГц	453,0-457,5	890-915
для прийому рухомою станцією, МГц	463,0-467,5	935-960
Частотне рознесення каналів, кГц	25	25
Кількість каналів	180	999
Дуплексне рознесення каналів прийому і передачі, МГц	10	45
Потужність передавача базової станції, Вт	до 50	до 25
Потужність передавача рухомої станції, Вт	15 1,5 0,15	6 1 0,1
Радіус комірки, км	15-40	2-20

2.1.2 Склад системи

Система стільникового зв'язку стандарту NMT призначена для обслуговування наземних рухомих абонентів, але може бути використана і морськими рухомими службами поблизу берега. Принцип роботи системи оснований на взаємодії з телефонною мережею загального користування. Структурна схема такої типової мережі подана на рис. 2.1.

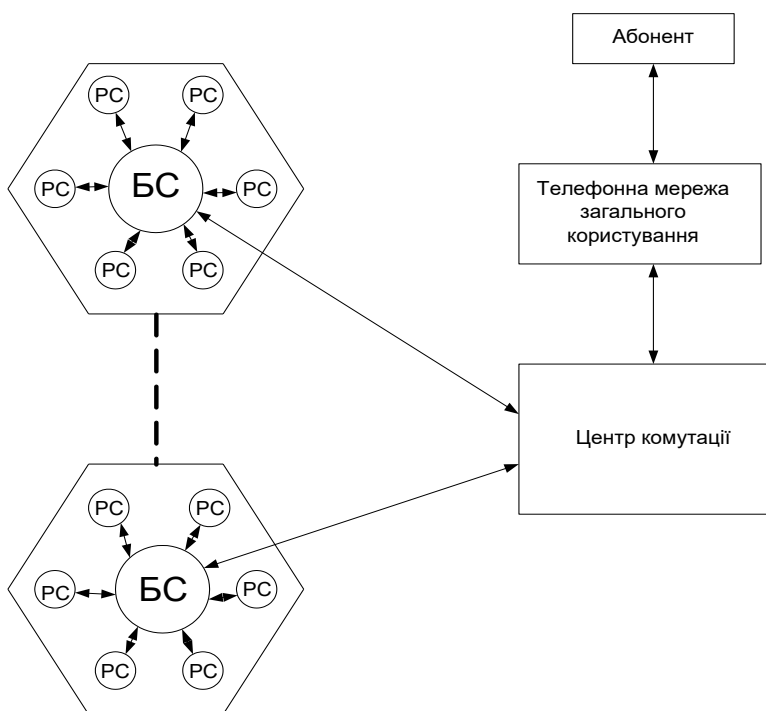


Рисунок 2.1 – Структурна схема мережі стандарту NMT

До складу мережі входять:

1. Центр комутації рухомого зв'язку (ЦК);
2. Базові станції (БС);
3. Рухомі станції (РС);
4. Різні контролери.

Центр комутації рухомого зв'язку забезпечує керування системою рухомого радіозв'язку і є сполучною ланкою між рухомими станціями і телефонною мережею загального користування. Кожен такий центр обслуговує групу базових станцій, сукупність яких утворює *його зону обслуговування*. Система спроектована таким чином, що, в залежності від значимості абонентів, вона може надавати їм деякі переваги в обслуговуванні, наприклад, пріоритет виклику, скорочений набір і под.

Канали зв'язку кожної базової станції підрозділяються на *розмовні канали* і *канали керування* (виклику). По каналі керування передається спеціальний сигнал впізнавання. По вільних розмовних каналах транслюється інший сигнал впізнавання, який підтверджує, що канал вільний і може бути використаний для проведення переговорів. Усі рухомі станції, що знаходяться в зоні дії базових станцій, постійно працюють на прийом на частоті каналу керування. У випадку, коли всі розмовні канали зайняті, допускається використання каналу керування для ведення розмови.

У системі стандарту NMT для обміну службовою інформацією між ЦК, БС і РС, окрім службових сигналів, що визначають канали керування і розмовні канали, використовуються сигнали, що визначають зону обслуговування, країну, у якій знаходиться рухомий абонент, а також сигнали, що позначають номер каналу. Усі ці службові сигнали є цифровими і формуються за допомогою швидкої частотної маніпуляції FFSK (Fast Frequency Shift Keying). Частотний спектр і фаза FFSK сигналів при передачі цифрової послідовності подані на рис. 2.2. З цього рисунка видно, що цифровий сигнал, визначений як логічна одиниця, являє собою один період колювання частотою 1200 Гц, а сигнал логічного нуля – півтора періоду колювання частотою 1800 Гц. Таким чином можна сказати, що цифровий сигнал передається по каналі зв'язку зі швидкістю 1200 біт/с.

Службова інформація в системі стандарту NMT передається в 64-розрядному пакеті і розташовується в середині повного робочого кадру. Кожен такий пакет містить п'ять полів (рис. 2.3):

1. Номер каналу $N_1N_2N_3$, по якому передається дане повідомлення;
2. Префікс P, що характеризує тип кадру;
3. Номер району обслуговування Y_1Y_2 , де розташована базова станція з номером каналу $N_1N_2N_3$;
4. Номер рухомої станції X_1-X_7 ;
5. Інформаційне поле.

При передачі в напрямку ЦК-РС інформаційне поле містить 12 бітів; у напрямку РС-ЦК номер району обслуговування Y_1Y_2 не передається, інформаційне поле містить 20 біт. Як керуючий може використовуватися

кожний з розмовних радіоканалів, що підвищує ефективність керування стільниковою системою зв'язку.

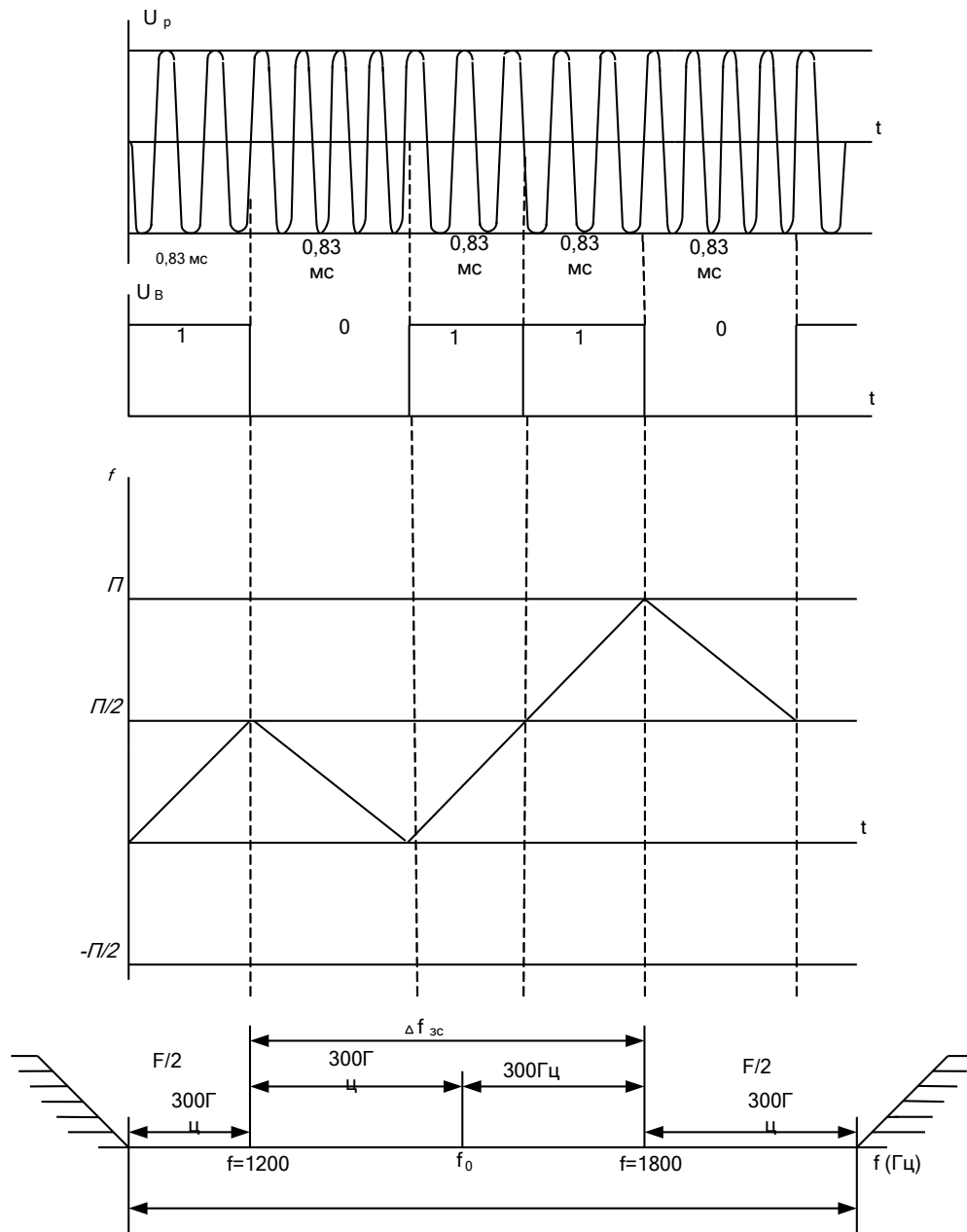


Рисунок 2.2 – Частотний спектр і фаза FFSK сигналів при передачі цифрової послідовності

2.1.3 Організація з'єднань і принципи адресації абонентів

У системі стандарту NMT виклик усіх типів рухомих станцій здійснюється одночасно всіма базовими станціями, розташованими в зоні стійкого зв'язку. Коли рухома станція приймає сигнал виклику, що містить її пізнавальний номер (номер радіотелефону), вона відповідає сигналом підтвердження на відповідній частоті каналу керування. Після цього ЦК передає канал зв'язку тієї базової станції, у стільнику якої виявився абонент.

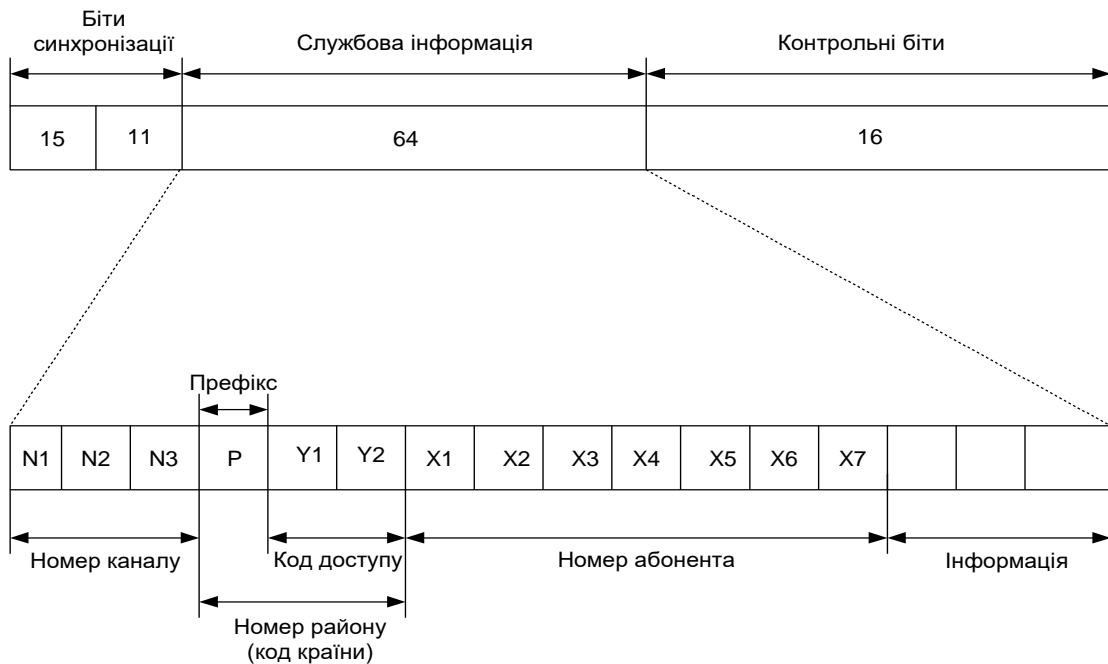


Рисунок 2.3 – Структура повного робочого кадру стандарту NMT

Для організації всіх з'єднань у системі стільникового зв'язку використовується спеціальна схема адресації, що виконує такі задачі:

1. Дає можливість викликаючому абонентові інформувати телефонну мережу про номер викликуваної рухомої станції;
2. Слугує для передачі інформації в телефонну мережу;
3. Дає можливість рухомій станції відповідати на виклик ЦК;
4. Впізнавати в ЦК викликаючу станцію.

В усіх країнах рухомі абоненти радіотелефонної мережі ідентифікуються номером $Z \times 1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5 \times 6 \times 7$, що є наявним у всіх передачах у напрямках:

1. ЦК-ЦК;
2. ЦК-РС;
3. ЦК-БС.

Цифра, позначена літерою Z , використовується тільки всередині самої системи, а не викликаючим абонентом. При виклику рухомого абонента ця цифра додається до номера абонента тим радіотелефонним комутатором, у зоні обслуговування якого він знаходиться.

При передачі від рухомого абонента вона автоматично формується його станцією.

Крім того, формується ще код доступу, що складається з префікса R_p (0 або 9) і двох цифр $M_1 M_2$, а при організації міжнародного виклику замість коду доступу – код країни $I_1 I_2 I_3$, після чого службова інформація посилається в ефір.

2.1.4 Встановлення вхідного виклику

Протокол встановлення вхідного виклику в системі NMT побудований у такий спосіб. У вихідному стані рухома станція РС налаштована на частоту каналу керування, що має максимальний рівень сигналу. Виклик абонента здійснюється центром комутації ЦК через всі базові станції БС, що відносяться до так званої зони виклику, в якій розташований рухомий абонент у даний момент часу.

Під час подачі виклику базова станція БС (за командою ЦК) постійно випромінює контрольний сигнал (тональний сигнал частотою близько 4 кГц) і посилає його в бік рухомої станції РС, що ретранслює цей сигнал по каналу керування на базову станцію (рис. 2.4). Ретрансльований сигнал приймається, детектується і оцінюється базовою станцією (визначається відношення сигнал/шум у каналі передачі, усереднене за певний проміжок часу). Базові станції БС посилають інформацію про результати оцінювання відношення сигнал/шум у центр ЦК. Якщо якість передачі сигналу відповідає нормі, то встановлюється з'єднання по цьому каналі. Апаратурою ЦК виділяється розмовний радіоканал, номер якого повідомляється по каналу керування на РС, після чого канал керування звільняється. У протилежному випадку ЦК приймає рішення про підключення іншої базової станції або про закінчення розмови.

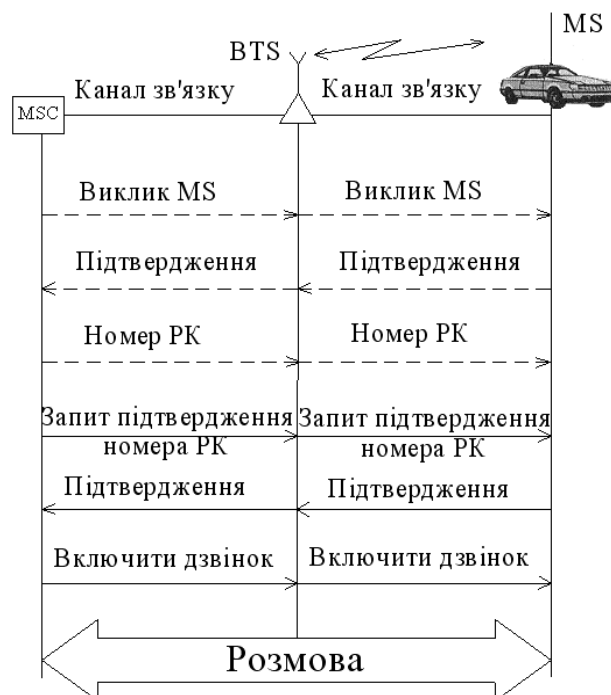


Рисунок 2.4 – Діаграма встановлення вхідного виклику

Потім здійснюється контроль встановленого між БС і ЦК розмовного каналу на правильність виконаних операцій. При цьому, за запитом ЦК, рухома станція РС передає раніше прийнятий номер радіоканалу, що ідентифікується в центрі комутації. У випадку відсутності помилок центр ко-

мутації передає команду виклику "Включити дзвінок". Вхідний виклик завершується остаточним переключенням на розмовний канал і включенням на відповідній базовій станції БС тонального сигналу частотою 4 кГц для безперервного контролю якості зв'язку.

2.1.5 Встановлення вихідного виклику

Якщо рухомий абонент знімає трубку (підключається до лінії) для організації вихідного виклику, то він набирає номер, який переписується у запам'ятовуючий пристрій (ЗП) його станції. Після цього станція знаходить один з вільних розмовних каналів і по ньому передає сигнал "Канал зайнятий". З боку центра ЦК виробляється підтвердження прийняття цього сигналу, у відповідь на який рухома станція видає своє підтвердження. При одержанні цього підтвердження апаратура ЦК передає на РС сигнал готовності до прийому номера. Із ЗП рухомої станції по розмовному радіоканалу транслюється номер викликуваного абонента, і після підтвердження прийому номера центром комутації ЦК провідна телефонна пара стикується з радіотрактом. Відповідь викликуваного абонента служить підставою для формування розмовного тракту і включення на базовій станції тонального сигналу частотою 4 кГц для контролю якості передачі.

Таким чином, обмін сигналами в системі стандарту NMT ведеться по розмовних радіоканалах, система працює зі взаємним багаторазовим підтвердженням прийому кожного сигналу, що забезпечує високу надійність зв'язку.

2.1.6 Обмін повідомленнями в режимі естафетної передачі

У режимі естафетної передачі в системі стандарту NMT протокол обміну повідомленнями (message) побудовано у такий спосіб. Контроль за якістю мови ведеться по тональному сигналу частотою 4 кГц, який вводиться в розмовний тракт на базовій станції БС1 (рис. 2.5). Цей сигнал випромінюється разом з мовним сигналом в сторону рухомої станції РС і ретранслюється на базову станцію, де виконується оцінювання його параметрів. При зменшенні рівня відповідного сигналу нижче граничного значення центр ЦК видає на сусідні базові станції БС2 і БС3 команду провести вимірювання відношення сигнал/шум з вказуванням номера радіоканалу РК1, що використовується в даний момент. З цією метою всі базові станції мають багатоканальні приймачі-монітори. За результатами отриманих вимірювань ЦК обирає базову станцію з максимальним значенням рівня прийнятого сигналу (наприклад, БС2) і виділяє вільний радіоканал РК2 у зоні дії цієї станції. По радіоканалу РК1 через станцію БС1 на РС передається номер нового радіоканалу РК2, по якому апаратури абонента і центра комутації взаємодіють за допомогою сигналів "передача-підтвердження". Після закінчення обміну ЦК виконує переключення відповідних пристроїв і провідної телефонної пари для продовження розмови по новому розмовному каналу. Після переключення всіх необхідних кіл з базової станції БС1

на базову станцію БС2 центр комутації ЦК відключає телефонну пару, з'єднану з радіоканалом РК1, на станції БС1.

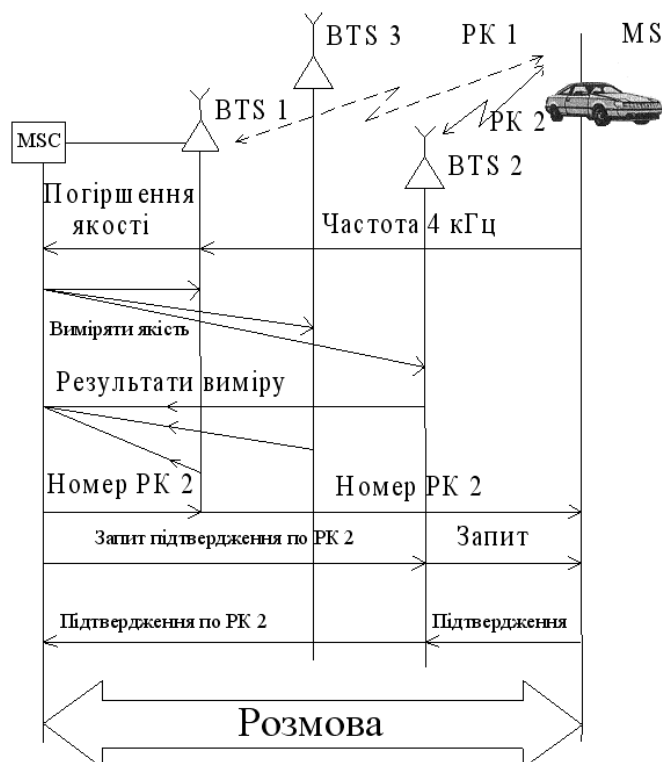


Рисунок 2.5 – Обмін повідомленнями у режимі естафетної передачі

2.2 Система стільникового зв'язку стандарту AMPS

2.2.1 Принципи побудови і загальні характеристики

Система стільникового рухомого зв'язку стандарту AMPS (Advanced Mobile Phone Service) працює в частотному діапазоні 825 - 890 МГц і має 666 дуплексних каналів при ширині смуги частот кожного каналу 30кГц. Потужність передавача базової станції складає 45 Вт, автомобільної рухомої станції – 12 Вт, переносного апарата – 1 Вт. У системі використаний ряд оригінальних технічних рішень, спрямованих на забезпечення якісного зв'язку при мінімальній вартості устаткування. На основі цього стандарту розроблено дві його модифікації: аналогову N-AMPS і цифрову D-AMPS. Обидві вони були створені, у першу чергу, для розміщення у виділеній смузі частот більшої кількості розмовних каналів. У N-AMPS це досягається використанням більш вузьких смуг частот каналів, а в D-AMPS – використанням часового розділення каналів.

У системі стандарту AMPS застосовуються базові станції з антенами, що мають ширину діаграми спрямованості 120°, які встановлюються у кутах стільників (рис. 2.6). Базові станції підключені до центрів комутації за допомогою провідних ліній, по яких передаються мовні сигнали і службова інформація. Довжина керуючого повідомлення, переданого абонентові, складає 463 біти.

У системі використовується принцип рознесеного прийому сигналів, тому базові станції мають по дві антени і відповідні смугові фільтри. Приймач - двоканальний, з подвійним перетворенням частоти в кожному каналі. Блок контролю здійснює діагностику стану станції. Для ухвалення рішення про переключення каналів у системі ведеться періодичний контроль якості кожного з них шляхом вимірювання інтенсивності прийнятого сигналу (напруженості поля) за допомогою спеціального приймача. Інформація про рівень сигналу в контрольованому каналі передається в центр комутації, де виконується порівняння прийнятої інформації з аналогічними даними сусідніх базових станцій і, у разі потреби, приймається рішення про переключення абонента на іншу базову станцію.

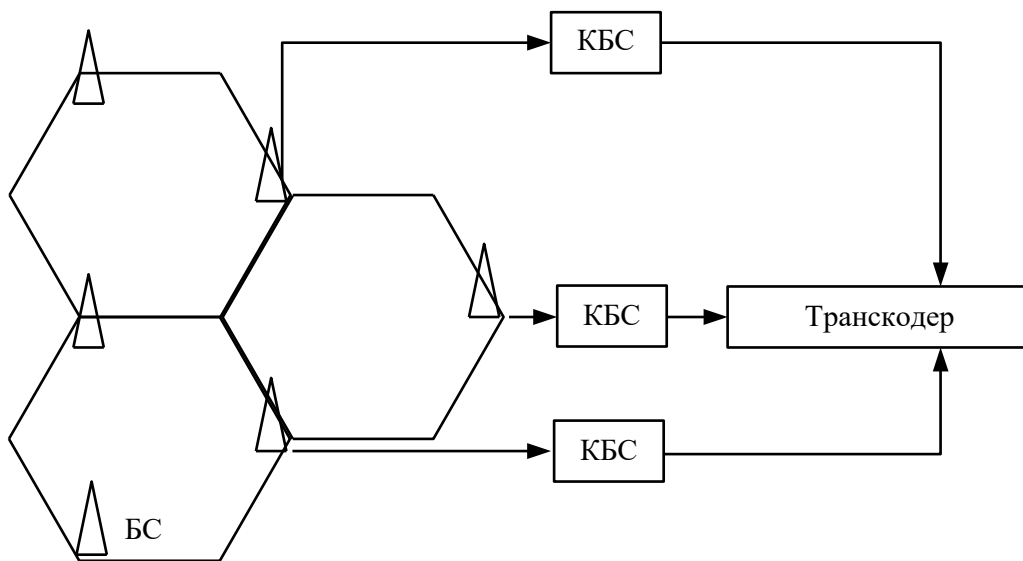


Рисунок 2.6 – Структурна схема стільникової мережі стандарту AMPS

Рухома станція складається з трьох блоків: приймача-передавача із синтезатором частоти на 666 каналів; блока керування, що складається з клавіатури і панелі індикації, і логічного блока.

Апаратура центра комутації рухомого зв'язку і апаратура базових станцій складається з типових блоків. Апаратура базової станції являє собою комплект апаратури прийому і передачі, процесорів, блока керування і блока контролю. Прикладом такої апаратури може служити універсальна базова станція RBS884 Compact, призначена для стільникових систем стандартів AMPS, D-AMPS і D-AMPS 1900. Вона може працювати як у закритих приміщеннях, так і на відкритому повітрі. У густонаселених районах ця апаратура може монтуватися на дахах будинків, тому що вона захищена герметичним кожухом, стійким до впливу навколишнього середовища, має невеликі габарити (1250×920×510 мм) і масу (190 кг).

Кількість каналів прийому і передачі кожної станції дорівнює 10, вихідна потужність кожного – 1 Вт. Станція проста в монтажі, а введення в

експлуатацію, керування, контроль і конфігурування за частотою здійснюються дистанційно з центра керування. Усі компоненти RBS 884 Comract мають високу надійність і високий ступінь функціональної розв'язки, що зводить до мінімуму ризик виходу станції з ладу при ушкодженні одного з її пристроїв.

Переваги стандарту AMPS:

1. Відносно малий час перемикання на межі зон обслуговування - 250 мс (в NMT-450 1250мс);

2. Надійна система аутентифікації.

Недоліки стандарту AMPS:

1. Відносно слабка завадостійкість — через використання простої кутовій модуляції;

2. Менша, ніж в цифрових стандартах, можливість надання широкого спектра сервісних послуг;

3. Незахищеність від прослуховування. Здійснити прослуховування можна за допомогою будь-якого FM-приймача з нескладним конвертором;

4. Невисока абонентська ємність мереж може збільшувати час додзвону в моменти пікового навантаження. Аналогові модифікації стандарту (E-AMPS і N-AMPS) даної проблеми не вирішили повною мірою;

5. Відсутня сумісність N-AMPS і AMPS/D-AMPS;

6. Відсутність автоматичного роумінгу.

2.2.2 Ефірний інтерфейс стандарту AMPS

У AMPS використовується метод FDMA. При розробленні стандарту на кожній географічній території передбачається присутність двох провайдерів – так званого wireline (дротяного) оператора і non-wireline оператора. Частотний ресурс поділяється між двома компаніями навпіл, діапазон non-wireline оператора отримав назву А-діапазону, а wireline - В-діапазону.

У А-діапазоні телефон передає на частотах 824 – 834 МГц і 845 – 846,5 МГц, а приймає на 869 – 880 МГц і 890 – 891.5 МГц. У В-діапазоні передача здійснюється на 835 – 845 МГц і 846.5 – 849 МГц, а прийом – на 880 – 890 МГц і 891.5 – 894 МГц. Частотні смуги "поділяються" на канали (один канал займає 30 кГц) – кожен діапазон складається з 21 каналу керування і 312 каналів передачі мови. Загальна кількість каналів в AMPS дорівнює 666 (624 голосових і 42 керування).

У AMPS прийнята така класифікація існуючих каналів:

1) канал для передачі голосу до телефону від системи FOVC (FOrward Voice Channel – прямий голосовий канал);

2) канал для передачі голосу від телефону до системи REVC (REverse Voice Channel – зворотний голосовий канал);

3) канал для передачі службовій інформації до телефону від системи FOCC (FOrward Control Channel – прямий службовий канал);

4) канал для передачі службової інформації від телефону до системи

RECC (REverse Control Channel – зворотний службовий канал, іноді його називають REVCC).

Зазвичай прямий і зворотний голосові канали об'єднуються в пари. Наприклад, 207 канал А-діапазону складається з прямого каналу на частоті 876.210 МГц і зворотного 831.210 МГц.

У кожній комірці прямий службовий канал FOCC свій, і він постійно передає інформацію. Це необхідно для того, щоб при реєстрації телефон отримав необхідні дані про мережу, а також для визначення (за рівнем сигналу) межі комірки. У загальному випадку відомості, що передаються по FOCC, можна умовно розділити на три типи:

1) Overhead Messages: повідомлення, що містять дані про систему (так званий SID - System Identification Number – *ідентифікаційний номер стільникової мережі*), про канали виклику; інформацію, необхідну для реєстрації і т. п.

2) Mobile Control Messages: повідомлення, що направляються якомусь певному телефону (це можуть бути сигнали виклику, дані про голосові канали, рівень потужності);

3) Control Filler Messages: сигнал заповнення – передається в паузах між повідомленнями двох перших типів. Сигнал заповнення містить, наприклад, відомості про рівень потужності, на якій телефон повинен передавати дані по зворотному службовому каналу RECC.

При виробництві кожний мобільний телефон AMPS отримує унікальний 32-бітовий *серійний номер* – ESN (Electronic Serial Number), який поміщений в ROM-пам'ять. Крім цього, в кожному AMPS-телефоні існує перезаписувана пам'ять – так званий NAM (Number Assignment Module – *модуль для запису номера*), в якого оператора при укладенні контракту з абонентом записує п'ятизначний SID своєї мережі і десятизначний MIN (Mobile Identification Number – *ідентифікаційний номер телефону*), що означає телефонний номер абонента.

2.2.3 Організація каналів керування

У розглянутій системі використовуються два типи каналів керування: прямий і зворотний. Інформація з прямого каналу керування в напрямку від базової станції до рухомої передається зі швидкістю 8 Кбіт/с безперервним потоком, що, при відсутності інформації для останньої, містить лише контрольний текст. Це є необхідною умовою функціонування системи, тому що у вільному стані приймальний пристрій рухомої станції сканує канали керування, вибираючи канал з найбільш високим рівнем сигналу. Для передачі службової інформації в каналах керування використовуються повідомлення стандартних форматів.

У прямому каналі керування використовуються такі повідомлення стандартних форматів:

1. Про стан відповідного зворотного каналу керування (вільно/зайнято);

2. Інформаційні дані (слова А) для парних номерів абонентів;
3. Інформаційні дані (слова В) для непарних номерів абонентів.

Розряди, що відображають стан зворотного каналу (вільно/зайнято), завжди розташовуються на одних і тих самих позиціях переданого повідомлення, для того щоб спростити їхнє виділення із загального потоку інформації. Об'єднання двох потоків інформації (слова А і слова В) зменшує часовий проміжок, відведений для синхронізуючої послідовності. Достовірність прийнятої інформації збільшується завдяки багаторазовій її передачі (п'ять повторів), що особливо важливо для каналів, де можливі завмирання і інтерференції сигналів. Для забезпечення необхідної достовірності інформаційні слова кодуються і об'єднуються з розрядами корекції помилок. У приймачі здійснюється мажоритарне накопичення послідовностей за відповідними правилами прийняття рішення (3 з 5). У прямому каналі керування кожне кодове слово містить 28 бітів інформації і 12 бітів корекції помилок; у зворотному каналі керування використовуються 36 інформаційних бітів і 12 бітів корекції помилок. Код з такою структурою дозволяє виправляти однократну помилку і виявляти чотири помилки. Інформаційні слова – це складні пакети інформації, розділені на групи або на окремі розряди, кожний з яких визначає параметри системи, цифру в номері, що набирається, і под. Більш точний зміст формату слова залежить від типу повідомлення, а довжина повного інформаційного слова може складати 463 біти.

2.2.4 Встановлення вхідного виклику

Процедура встановлення вхідного виклику в системі стандарту AMPS виконується таким чином. Якщо в центр комутації рухомого зв'язку надходить заявка на встановлення зв'язку з рухомим абонентом від абонента телефонної мережі загального користування або іншого рухомого абонента, тобто заявка на вхідний виклик, то по провідному каналі передачі даних центр дає команду всім базовим станціям, що знаходяться в зоні обслуговування, викликати необхідного рухомого абонента. Цей виклик по каналі керування транслюється на рухому станцію, яка, одержавши його, перевіряє можливість доступу в зворотний канал керування за допомогою прапорця "вільно/зайнято", що міститься в прийнятому повідомленні. Якщо зворотний канал керування вільний, то абонентська станція видає в центр комутації через базову підтвердуюче повідомлення, яке містить особистий номер рухомого абонента.

Центр комутації, прийнявши це повідомлення, аналізує інформацію, що надійшла, визначає номер базової станції, що обслуговує в даний момент часу викликуваного абонента, і тим самим визначає його місце розташування. Потім він вибирає вільний розмовний канал на даній базовій станції і займає його, вказуючи в інформаційній частині каналу керування, що цей канал "зайнятий". Процедура вхідного виклику триває 1 – 4 мс, що зовсім не помітно для користувача. Реалізація такої процедури дозволяє

знизити до мінімуму імовірність конфліктної ситуації при занятті каналу керування декількома абонентами одночасно.

Після виконання процедури встановлення вільного каналу зв'язку і його заняття з центра комутації по розмовному каналі посиляється повторний виклик на базову станцію із вказанням номера виділеного радіоканалу і номера спеціального сигналу SAT (Supervisory Audio Tone). Як сигнал SAT в одному стільнику може використовуватися сигнал однієї з трьох тональних частот: 5970, 6000 або 6030 Гц, що необхідний для контролю за виконанням команд і якістю зв'язку в розмовному каналі.

Одержавши інформацію від центра комутації, абонентська станція перебудовується на частоту вільного розмовного каналу і по ньому ретранслює виділений сигнал SAT. При його розпізнаванні базова станція приймає рішення про готовність дуплексного радіоканалу "базова станція – абонент", про що повідомляє в центр комутації відповідним сигналом.

Далі здійснюється комутація наземної телефонної лінії між центром комутації і базовою станцією, радіоканалу – між базовою станцією і рухомою станцією, яка відповідною командою приводиться до готовності.

Якщо абонент вільний, то від нього по призначеному розмовному каналі на базову станцію передається тональний сигнал ST (Signalling Tone) частотою 8 кГц, який переривається при знятті трубки абонентського апарата. За сигналом ST базова станція повідомляє в центр комутації про готовність абонентського терміналу, і центр посиляє абонентові сигнал виклику (дзвінок).

При перериванні сигналу ST центр комутації підключає весь розмовний тракт, передає в канал сигнал SAT і стежить за результатами контролю якості зв'язку. Після завершення розмови від абонентського терміналу передаються сигнал ST і сигнал про перестройку на частоту каналу керування, тому базова станція повідомляє в центр комутації про закінчення сеансу зв'язку, після чого комутаційне устаткування звільняється.

Сигнал SAT постійно передається в каналі зв'язку під час розмови. У тому випадку, якщо виявлено переривання цього сигналу, абонентська станція включає таймер і, якщо сигнал SAT не буде виявлений після закінчення певного часу, переключастся на частоту каналу керування. На цьому сеанс зв'язку закінчується.

Слід зазначити, що на відміну від алгоритму вхідного виклику системи NMT у даному алгоритмі контроль достовірності прийнятих повідомлень частково перенесений на блок керування абонентської станції. Наприклад, з його допомогою визначається відповідність між прийнятим номером розмовного каналу і номером каналу керування, що обслуговує дану групу розмовних каналів.

2.2.5 Організація керування при вихідному виклику

Вихідний виклик від рухомого абонента може бути призначений як для абонента телефонної мережі загального користування, так і для іншого

рухомого абонента системи стільникового зв'язку. Для того, щоб зробити виклик, користувач набирає на радіотелефоні номер викликуваного абонента; цей номер передається на базову станцію і потім транслюється в центр комутації по каналу передачі даних. Після аналізу інформації і виділення вільного розмовного каналу в системах стільникового зв'язку організується перевірка стану каналів, встановлюється з'єднання і викликуваному абоненту посилається виклик. При відповіді абонента підключається весь розмовний тракт.

У системах стандарту AMPS керування при вихідному виклику оснований на застосуванні сигналів SAT і ST. Як і в системі стандарту NMT, номер викликуваного абонента записується в запам'ятовуючій пристрій абонентської станції, що потім перевіряє зворотний канал керування на зайнятість, тобто, визначає можливість доступу в прямий канал керування.

Одержавши доступ, абонентська станція передає вихідний виклик, у якому містяться номери викликаючого і викликуваного абонентів. Базова станція транслює вихідне повідомлення по каналу передачі даних у центр комутації, де здійснюється перевірка на несанкціонований доступ викликаючого абонента до даної мережі. Якщо абонент має право доступу, то центр ініціює протягом 1 – 4 мс стан "зайнято" зворотного каналу керування, виділяє вільний розмовний канал і передає сигнал SAT. Одночасно з цим встановлюється з'єднання з викликуваним абонентом і йому передається виклик. Одержавши номери розмовного каналу і сигналу SAT, викликаюча станція налаштовується на частоту розмовного каналу і передає по ньому через базову станцію в центр комутації відповідний сигнал SAT, після одержання якого здійснюється перевірка розмовного тракту ЦК-БС-РС. Далі центр комутації очікує відповіді викликуваного абонента і, при знятті ним трубки, підключає розмовний тракт і веде контроль за якістю мови.

2.2.6 Організація естафетної передачі абонента

Однієї з основних проблем при розробці систем стільникового зв'язку є забезпечення безперервного зв'язку під час пересування абонента по зоні обслуговування. Для рішення цієї проблеми використовується принцип естафетної передачі.

У системах стандарту AMPS протокол обміну повідомленнями подібний протоколові систем стандарту NMT і відрізняється лише тим, що контроль за якістю передачі ведеться за допомогою сигналу SAT. У процесі естафетної передачі абонента від однієї базової станції до іншої апаратура рухомого абонента повідомляється про номер сигналу SAT спеціальним повідомленням.

По мірі наближення рухомої станції до границі стільника відношення сигнал/шум зменшується. Тому базова станція БС1 може видати в центр комутації сигнал "погіршення якості", по якому центр комутації ідентифікує шість найближчих до абонента базових станцій і дає їм команду вимі-

ряти рівень сигналу SAT1 у даному радіоканалі. Центр комутації порівнює отримані результати і вибирає новий стільник з більш високим рівнем сигналу, наприклад, стільник 2, у базову станцію якого передається номер нового розмовного каналу і номер сигналу SAT2. Це повідомлення транслюється на рухому станцію в розмовному каналі, по якому ведеться сеанс зв'язку. Підтвердженням одержання інформації є короткочасне (на 50 мс) переривання сигналу SAT2, зафіксувавши яке, станція БС1 посилає сигнал виконання в центр комутації. У новому розмовному каналі абонентський термінал передає в центр комутації сигнал готовності, останній робить відповідну перекомутацію каналів, звільняючи базову станцію БС1, і підключає новий розмовний тракт. Контроль за якістю передачі ведеться за сигналом SAT2, дискретна інформація передається в розмовному каналі методом бланкування, при якому мовні сигнали перериваються. Уся процедура естафетної передачі триває близько 250 мс, тому для абонента момент переключення непомітний.

2.3 Системи стільникового зв'язку стандарту TACS

2.3.1 Основні принципи

Системи стільникового рухомого зв'язку стандарту TACS (Total Access Communications System) будуються за радіальним принципом з використанням невеликої кількості базових станцій. У таких системах кожна базова станція безпосередньо з'єднується з центром комутації рухомого зв'язку, що має вихід у телефонну мережу загального користування.

За принципом побудови, сполученням між станціями і організацією керування система стандарту TACS майже ідентична системі стандарту AMPS. Відмінність полягає в ширині частотних каналів і піковій девіації частоти: у системі стандарту AMPS ширина каналу дорівнює 30 кГц, пікова девіація частоти – 12 кГц, а в системі TACS – 25 і 9,5 кГц, відповідно.

У системі TACS використовується 1000 дуплексних каналів, з яких 956 є розмовними, а інші утворюють дві групи по 21 каналу, що є каналами керування. У розмовних каналах для передачі інформації використовується вузькоугова частотна модуляція. У каналах, що використовуються для передачі даних, для перетворення цифрової інформації в аналоговий сигнал застосовується двійкова частотна маніпуляція. Тональні сигнали слугують для організації дуплексного каналу зв'язку між базовою і абонентською станцією. Коефіцієнт повторення цих сигналів $\tilde{N} = 7 \times 3 = 21$, для передачі використовуються частоти 5970, 6000 і 6030 Гц. Сигнал частотою 800 Гц є відповідним (сигналом у відповідь) і передається тільки абонентською станцією. Параметри сигналів наведені в табл. 2.2.

У сільській місцевості розміри стільника сягають 30 км, у місті вони можуть зменшуватися до 200 м через погану якість прийому сигналу. У системах цього стандарту звичайно використовуються ненаправлені антени. Коефіцієнт повторення частот S при цьому дорівнює 7.

Таблиця 2.2 – Девіація частоти сигналів у системах стандарту TACS

Вид сигналу	Вид модуляції	Девіація частоти, кГц
Мовний	Частотна модуляція	9,5
Тональний	Двійкова частотна маніпуляція	+1,7 ("1") –1,7 ("0")
Дані	Двійкова частотна маніпуляція	+6,4 ("1") – 6,4 ("0")

Логіка роботи системи передбачає автоматичне регулювання потужності передавальних пристроїв: для автомобільної абонентської станції на 32 дБ для портативної – на 20 дБ.

2.3.2 Принципи організації каналів керування

У системах стандарту TACS використовуються, як і в розглянутому вище стандарті AMPS, два типи каналів керування – прямий і зворотний.

Інформація з прямого каналу (у напрямку від базової станції до рухомого абонента) передається зі швидкістю 8 Кбіт/с безперервним потоком, який при відсутності інформації для абонента містить лише контрольний текст. Це є необхідною умовою для правильної роботи системи, тому що в режимі чергового прийому абонентські станції сканують за допомогою своїх приймальних пристроїв тільки канали керування, вибираючи канал з найбільш високим рівнем сигналу. На рис. 2.7 представлені стандартні формати, які використовуються в прямому каналі керування для передачі:

1. Повідомлень про стан відповідного зворотного каналу керування (вільно/зайнято);
2. Інформаційних даних (слова А) для парних номерів абонентських терміналів;
3. Інформаційних даних (слова В) для непарних номерів абонентських терміналів.

Тут СІ – службова інформація, КС – кадрова синхронізація, ТС – тактова синхронізація.

Призначення інформації, що міститься в розрядах цих повідомлень, і правила її використання – такі ж, як і в стандарті AMPS.

	ТС	КС	Перше слово А	Перше слово В	Друге слово А	Друге слово В	П'яте слово А	П'яте слово В	ТС
1	10	11	40	40	40	40	40	40	

ТС	КС	СІ	Перше слово п'ять разів	Друге слово п'ять разів	П'яте слово п'ять разів
30	11	7	240	240	240

Рисунок 2.7 – Формати повідомлень у каналі керування стандарту TACS

2.3.3 Встановлення вхідного виклику

Процедура встановлення вхідного виклику в системах стандарту TACS практично ідентична наведеним вище. У вихідному стані абонентська станція настроюється на частоту каналу керування з найбільш високим рівнем прийнятого сигналу. По каналах керування передається безперервний потік інформації, що містить сигнали вхідного виклику. Одержавши з боку мережі заявку на вхідне з'єднання, центр комутації по провідному каналі передачі даних дає команду всім базовим станціям послати сигнал виклику потрібного абонента, що транслюється по каналах керування. Одержавши сигнал виклику, викликувана абонентська станція за допомогою прапорця "вільно/зайнято", що міститься у форматі повідомлень каналу керування, перевіряє можливість доступу в зворотний канал керування і через базову станцію видає у центр комутації підтвердуюче повідомлення, що містить особистий номер абонента. Приймавши це повідомлення, апаратура центра комутації аналізує інформацію, що надійшла, визначає номер обслуговуючого абонента базової станції, вибирає вільний розмовний канал даної станції і в інформаційному форматі каналу керування відзначає стан цього каналу як "зайнято" (протягом 1 – 4 мс). Це дозволяє знизити імовірність конфліктної ситуації при занятті каналу керування декількома абонентами.

В іншому процедура встановлення вхідного виклику, а також процедури встановлення вихідного виклику і естафетної передачі абонента ідентичні таким же процедурам, регламентованим стандартом AMPS.

Запитання для самоперевірки

1. Принципи організації системи стандарту NMT.
2. Принципи адресації абонентів системи стандарту NMT.
3. Принципи побудови системи стандарту AMPS.
4. Що таке сигнал SAT?
5. Організація керування при вихідному виклику у системі AMPS.
6. Принципи побудови системи стандарту TACS.

3 ЦИФРОВА ОБРОБКА СИГНАЛІВ

3.1 Роль і структура цифрової обробки сигналів

Цифрова обробка сигналів – важливий елемент в апаратурній реалізації принципів стільникового зв'язку. Саме цифрова обробка забезпечила можливість переходу від першого покоління стільникового зв'язку до другого з відповідним вдосконаленням методів множинного доступу, підвищенням ємності системи, поліпшенням якості зв'язку. Тільки у цифровій формі стає можливим застосування економічного (з усуненням надмірності) кодування мови, ефективного канального кодування з високим ступенем захисту від помилок, досконалих методів боротьби з багатопроблемним розповсюдженням. Цифрова обробка сигналів в стільниковому зв'язку, як і в зв'язку взагалі, і навіть ширше – при обробці, зберіганні і передачі інформації різного вигляду, наприклад при обробці зображень, в цифровому телебаченні, в мультимедіа, – це ціла епоха, пов'язана як з розвитком методів обробки інформації, так і з появою відповідної масової елементної бази (великих і надвеликих інтегральних мікросхем), що забезпечила можливість практичної реалізації цих методів.

При розгляді цифрової обробки сигналів опиратимемося на блок-схему (див. рис. 1.9), що відображає всі основні етапи обробки і їх послідовність. Відповідно до цієї схеми ми розглянемо:

- аналого-цифрове перетворення сигналів;
- кодування мови;
- канальне кодування;
- модуляцію.

Кожному з етапів обробки в передавальному тракті відповідає етап обробки в приймальному, так що в ситуації, яка ідеалізується, – за відсутності шумів, перешкод і спотворень при обробці і розповсюдженні сигналів – форма сигналу у відповідних точках передавального і приймального трактів, наприклад на виході кодера мови і на вході декодера мови, на виході АЦП і на вході ЦАП, тотожно однакова. Реально цієї тотожності не виходить, але обробка сигналів повинна бути побудована так, щоб спотворення не перевищували допустимих меж.

Використовувані в стільниковому зв'язку методи цифрової обробки сигналів, характеристики і параметри пристроїв, що реалізують їх, зокрема АЦП і кодера, найтіснішим чином пов'язані з характеристиками передаваних мовних сигналів. Тому ми коротко зупинимося на останніх. Спектр потужності сигналу мови має максимум поблизу частоти 400 Гц і спадає на вищих частотах зі швидкістю біля 9 дБ на октаву. Відповідно до рекомендацій Міжнародного консультативного комітету з телеграфії і телефонії (МККТТ), при аналого-цифровому перетворенні і цифровій обробці сигналу мови обмежуються інтервалом частот 300...3400 Гц. Тривалість

звуків мовного сигналу складає від декількох десятків до декількох сотень мілісекунд при середньому значенні 130 мс, причому середнє значення для явних звуків 210 мс, а для приголосних 95 мс. У завданнях кодування сигнал мови часто розглядають як квазістаціонарний процес Гаусса, спектрально-кореляційні характеристики якого постійні на інтервалі 20...30 мс. При телефонній розмові миттєвий рівень мовного сигналу змінюється в діапазоні 35...40 дБ. При цьому рівень приголосних в середньому на 20 дБ нижчий за рівень голосних.

Слухове відчуття гучності зразково пропорційне логарифму інтенсивності дії. Порогова для слуху зміна рівня звуку не перевищує ± 1 дБ. Слух слабчутливий до точності передачі фазових співвідношень складових сигналу. Постійна часу слуху в середньому складає: при наростанні сигналу 20...30 мс, при спаді 100...200 мс.

Закінчивши цим ввідну частину, перейдемо до послідовного розгляду етапів цифрової обробки.

3.2 Аналого-цифрове перетворення

Аналого-цифрове перетворення є першим етапом цифрової обробки сигналів в передавальному тракті (див. рис. 1.9). Як підказує сама назва, аналого-цифровий перетворювач (АЦП) є елементом, що пов'язує аналогову і цифрову ділянки тракту та перетворює безперервний аналоговий сигнал з виходу мікрофону в цифрову форму так, що вся подальша обробка проводиться з сигналом, поданим в цифровому вигляді. Відповідно цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) – останній елемент в цифровому приймальному тракті, і завдання його прямо протилежне: він перетворить цифровий сигнал в аналоговий, а останній поступає на динамік, що перетворює його в акустичний сигнал, який сприймається вухом.

Робота АЦП складається з двох етапів, які в реальному пристрої часто не можуть бути чітко відокремлені один від одного: дискретизація вхідного безперервного сигналу в часі зазвичай з постійним кроком, тобто через рівні інтервали часу, і квантування величини сигналу за рівнем для цих дискретних моментів часу. В результаті на виході АЦП з фіксованим темпом, визначуваним періодом дискретизації, з'являються двійкові числа, тобто набори одиниць і нулів, відповідні рівням сигналу в моменти дискретизації. Цей процес схематично ілюструється рис. 3.1, на якому моменти дискретизації показані штрихами на осі часу і для трьох моментів дискретизації вказані рівні сигналу – в десятковому і двійковому уявленні.

Відповідно до теореми Котельникова, частота дискретизації повинна бути принаймні удвічі вища за найбільшу частоту в спектрі оброблюваного сигналу. Оскільки, як указувалося в попередньому розділі, при цифровій передачі сигналів мови по телефонних каналах зв'язку обмежуються смугою частот від 300 до 3400 Гц, загальноприйнятою є частота дискретизації $F_R = 8$ кГц.

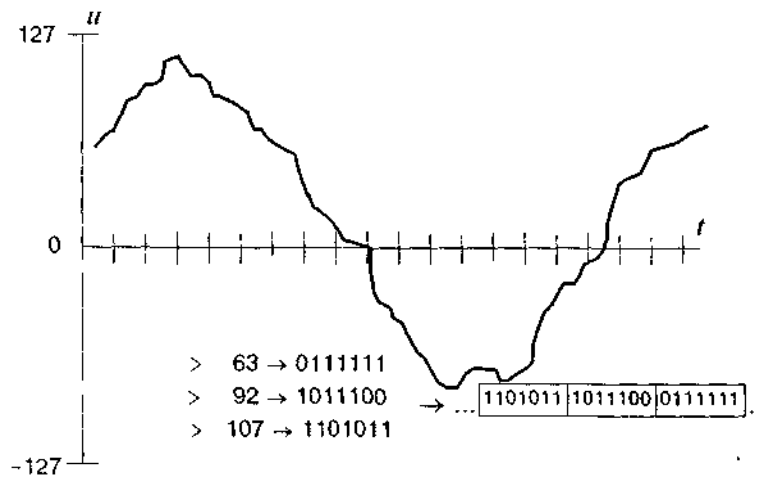


Рисунок 3.1 – АЦП здійснює дискретизацію безперервного сигналу в часі і квантування за рівнем, перетворюючи безперервний аналоговий сигнал в послідовність імпульсів, що несуть інформацію про рівень сигналу у момент дискретизації

Число двійкових розрядів АЦП зазвичай вибирається рівним 8, включаючи знаковий розряд так, що діапазон чисел на виході АЦП складає від -127 до +127, оскільки $127 = 2^7 - 1$.

В результаті на виході АЦП виходить потік 8-бітових чисел, наступних з частотою 8 кГц, тобто потік інформації на виході АЦП складає 64 кбіт/с. Практичні схеми АЦП найчастіше будуються на основі порівняння вибірок миттєвих значень аналогового сигналу з набором еталонів, кожен з яких містить певне число рівнів квантування.

У схемах ЦАП, як правило, використовується формування аналогових величин (струмів), пропорційних ваговим коефіцієнтам розрядів вхідних двійкових кодів, з подальшим підсумовуванням в розрядах кодів, що містять одиниці.

3.3 Кодування мови

Кодер мови є першим елементом власне цифрової ділянки передавального тракту, наступним після АЦП (рис. 1.9). Основне завдання *кодера* (encoder) - гранично можливе стиснення сигналу мови, поданого в цифровій формі, тобто граничне можливе усунення надмірності мовного сигналу, але при збереженні прийнятної якості передачі мови. Компроміс між ступенем стиснення і збереженням якості відшукується експериментально, а проблема отримання високого ступеня стиснення без надмірного зниження якості складає основну трудність при розробці кодера. У приймальному тракту перед ЦАП розміщений декодер мови; завдання *декодера* (decoder) – відновлення звичайного цифрового сигналу мови, з властивою йому природною надмірністю, за прийнятим кодованим сигналом. Поєднання кодера і декодера називають *кодеком* (codec).

Перш ніж перейти до розгляду кодерів мови, використовуваних в стільниковому зв'язку, наведемо деякі загальні відомості про основні методи кодування.

Історично склалися два напрями кодування мови: *кодування форми сигналу* (waveform coding) і *кодування джерела сигналу* (source coding). Перший метод оснований на використанні статистичних характеристик сигналу і практично не залежить від механізму формування сигналу. Кодери цього типу із самого початку забезпечували високу якість передачі мови (хорошу розбірливість і натуральність мови), але відрізнялися меншою в порівнянні з другим методом економічністю. У методі кодування форми сигналу використовуються три основні способи кодування: *імпульсно-кодова модуляція*, ІКМ (Pulse Code Modulation – PCM), *диференціальна ІКМ – ДІКМ* (Differential PCM – DPCM) і *дельта-модуляція – ДМ* (Delta Modulation – DM). ІКМ відповідає цифровий сигнал безпосередньо з виходу АЦП, в ньому зберігається вся надмірність аналогового мовного сигналу.

При ДІКМ ця надмірність трохи зменшується за рахунок того, що квантуванню з подальшим кодуванням і передачею по лінії зв'язку піддається різниця між початковим мовним сигналом і його передбаченим значенням, а при прийомі різницевий сигнал складається з передбаченим значенням, отриманим за тим же алгоритмом передбачення. Шкала квантування може бути рівномірною, нерівномірною або адаптованою змінною; передбачення сигналу може бути не залежним від форми останнього або ж залежати від форми сигналу, тобто бути адаптивним. Якщо при кодуванні сигналу використовуються елементи адаптації, то відповідний різновид ДІКМ називають адаптивними ДІКМ – АДІКМ (Adaptive DPCM – ADPCM). ДМ – це ДІКМ з однією бітовою квантуванням, вона також може бути адаптивною (АДМ). АДІКМ знаходить застосування, наприклад, в безпроводному телефоні з коефіцієнтом стиснення сигналу близько 2. У стільниковому зв'язку використовується виключно другий метод кодування, як економічніший, коефіцієнт стиснення порядку 5...8 зі збільшенням його в перспективі ще удвічі.

Другий метод – кодування джерела сигналу, або кодування параметрів сигналу, – спочатку ґрунтувався на даних про механізми мовоутворення, тобто використовував свого роду модель голосового тракту і приводив до систем типу аналіз – синтез, що отримав назву *вокодерних систем* або *вокодерів* (vocoder – скорочення від *voice coder*, тобто кодер голосу або кодер мови). Вже ранні вокодери дозволяли отримати вельми низьку швидкість передачі інформації, але при характерній «синтетичній» якості мови на виході. Тому вокодерні методи довгий час залишалися в основному областю прикладання зусиль дослідників і ентузіастів, не знаходячи широкого практичного застосування. Ситуація істотно змінилася з виходом на сцену методу лінійного передбачення, запропонованого в 60-х роках, який отримав потужний розвиток в 80-х, зокрема в прямому зв'язку з розробкою мов-

них кодеків для цифрових систем стільникового зв'язку. Саме вокодерні методи на основі лінійного передбачення і застосовуються в стільниковому зв'язку, причому залежність цих методів від даних про механізми мовоутворення відступає на другий або навіть на третій план, а оцінювання передаваних по лінії зв'язку параметрів проводиться на основі статистичних характеристик сигналу за жорстко визначеним алгоритмом, як і при кодуванні форми сигналу. Тому фактично межа між двома класичними методами кодування – кодування форми сигналу і кодування джерела сигналу – до деякої міри стирається.

Перейдемо безпосередньо до кодерів мови, вживаних в стільниковому зв'язку, і розглянемо такі питання: принцип побудови кодерів мови на основі методу лінійного передбачення; суть методу лінійного передбачення; типи фільтрів лінійного передбачення, використовуваних в кодеках; практичні схеми кодеків стандартів D-AMPS і GSM; методи оцінювання якості кодування, що дозволяють зіставляти різні типи і варіанти кодеків; перспективи розвитку методів кодування.

Суть кодування мови на основі *методу лінійного передбачення* (Linear Predictive Coding – LPC) полягає в тому, що по лінії зв'язку передаються не параметри мовного сигналу, як такого, а параметри деякого фільтра, у відомому сенсі еквівалентного голосовому тракту, і параметри сигналу збудження цього фільтра. Як такий фільтр використовується фільтр лінійного передбачення. Завдання кодування на передавальному кінці лінії зв'язку полягає в оцінюванні параметрів фільтра і параметрів сигналу збудження, а завдання декодування на приймальному кінці – в пропусканні сигналу збудження через фільтр, на виході якого виходить відновлений сигнал мови. Різні варіанти алгоритмів кодування відрізняються один від одного набором передаваних параметрів фільтра, методом формування сигналу збудження і тому подібними деталями.

Метод лінійного передбачення полягає в тому, що чергова вибірка мовного сигналу S_n з деякою мірою точності передбачається лінійною комбінацією M попередніх вибірок:

$$S'_n = \sum_{i=1}^M a_i S_{n-i};$$

де a_i – коефіцієнти лінійного передбачення, M – порядок передбачення. Різниця між дійсним і передбаченим значеннями вибірки визначає *помилку передбачення (залишок передбачення)*:

$$e_n = S_n - S'_n = S_n - \sum_{i=1}^M a_i S_{n-i};$$

В результаті z-перетворення цього різницевого рівняння отримуємо

$$\hat{A}(z) = S(z) - \sum_{i=1}^M a_i S(z) z^{-i} = S(z) A(z);$$

де функція $A(z)$

$$A(z) = 1 - \sum_{i=1}^M a_i z^{-1}.$$

інтерпретується як передавальна характеристика деякого фільтра (інверсного фільтра або фільтра-аналізатора), частотна характеристика якого зворотна по відношенню до частотної характеристики голосового тракту. При подачі мовного сигналу на вхід інверсного фільтра на виході фільтра виходить сигнал збудження, подібний (з точністю до помилок, визначуваних скінченністю порядку передбачення M і погрішністю оцінювання коефіцієнтів передбачення) до сигналу збудження на вході фільтра голосового тракту.

Отриманий вираз для $A(z)$ відповідає структурі трансверсального фільтра (рис. 3.2). Порядок передбачення вибирається з умови компромісу між якістю передачі мови і пропускнуною спроможністю лінії зв'язку; практично M береться порядку 10.

Значення коефіцієнтів передбачення, постійні на інтервалі кодованого сегмента мови (на практиці тривалість сегмента складає 20 мс), знаходяться з умови мінімізації середньоквадратичного значення залишку передбачення на інтервалі сегмента.

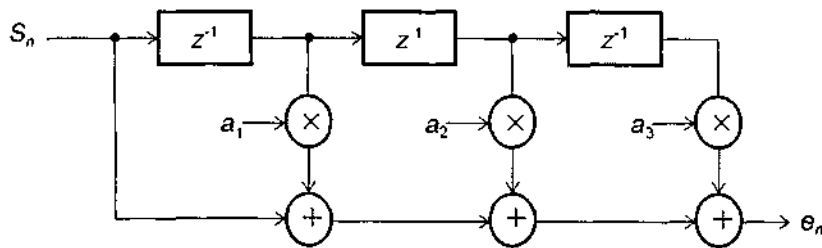


Рисунок 3.2 – Аналізуючий трансверсальний фільтр при порядку передбачення $M=3$

Для цього частинні похідні $\partial(\sum e_n^2)/\partial a_i$, прирівнюються до нуля, що приводить до системи M лінійних рівнянь з M невідомими коефіцієнтами a_i . Матриця системи і метод її розв'язання виявляються трохи різними залежно від того, якими властивостями наділяється мовний сигнал на інтервалі перетворюваного сегмента мови.

Якщо мовний сигнал на цьому інтервалі вважається стаціонарним випадковим процесом (автокореляційний метод оцінювання коефіцієнтів передбачення), то матриця системи теплицева, система розв'язується за допомогою ітераційної процедури алгоритму Дарбіна, і фільтр-синтезатор виходить свідомо стійким. Якщо мовний сигнал вважається нестационарним процесом (коваріаційний метод оцінювання коефіцієнтів передбачення), то матриця системи симетрична, але не теплицева, система розв'язується з використанням розкладання Холецкого, а для забезпечення стійкості фільтра-синтезатора коваріаційний метод доводиться відповідним чином модифікувати.

У обох випадках (як у автокореляційному методі, так і в коваріаційному) як побічний результат розв'язування виходять значення так званих коефіцієнтів віддзеркалення, або *коефіцієнтів часткової кореляції* (partial correlation coefficients, або PARCOR coefficients) k_i , $i=1, \dots, M$, число яких рівне числу коефіцієнтів лінійного передбачення a_i , і які пов'язані з коефіцієнтами a_i , взаємно однозначними нелінійними функціональними співвідношеннями. Коефіцієнти віддзеркалення безпосередньо пов'язані з іншою формою фільтра лінійного передбачення – так званим *гратчастим* (lattice), фільтром (рис. 3.3). Коефіцієнти віддзеркалення k_i зручніші, ніж коефіцієнти лінійного передбачення a_i для передачі по лінії зв'язку, оскільки через свої статистичні характеристики меншою мірою можуть приводити до втрати стійкості фільтра при квантуванні. Інакше кажучи, вони потребують меншого числа розрядів при квантуванні, тобто приводять до економічнішого використання лінії зв'язку. Іноді використовуються також функції від коефіцієнтів віддзеркалення – *логарифмічні відношення площ* (Log-area Ratio – LAR):

$$r_i = \log_{1+k_i}^{1-k_i};$$

назва яких пов'язана з моделлю голосового тракту у вигляді набору акустичних труб різних перерізів.

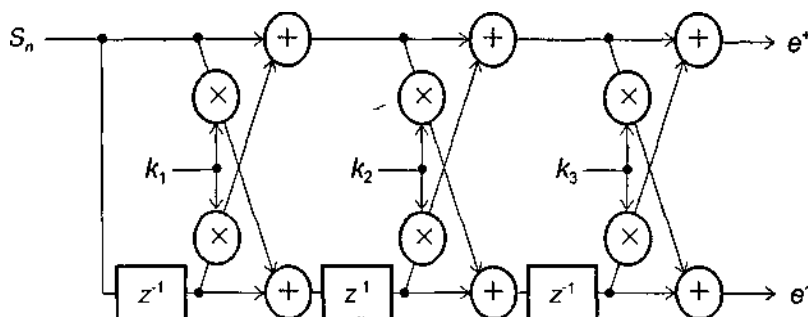


Рисунок 3.3 – Аналізуючий гратчастий фільтр при порядку передбачення $M = 3$ (e^+ и e^- – залишки передбачення вперед і назад)

Повернемося до виразу для $A(z)$, що визначає передавальну характеристику фільтра-аналізатора. Передавальна характеристика фільтра-синтезатора $H(z)$ обернена передавальній характеристиці фільтра-аналізатора з точністю до скалярного коефіцієнта підсилення G .

$$H(z) = \frac{G}{A(z)}.$$

Синтезуючий фільтр має ту ж структуру, що і аналізуючий (інверсний), і визначається тим же набором параметрів (коефіцієнтів передбачення a_i або коефіцієнтів віддзеркалення k_i або логарифмічних відношень площ r_i), але входи і виходи в аналізуючому і синтезуючому фільтрах міняються місцями. Якщо на вхід синтезуючого фільтра подати сигнал збудження, то на його виході буде отриманий мовний сигнал з тією якістю,

яка забезпечується фільтром при прийнятому порядку передбачення, використуваному числі дискретів для квантування параметрів фільтра і інших обмеженнях і погрішностях того ж характеру.

Таким чином, процедура кодування мови в методі лінійного передбачення зводиться до того, що (рис. 3.4):

- оцифрований сигнал мови нарізається на сегменти тривалістю 20 мс (160 вибірок по 8 бітів в кожному сегменті);
- для кожного сегмента оцінюються параметри фільтра лінійного передбачення і параметри сигналу збудження; як сигнал збудження в простому (вірогідно) випадку може виступати залишок передбачення, що отримується при пропусканні сегмента мови через фільтр лінійного передбачення з параметрами, отриманими при оцінюванні даного сегмента;
- параметри фільтра і параметри сигналу збудження кодуються за певним законом і передаються в канал зв'язку.



Рисунок 3.4 – Робота кодека мови в методі лінійного передбачення

Процедура декодування мови полягає в пропусканні прийнятого сигналу збудження через синтезуючий фільтр певної структури, параметри якого передані одночасно зі сигналом збудження. Підкреслимо, що як аналізуючий, так і синтезуючий фільтри є цифровими і процедури кодування і декодування мови реалізуються у відповідних обчислювачах (процесорах). Сигнал на вхід аналізуючого фільтра поступає безпосередньо з виходу АЦП, а вихідний сигнал синтезуючого фільтра потрапляє на вхід ЦАП (див. рис. 1.9).

Наведений опис процесів кодування і декодування мови не є вичерпним, він пояснює лише принцип дії кодека. Практичні схеми помітно складніші, і це пов'язано в основному з такими двома моментами.

По-перше, описана вище схема лінійного передбачення – *короткочасне передбачення* (Short-term Prediction – STP) – не забезпечує достатнього

ступеня усунення надмірності мови. Тому, на додаток до короткочасного передбачення, використовується ще *довготривале* передбачення (Long-term Prediction – LTP), що значною мірою знімає залишкову надмірність і наближає залишок передбачення за своїми статистичними характеристиками до білого шуму.

По-друге, використання залишку передбачення як сигналу збудження виявляється недостатньо ефективним, оскільки потребує для кодування дуже великого числа бітів. Тому практичне застосування знаходять економічніші (за завантаженням каналу зв'язку, але зовсім не за обчислювальними витратами) методи формування сигналу збудження. У ранніх кодеках лінійного передбачення для формування сигналу збудження передавалися сигнал тон/шум (двійкова ознака, яка вказує, чи є переданий сегмент мови вокалізованим, тобто тональним, або невокалізованим, тобто шумовим), період основного тону і амплітуда сигналу. На початку 80-х років була запропонована модель багатоімпульсного збудження, що не використовує класифікацію сегментів мови за ознакою вокалізований/невокалізований. З цією моделлю пов'язано значне поліпшення якості кодеків лінійного передбачення, і в наш час використовуються виключно різні варіанти багатоімпульсного збудження.

Зупинимося на вказаних двох моментах дещо докладніше. Передавальна характеристика інверсного фільтра довготривалого передбачення має вигляд

$$P(z) = 1 - \sum_{k=-M}^M g_k z^{-(d+k)};$$

де g_k – коефіцієнти довготривалого передбачення, порядок передбачення рівний $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + 1$, а часова затримка d відповідає періоду основного тону (для вокалізованих звуків). Зазвичай довготривале передбачення має порядок 1, тобто $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = 0$, отже передавальна характеристика фільтра визначається єдиним коефіцієнтом передбачення g і затримкою d :

$$P(z) = 1 - gz^{-d}.$$

Якщо на вхід інверсного фільтра довготривалого передбачення подається залишок короткочасного передбачення e_n , то на виході виходить залишок (помилка) довготривалого передбачення f_n , рівний

$$f_n z = e_n - g e_{n-d}.$$

Помилка f_n дуже близька до білого шуму Гауса, що полегшує економічне формування параметрів сигналу збудження, про що ми розповімо трохи нижче. Параметри довготривалого передбачення g і d можуть бути визначені, наприклад, з умови мінімізації середньоквадратичного значення помилки f_n на деякому інтервалі, що становить 20...25% від тривалості переданого сегмента мови. Затримка d зазвичай міститься в межах 20... 160 інтервалів дискретизації сигналу, що відповідає діапазону частот основного тону 50...400 Гц. Передавальна характеристика $R(z)$ довготривалого фі-

льтра-синтезатора є оберненою $P(z)$ з точністю до скалярного коефіцієнта посилення F :

$$R(z) = \frac{F}{P(z)}.$$

Сигнал збудження, що апроксимує (у сенсі виходу фільтра-синтезатора) залишок довготривалого передбачення f_n , моделюється у вигляді певного числа імпульсів на інтервалі *кадру збудження* (excitation frame), що становить зазвичай 20...50% від тривалості переданого сегмента мови. Існує декілька методів для оцінювання параметрів послідовності імпульсів сигналу збудження. У методі *багатоімпульсного збудження* (Multi-pulse Excitation – MPE) оптимізуються як положення, так і амплітуди імпульсів. У методі *збудження регулярною послідовністю імпульсів* (Regular-pulse Excitation – RPE) взаємне розташування імпульсів зумовлене заздалегідь – використовується сітка рівновіддалених імпульсів, а оптимізується розташування цієї сітки в межах кадру збудження (оскільки звичайне число імпульсів збудження в 3...4 рази менше числа вибірок в кадрі) і амплітуди імпульсів. У методі стохастичного кодування, або методі *лінійного передбачення з кодовим збудженням* (Code-excited Linear Prediction – CELP), з *різновидом збудження векторною сумою* (Vector Sum Excited Linear Prediction – VSELP), найбільш відповідний вектор збудження вибирається із заздалегідь складеної кодової книги, або кодового словника, що містить зазвичай 2^N , $N = 7...10$, квазівипадкових векторів заданої довжини з елементами, що нормуються за амплітудою; амплітуда вектора збудження кодується окремо відповідно до гучності переданого елемента мови. Нарешті відомий ефективний метод *збудження послідовністю бінарних імпульсів з перетворенням* (Transformed Binary Pulse Excitation – TBPE), в якому сигналом збудження є послідовністю рівновіддалених за часом і квазівипадкових за знаком (з амплітудами ± 1) імпульсів, помножених на деяку матрицю перетворення. Обмежившись наведеними загальними відомостями по методах формування сигналу збудження, перейдемо до розгляду конкретних схем кодеків мови стандартів D-AMPS і GSM.

У стандарті D-AMPS використовується метод кодування VSELP. Спрощена блок-схема кодека подана на рис. 3.5, вона є розвитком і деталізацією схеми рис. 3.4. Розглянемо спочатку схему кодера.

Блок попередньої обробки виконує такі функції:

- попередню цифрову фільтрацію вхідного сигналу з метою підйому верхніх частот, на частку яких в спектрі мовного сигналу доводиться менша потужність;
- нарізування сигналу на сегменти по 160 вибірок (20 мілісекунд).

Потім для кожного сегмента оцінюються параметри фільтра короткочасного лінійного передбачення – 10 коефіцієнтів часткової кореляції k_i , $i=1,...,10$ (порядок передбачення $M = 10$), які безпосередньо кодуються для видачі в канал зв'язку, без будь-яких додаткових функціональних перетво-

рень. Тут же оцінюється амплітудний множник p , що визначає енергію сегмента мови.

Сигнал з виходу блока попередньої обробки фільтрується фільтром-аналізатором короткочасного лінійного передбачення у формі трансверсального лінійного фільтра, для чого коефіцієнти часткової кореляції k_i перетворюються в коефіцієнти лінійного передбачення a_i .

Вихідний сигнал фільтра короткочасного передбачення (залишок передбачення e_n) використовується для оцінювання параметрів довготривалого передбачення – затримки d і коефіцієнта передбачення g , причому параметри довготривалого передбачення оцінюються окремо для кожного з чотирьох підсегментів по 40 вибірок, на які розділяється сегмент з 160 вибірок.

Далі для кожного з підсегментів по 40 вибірок визначаються параметри сигналу збудження. Для цього у складі кодера використовується схема, аналогічна схемі, що входить до складу декодера, яка включає фільтри-синтезатори короткочасного і довготривалого передбачення і дві кодові книги і реалізує метод «аналізу через синтез» (ця частина кодера на схемі рис. 3.5 детально не розкрита). Кожна з кодових книг сигналу збудження містить 128 кодових векторів, по 40 елементів в кожному.

Всі кодові вектори однієї книги є елементами семивимірного лінійного підпростору сорокавимірного простору, натягнутого на 7 базисних векторах, причому коефіцієнти лінійних комбінацій, які задають кодові вектори через вектори базису, мають значення +1 або -1. Таким чином кожна кодова книга, що містить 128 векторів, задається сімома базисними векторами і 128 кодовими словами (семиелементними векторами коефіцієнтів лінійних комбінацій) з одинітовими елементами.

Сигнал збудження фільтра-синтезатора короткочасного передбачення, відповідно до схеми декодера на рис. 3.5, є сумою векторів збудження з двох кодових книг і вектора з виходу фільтра-синтезатора довготривалого передбачення (звідси і назва методу – «із збудженням векторною сумою»), причому вектори збудження з кодових книг до подачі на суматор множаться на відповідні коефіцієнти підсилення γ_1 і γ_2 , а вхідним сигналом фільтра-синтезатора довготривалого передбачення є, залежно від ділянки сегмента, вихідний сигнал того ж фільтра або сумарний сигнал збудження фільтра-синтезатора короткочасного передбачення. Параметри сигналу збудження – номери векторів збудження I_1 і I_2 з першої та другої кодових книг і відповідні коефіцієнти підсилення γ_1 і γ_2 – визначаються за критерієм мінімуму середньоквадратичної помилки на виході фільтра-синтезатора короткочасного передбачення, що входить до складу кодера. Заздалегідь базисні вектори обох кодових книг ортогоналізуються: для першої книги – відносно до вихідного вектора фільтра-синтезатора довготривалого передбачення, для другої книги – відносно до того ж вихідного вектора і до базисних векторів першої книги.

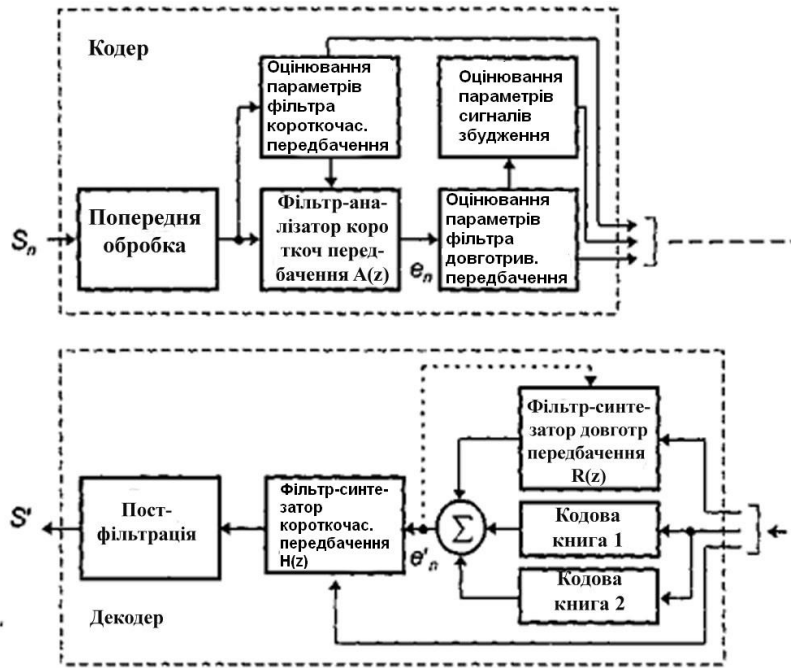


Рисунок 3.5 – Спрощена блок-схема кодека мови стандарту D-AMPS

Отже, вихідна інформація кодера мови для сегмента у 20 мс включає:

- параметри фільтра короткочасного лінійного передбачення – 10 коефіцієнтів часткової кореляції k_i , $i = 1 \dots 10$, і амплітудний множник ρ – один набір на весь сегмент;
- параметри фільтра довготривалого лінійного передбачення – коефіцієнт передбачення g і затримка d – для кожного з чотирьох підсегментів;
- параметри сигналу збудження – номери I_1 , I_2 векторів збудження з двох кодових книг і відповідні коефіцієнти підсилення γ_1 і γ_2 – для кожного з чотирьох підсегментів.

У табл. 3.1 наведено зведення вихідної інформації кодера з вказанням числа бітів, використовуваних для кодування. Загальний об'єм інформації, що видається для сегмента мови, складає 159 бітів. Оскільки початковий об'єм інформації на вході кодера складає 1280 бітів (160 вибірок по 8 бітів), кодер мови здійснює стиснення інформації більше ніж в 8 разів ($1280:159 = 8,05$). Перед видачею в канал зв'язку вихідна інформація кодера мови піддається додатково каналному кодуванню, причому різні параметри, залежно від їх важливості для забезпечення якості передачі мови, кодуються з різним ступенем надмірності.

Розглянемо схему декодера, що є тепер уже достатньо простою справою. Сигнал збудження фільтра-синтезатора короткочасного передбачення формується таким же чином, як і в синтезуючій схемі кодера: по номерах I_1 , I_2 з кодових книг вибираються вектори збудження, які множаться відповідно на коефіцієнти γ_1 , γ_2 та складаються з вихідним вектором фільтра-синтезатора довготривалого передбачення, який визначається параметрами

g, d .

Таблиця 3.1 – Кодування вихідної інформації кодера мови стандарту D-AMPS

Передані параметри	Число біт	Примітка
Параметри фільтра короткотривалого передбачення (коефіцієнти частотної кореляції $k_i, i=1, \dots, 10$)	38	k_1 -6 біт, k_2, k_3 - по 5 біт, k_4, k_5 - по 4 біта, k_6, k_9 - по 3 біта, k_{10} - 2 біта
Амплітудний помножувач (енергія сегмента) ρ	5	
Затримка фільтра довготривалого передбачення d (для кожного з 4 підсегментів)	28	7 біт на кожний підсегмент
Номери векторів збудження I_1, I_2 з двох кодових книг (для кожного з 4 підсегментів)	56	I_1, I_2 – по 7 біт
Коефіцієнт підсилення g, γ_1, γ_2 (для кожного з 4 підсегментів)	32	8 біт на кожний підсегмент, векторному квантуванні і кодуванні піддаються деякі функції від g, γ_1, γ_2
Всього за 20-мс сегмент	159	

Далі сигнал збудження фільтрується фільтром-синтезатором короткочасного передбачення у формі трансверсального фільтра, тобто параметри фільтра доводиться перетворювати – від коефіцієнтів часткової кореляції k_i переходить до коефіцієнтів передбачення a_i . Для поліпшення суб'єктивної якості синтезованої мови вихідний сигнал фільтра-синтезатора піддається цифровій адаптивній пост-фільтрації, і з виходу пост-фільтра виходить відновлений цифровий сигнал мови.

У стандарті GSM використовується метод RPE-LTP (Regular Pulse Excited Long term Predictor – лінійне передбачення із збудженням регулярною послідовністю імпульсів і довготривалим передбаченням). Спрощена блок-схема кодека подана на рис. 3.6.

Почнемо з розгляду кодера. Блок попередньої обробки виконує:

- попереднє спотворення вхідного сигналу за допомогою цифрового фільтра що підкреслює верхні частоти;
- нарізування сигналу на сегменти по 160 вибірок (20 мілісекунд);
- зважування кожного зі сегментів вікном Хеммінга («косинус на п'є-десталі» – амплітуда сигналу плавно спадає від центра вікна до країв).

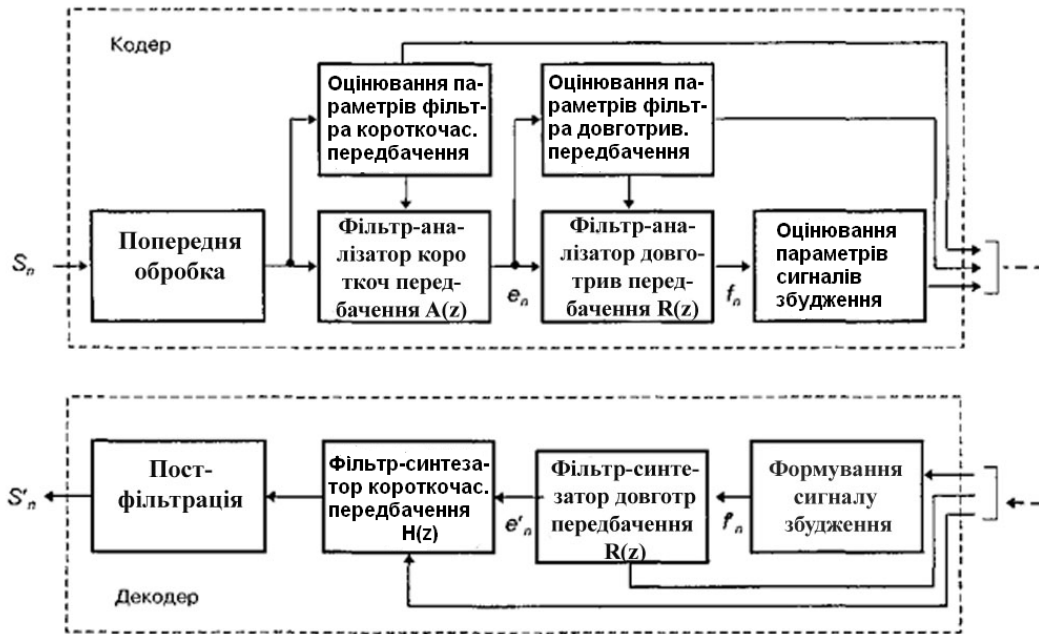


Рисунок 3.6 – Спрощена блок-схема кодека мови стандарту GSM

Далі для кожного сегмента оцінюються параметри фільтра короткочасного лінійного передбачення – 8 коефіцієнтів часткової кореляції k_i , $i = 1, \dots, 8$ (порядок передбачення $M = 8$), які для передачі по каналу зв'язку перетворюються в логарифмічні відношення площ r_i , причому для функції логарифма використовується кусково-лінійна апроксимація.

Сигнал з виходу блока попередньої обробки фільтрується гратчастим фільтром-аналізатором короткочасного лінійного передбачення, і за його вихідним сигналом – залишком передбачення e_n – оцінюються параметри довготривалого передбачення: коефіцієнт передбачення g і затримка d . При цьому 160-вибірковий сегмент залишку короткочасного передбачення e_n розділяється на 4 підсегменти, по 40 вибірок в кожному, і параметри g , d оцінюються для кожного з підсегментів окремо, причому для оцінювання затримки d для поточного підсегмента використовується ковзний підсегмент з 40 вибірок, що переміщається в межах попередніх 128 вибірок сигналу залишку передбачення e_n . Сигнал e_n фільтрується фільтром-аналізатором довготривалого лінійного передбачення, а вихідний сигнал останнього – залишок передбачення f_n – фільтрується згладжувальним фільтром, і за ним формуються параметри сигналів збудження, окремо для кожного з 40-вибіркових підсегментів.

Сигнал збудження одного підсегмента складається з 13 імпульсів, які надходять через рівні проміжки часу (втричі більші, ніж інтервал дискретизації початкового сигналу), і мають різні амплітуди. Для формування сигналів збудження 40 імпульсів підсегмента згладженого залишку f_n обробляються таким чином. Останній (сороковий) імпульс відкидається, а перші 39 імпульсів розбиваються на три послідовності: у першій – імпульси 1, 4, ..., 37, в другій – імпульси 2, 5, ..., 38, в третій – імпульси 3, 6, ..., 39. Як сигнал

збудження вибирається та з послідовностей, енергія якої більша. Амплітуди імпульсів нормуються відносно до імпульсу з найбільшою амплітудою, і нормовані амплітуди кодуються трьома бітами кожна при лінійній шкалі квантування. Абсолютне значення найбільшої амплітуди кодується шістьма бітами в логарифмічному масштабі. Положення початкового імпульсу 13-елементної послідовності кодується двома бітами, тобто номер послідовності, вибраної як сигнал збудження для даного підсегмента.

Таким чином, вихідна інформація кодера мови для одного сегмента мови включає:

- параметри фільтра короткотривалого лінійного передбачення – 8 коефіцієнтів логарифмічного відношення площ r_i , $i=1, \dots, 8$ – один набір на весь сегмент;
- параметри фільтра довготривалого лінійного передбачення – коефіцієнт передбачення g і затримка d – для кожного з чотирьох підсегментів;
- параметри сигналу збудження – номер послідовності n , максимальна амплітуда v , нормовані амплітуди b_i , $i=1, \dots, 13$, імпульсів послідовності – для кожного з чотирьох підсегментів.

Число бітів, що відводяться на кодування переданих параметрів, наведено в табл. 3.2. Всього для одного 20-мілісекундного сегмента мови передається 260 біт інформації, тобто, тут кодер мови здійснює стиснення інформації майже в 5 разів ($1280:260 = 4,92$). Перед видачею в канал зв'язку вихідна інформація кодера мови також піддається додатково канално-му кодуванню.

Таблиця 3.2 - Кодування вихідної інформації кодера мови стандарту GSM

Передані параметри	Число біт	Примітка
Параметри фільтра короткотривалого передбачення (логарифмічне відношення площ r_i , $i=1, \dots, 8$)	36	r_1, r_2 - по 6 біт, r_3, r_4 - по 5 біт, r_5, r_6 - по 4 біти, r_7, r_8 - по 3 біти,
Параметри фільтра довготривалого передбачення (коефіцієнт передбачення g , затримка d , для кожного з 4 підсегментів)	36	g – 2 біта, d – 7 біт
Параметри сигналу збудження (номер послідовності n , максимальна амплітуда v , нормовані амплітуди імпульсів b_i , $i=1, \dots, 13$, для кожного з 4 підсегментів)	188	n – 2 біта, v – 6 біт, b – 3 біта
Всього за 20-мс сегмент	260	

Перейдемо до декодера. Послідовність виконуваних ним функцій загалом зрозуміла з нижньої частини блок-схеми (див. рис. 3.6) і ми обмежимося невеликими поясненнями до неї. Блок формування сигналу збудження, використовуючи прийняті параметри сигналу збудження, відновлює 13-імпульсну послідовність сигналу збудження для кожного з підсегментів сигналу мови, включаючи амплітуди імпульсів і їх розташування в часі. Сформований таким чином сигнал збудження фільтрується фільтром-синтезатором довготривалого передбачення, на виході якого виходить відновлений залишок передбачення фільтра-аналізатора короткочасного передбачення.

Останній фільтрується гратчастим фільтром-синтезатором короткочасного передбачення, причому параметри фільтра заздалегідь перетворюються з логарифмічних відношень площ r_i , в коефіцієнти часткової кореляції k_i . Вихідний сигнал фільтра-синтезатора короткочасного передбачення фільтрується (у блоці пост-фільтрації) цифровим фільтром, який відновлює амплітудні співвідношення частотних складових сигналу мови, тобто компенсує попереднє спотворення, внесені вхідним фільтром блока попередньої обробки кодера. Сигнал на виході фільтра постає відновленим цифровим сигналом мови.

Таким чином, ми розглянули всі намічені питання, що відносяться до власне кодування мови в стільниковому зв'язку. Проте, перш ніж закінчити цей розділ, зупинимося ще на двох питаннях: методах оцінювання якості кодування і прогресі, що безперервно продовжується в техніці кодування.

З попереднього викладу ясно, що створення економічного і досконалого кодека мови є складним творчим процесом, пов'язаним з безперервними пошуками і знахідками, причому багато технічних рішень настільки різноманітні, що їх зіставлення само по собі виявляється непростим завданням. Тому абсолютно необхідні методи і критерії, що дозволяють більш менш об'єктивно зіставляти і оцінювати різні методи кодування і на підставі цих оцінок ухвалювати обґрунтовані рішення. Такі методи існують, і основні критерії в них пов'язані із сприйняттям мови людиною, тобто з експертними оцінками.

При оцінюванні якості кодування і зіставленні різних кодеків оцінюються розбірливість мови і якість синтезу (якість звучання) мови. Для оцінювання розбірливості мови використовується метод DRT (Diagnostic Rhyme Test – діагностичний римований тест). У цьому методі підбираються пари близьких за звучанням слів, що відрізняються окремими приголосними, які багато разів вимовляються декількома дикторами, і за наслідками випробувань оцінюється частка спотворень. Метод дозволяє отримати як оцінку розбірливості окремих приголосних, так і загальну оцінку розбірливості мови.

Для оцінювання якості звучання використовується критерій DAM (Diagnostic Acceptability Measure – діагностична міра прийнятності). Випробування полягають в читанні декількома дикторами, чоловіками і жін-

ками, ряду спеціально підібраних фраз, які прослуховуються на виході тракту зв'язку декількома експертами-слухачами, що виставляють свої оцінки за п'ятибальною шкалою. Результатом є *середня суб'єктивна оцінка* або *середня оцінка думок* (*Mean Opinion Score – MOS*). Хоча цей метод є суб'єктивним за своєю суттю, його результати щодо зіставлення різних типів кодеків при проведенні випробувань одними і тими ж групами дикторів і експертів-слухачів є, мабуть, достатньо об'єктивними, і на них ґрунтуються практично всі виводи і рішення.

Як приклад в табл. 3.3 наведені результати оцінювання чотирьох типів кодеків. Близькі до шкали MOS результати дає об'єктивний метод оцінювання якості з використанням поняття *кентральної відстані* (*Cepstrum Distance – CD*).

Зі сказаного ясно також, що існує безліч варіантів кодеків мови, зокрема в класі кодеків лінійного передбачення, з числа яких доводиться вибирати кодек для системи стільникового зв'язку. Зокрема при розробці стандарту GSM було ретельно досліджено шість типів кодеків-кандидатів, після чого вибір був зупинений на кодеку RPE-LTP. Робота із вибору типу кодека для стандарту GSM була завершена в 1988 р., а в 1989 р. був запропонований метод VSELP, прийнятий потім в стандарті D-AMPS. Інтенсивні роботи з вдосконалення кодеків мови продовжуються і в наш час. Обома стандартами – і D-AMPS, і GSM – передбачено введення напівшвидкісного кодування, яке зможе збільшити пропускну здатність каналу зв'язку ще вдвічі.

У числі досліджуваних варіантів для стандарту D-AMPS розглядається можливість введення векторного квантування параметрів лінійних спектральних пар з розщеплюванням і міжкадровим передбаченням, а для стандарту GSM – використання методу кодування CELP.

Таблиця 3.3 – Оцінювання кодеків мови за шкалою MOS

Тип кодека	Темп передачі інформації, Кбіт/с	Оцінка MOS
PCM	64	4,12
ADPCM	32	3,78
RPE-LTP (стандарт GSM)	13	3,58
VSELP (стандарт D-AMPS)	8	3,44

У стандарті D-AMPS вже починає застосовуватися вдосконалений повношвидкісний кодек – *кодек алгебри лінійного передбачення з кодовим збудженням* (*algebraic code-book excited linear prediction/enhanced full rate – ACELP-EFR*), а в стандарті GSM – свій варіант вдосконаленого повношвидкісного кодека.

3.4 Канальне кодування

Кодер каналу – другий (і останній) елемент власне цифрової ділянки передавального тракту (див. рис. 1.9). Він встановлюється після кодера мови та передує модулятору, що здійснює перенесення інформаційного сигналу на носійну частоту. Основне завдання кодера каналу – завадостійке кодування сигналу мови, тобто таке його кодування, що дозволяє виявляти й значною мірою виправляти помилки, які виникають при поширенні сигналу по радіоканалі від передавача до приймача. Завадостійке кодування здійснюється за рахунок введення до складу переданого сигналу досить великого обсягу надлишкової (контрольної) інформації. В англійській термінології таке кодування носить найменування Forward Error Correcting coding (FEC coding), тобто *кодування з попереджувальною корекцією помилок*, або кодування з корекцією помилок на проході). У стільниковому зв'язку завадостійке кодування реалізується у вигляді трьох процедур – *блокового кодування (block coding)*, *згорточного кодування (convolutional coding)* і *перемежування (interleaving)*. Крім того, якщо залишатися в рамках блок-схеми рис. 1.9, кодер каналу виконує ще ряд функцій, додає керуючу інформацію, що, у свою чергу, також піддається завадостійкому кодуванню; упаковує підготовлену до передачі інформацію й стискає її в часі; здійснює шифрування переданої інформації, якщо таке передбачено режимом роботи апаратури. Послідовність виконання цих завдань показана на блок-схемі рис. 3.7.

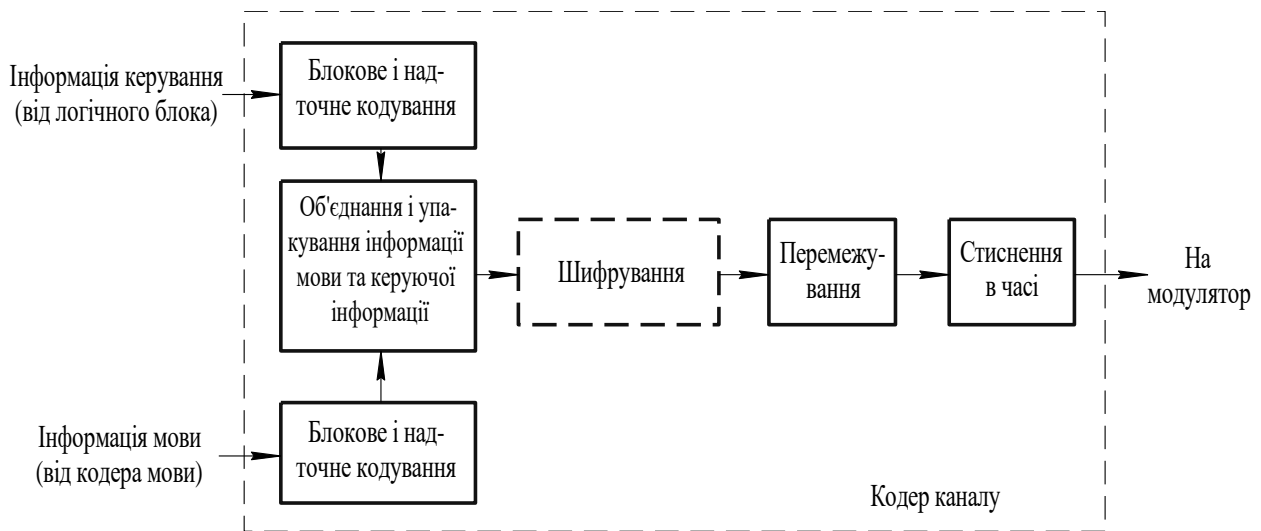


Рисунок 3.7 – Послідовність завдань, що розв'язуються кодером каналу

При блоковому кодуванні (рис. 3.8) вхідна інформація розділяється на блоки, що містять по k символів кожний, які за певним законом перетворюються кодером у n -символьні блоки, причому $n > k$. Відношення $R=k/n$ носить найменування *швидкості кодування (coding rate)* і є мірою надмірнос-

ті, внесеної кодером. При раціонально побудованому кодері менша швидкість кодування, тобто більша надмірність, відповідає більш високій завадостійкості.

Підвищенню завадостійкості сприяє також збільшення довжини блока. Блоковий кодер з параметрами n , k позначається (n, k) . Якщо символи вхідної й вихідної послідовностей є двійковими, тобто складаються з одного біта кожен, то кодер називається *двійковим* (binary); саме двійкові коди використовуються в стільниковому зв'язку. Схема, подана на рис. 3.8, відповідає двійковому блоковому кодеру $(5, 4)$. Кожний біт блока вихідної інформації утворюється як сума за модулем 2 декількох біт (від одного до k) вхідного блока, для чого використовується n суматорів за модулем 2. Правила двійкового підсумовування за модулем 2 визначаються за табл. 3.4. Один із суматорів на схемі рис. 3.8 (другий праворуч) є виродженням – на його вхід надходить лише один доданок.

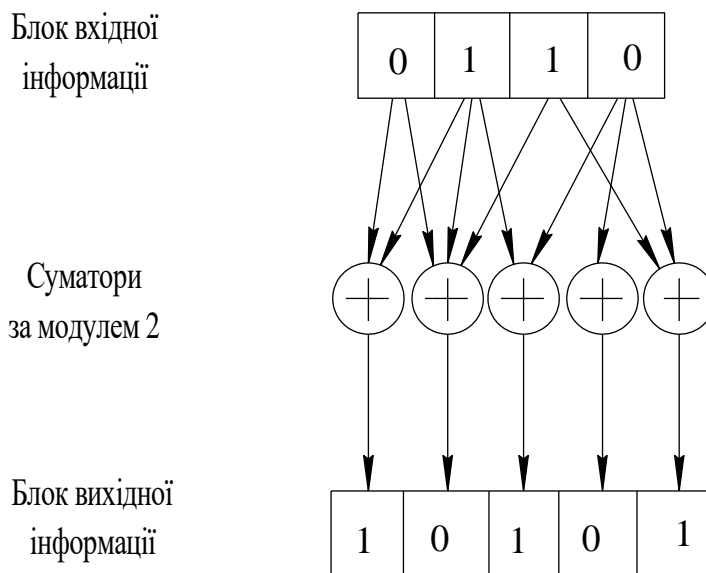


Рисунок 3.8 – Схема двійкового блокового кодера $(5, 4)$
 $(n = 5, k = 4, R = k/n = 4/5)$

Таблиця 3.4 – Алгоритм двійкового підсумовування за модулем 2

Перший доданок	Другий доданок	Сума
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

На рис. 3.9 показана схема іншого блокового кодера – це так званий *систематичний кодер*. Відмінна риса систематичного кодера полягає в тому, що до складу блока вихідної інформації включається повністю блок вхідної інформації; тривіальні суматори, що відповідають формуванню цієї

частини вихідного блока, на схемі не показані. Систематичний кодер з рис. 3.9 – найпростіший: вихідний блок, крім копії вхідного, містить лише один надлишковий біт, що є сумою за модулем 2 всіх біт вхідного блока.

Цей надлишковий біт називається кодом *контролю парності*, оскільки, як неважко переконатися, число одиниць у вихідному блоці, з урахуванням контрольного біта, виявляється парним. Для 8-бітового блока двійкової інформації використовується найменування байт, і схема рис. 3.9 може бути названа схемою побайтного контролю парності. На прикладі цієї схеми ми покажемо можливість виявлення помилок за допомогою блокового коду, а потім, трохи ускладнивши схему кодування, – і можливість корекції помилок.

На рис. 3.10, а показані сім блоків вихідної інформації кодера рис. 3.9, причому останній біт у кожному байтовому блоці, відзначений затіненим фоном, є кодом парності. Очевидно, що при наявності одиночної помилки в будь-якому блоці, включаючи й помилку в коді парності, порушується правило формування коду парності, на підставі цього вона й виявляється. Однак помилка локалізується лише з точністю до байта, а тому не може бути виправлена, тому що невідомо, який саме біт у байті помилковий. Настільки ж очевидно, що подвійна помилка в блоці (і взагалі – помилка в парному числі біт) цією схемою не виявляється.

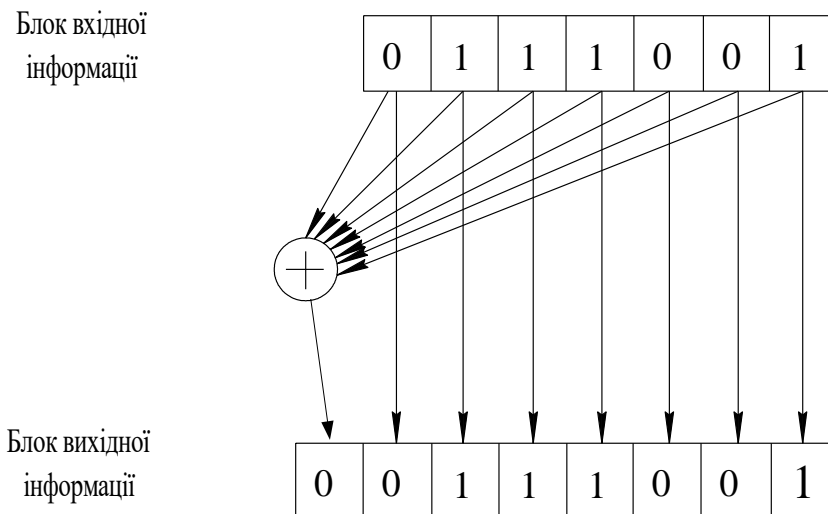


Рисунок 3.9 – Схема систематичного двійкового блокового кодера (8,7)

Якщо, крім контролю парності по рядках для всієї наведеної інформації (рис. 3.10, а), ввести ще й контроль парності по стовпцях (нижній рядок на рис. 3.10, б), то при наявності одиночної помилки в цьому 64-бітовому блоці ми зможемо вказати не тільки рядок, що містить помилку, але й стовпець із помилкою, а отже – і помилковий біт, що лежить на перетині цих рядка й стовпця. А якщо відомо, що біт помилковий, то він елементарно виправляється, оскільки для цього досить замінити нуль на одиницю або

одиницю на нуль – залежно від того, яке значення помилкового біта. Кратні помилки цією схемою вже не виправляються. Для корекції кратних помилок потрібно використати більш досконалі (і більш складні) схеми кодерів. Помітимо, що рис. 3.10, б відповідає систематичному двійковому блоковому кодеру (64, 49), і при бажанні його схема без труднощів може бути побудована за аналогією з рис. 3.9.

При згортковому кодуванні (рис. 3.11) K послідовних символів вхідної інформаційної послідовності, по k біт у кожному символі, беруть участь в утворенні n -бітових символів вихідної послідовності, $n > k$, причому на кожний символ вхідної послідовності припадає по одному символі вихідної.

Кожний біт вихідної послідовності утворюється як результат підсумування за модулем 2 декількох біт (від двох до Kk біт) K вхідних символів, для цього використовуються n суматорів з модулем 2. Згортковий кодер з параметрами n, k, K позначається (n, k, K) .

0	1	1	1	0	0	1	0
0	1	0	0	1	0	1	1
0	1	1	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	1	0	1
0	0	1	0	0	0	1	0
1	1	0	1	0	1	0	0
1	0	0	1	1	0	1	0

а)

0	1	1	1	0	0	1	0
0	1	0	0	1	0	1	1
0	1	1	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	1	0	1
0	0	1	0	0	0	1	0
1	1	0	1	0	1	0	0
1	0	0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	0	0	0	0

б)

Рисунок 3.10 – Виявлення та корекції помилок при блоковому кодуванні: а – побайтовий контроль парності дозволяє виявити одиничні помилки в байтах, б – додавання ще 8 біт контролю дозволяє виправити одну помилку у восьми байтах

Відношення $R = k/n$, як і в блоковому кодері, називається швидкістю кодування. Параметр K називається *довжиною обмеження* (constraint length), він визначає довжину регістра зсуву (у символах), вміст якого бере участь у формуванні одного вихідного символу.

Після того як черговий вихідний символ сформований, вхідна послідовність зсувається на один символ вправо (рис.3.11), в результаті цього символ 1 виходить за межі регістра, символи 2...5 переміщуються вправо, кожен на місце сусіднього, а на місце, що звільнилося, записується черговий символ вхідної послідовності, і по новому вмісті регістра формується наступний вихідний символ. Назва згорткового коду зобов'язана тому, що він може розглядатися як згортка імпульсної характеристики кодера й вхідної інформаційної послідовності. Якщо $k = 1$, тобто символи вхідної послідовності однокітні, згортковий кодер називається двійковим. Згортковий кодер, схема якого наведена на рис. 3.11, не є двійковим, оскільки для нього $k = 2$.

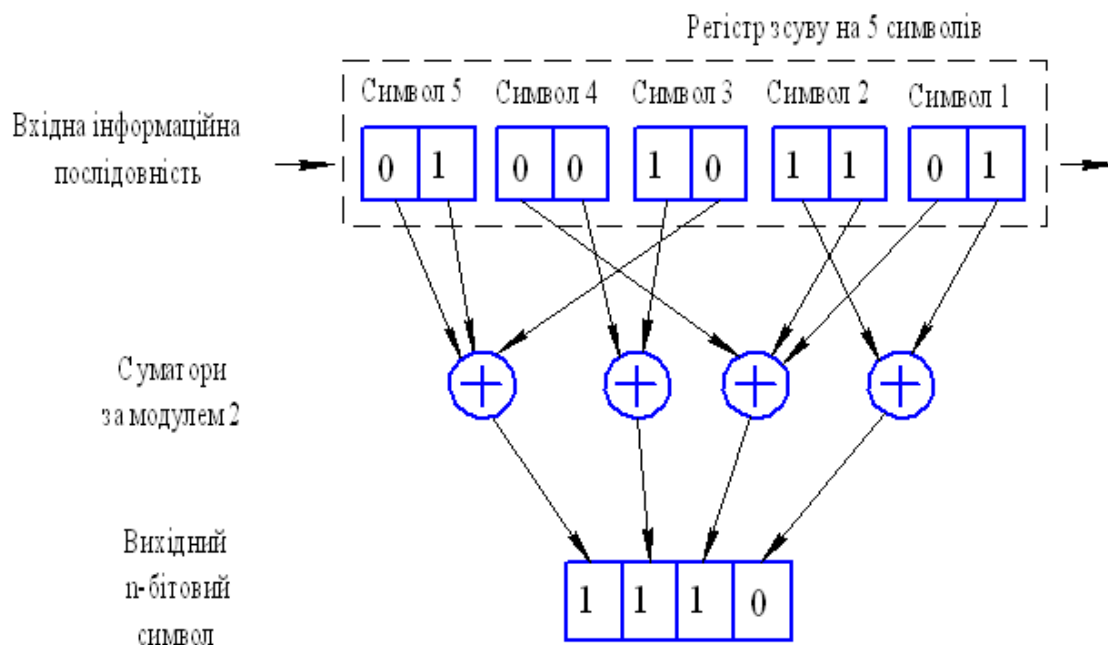


Рисунок 3.11 – Схема згорткового кодера (4, 2, 5)
 $(n = 2, k = 2, R = k/n = 1/2)$

Перемежування являє собою такі зміни порядку проходження символів інформаційної послідовності, тобто таку перестановку, або перетасування, символів, при якій символи, що стояли поруч, стають розділеними декількома іншими символами. Така процедура робиться з метою перетворення групових помилок (пакетів помилок) в одиночні помилки, з якими легше боротися за допомогою блокового та згорткового кодування.

Використання перемежування – одна з характерних рис стільникового зв'язку, і це є наслідком неминучих глибоких завмирань сигналу в умовах багатопробеневого поширення, що практично завжди має місце, особливо

в умовах щільної міської забудови. При цьому група символів, які сліду-ють один за одним та потрапляють на інтервал завмирання (провалу) сиг-налу, з великою ймовірністю є помилковими. Якщо ж перед видачею інфо-рмаційної послідовності в радіоканал вона піддається процедурі переме-жування, а на приймальному кінці відновлюється попередній порядок про-ходження символів, то пакети помилок з великою ймовірністю розсипа-ються на одиночні помилки. Відомо кілька різних схем перемежування і їхніх модифікацій – діагональна, блокова, згорткова та інші. Коротко розг-лянемо перші дві з них, що лежать в основі схем, які застосовуються у сті-льниковому зв'язку.

При діагональному перемежуванні вхідна інформація ділиться на бло-ки, а блоки – на субблоки, і у вихідній послідовності субблоки, наприклад, другої половини попереднього блока чергуються із субблоками першої по-ловини наступного блока. Така схема ілюструється на рис. 3.12, де кожний блок складається із шести субблоків, і субблоки першого блока позначені a_i , другого – b_i , третього – c_i . Субблок може складатися з декількох симво-лів або з одного символу, або навіть із одного біта. Наведена схема діаго-нального перемежування вносить малу затримку, але розставляє сусідні символи лише через один, тобто розосередження помилкових символів групи виходить порівняно невеликим.

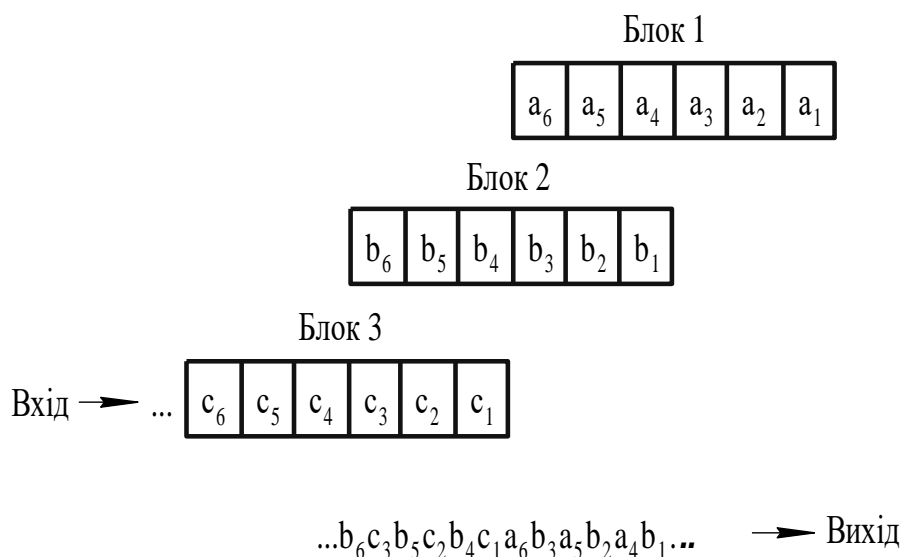


Рисунок 3.12 – Приклад схеми діагонального перемежування

При блоковому перемежуванні вхідна інформація також ділиться на блоки, по n субблоків (або символів) у кожному, і у вихідній послідовності чергуються субблоки k послідовних блоків. Роботу цієї схеми можна уяви-ти собі у вигляді запису блоків вхідної послідовності як рядки матриці ро-змірності $k \times n$ (рис. 3.13), зчитування інформації з якої проводиться по стовпцях. Отже, якщо вхідна послідовність у цьому прикладі мала вигляд $a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n, \dots, k_1, k_2, \dots, k_n$, то вихідна буде такою: $a_1, b_1, \dots, k_1, a_2, b_2, \dots, k_2, \dots, a_n, b_n, \dots, k_n$. Субблоки, або символи, в окремому випад-

ку тут також можуть складатися лише з одного біта. Схема блокового перемежування вносить більшу затримку, чим діагонального, але значно сильніше розосереджує символи групи помилок.

Загальним недоліком обох розглянутих схем є жорстка періодичність проходження переставлених символів у межах інтервалу перемежування. Цей недолік також може бути усунутий, але за рахунок застосування більш складної схеми перемежування.

3.5 Модуляція

Модулятор є останнім елементом передавального тракту (див. рис. 1.9) і, строго кажучи, не виконує ніяких операцій власне цифрової обробки сигналів. Його завдання полягає в перенесенні інформації цифрового сигналу з виходу кодера каналу на носійну частоту, тобто в модуляції надвисокочастотної (НВЧ) носійної низькочастотним (НЧ) цифровим відеосигналом. Модульований НВЧ сигнал з виходу модулятора через антенний комутатор надходить на антену й випромінюється в ефір, щоб бути потім прийнятим антенною станції-одержувача інформації. Відповідно демодулятор – перший елемент приймального тракту, і його завдання полягає у виділенні із прийнятого модульованого радіосигналу інформаційного відеосигналу, що піддається цифровій обробці в наступній частині приймального тракту.

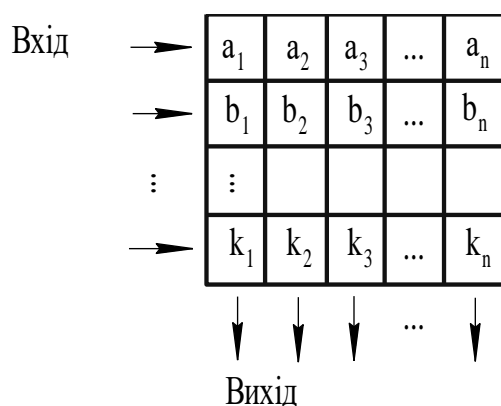


Рисунок 3.13 – Схема блокового перемежування

Як відомо, існують три основних види модуляції: це *амплітудна модуляція* – АМ (Amplitude Modulation – АМ), *частотна модуляція* – ЧМ (Frequency Modulation FM) і *фазова модуляція* – ФМ (Phase Modulation – РМ). Між тим у цифровому стільниковому зв'язку фігурують такі назви, як *квадратурна фазова маніпуляція* (Quadrature Phase Shift Keying – QPSK), *мінімальна маніпуляція* (Minimum Shift Keying – MSK) і под. Насправді це не що інше, як різновиди фазової або частотної модуляції, призначені для передачі дискретних (цифрових) сигналів, і англійський термін *shift keying*, перекладений звичайно як *маніпуляція*, у буквальному перекладі означає перемикання зсувом або перемикання стрибком, тобто дискретне переми-

кання. Дискретна модуляція (модуляція дискретними сигналами) має свою специфіку й багато в чому відрізняється від більш звичної для багатьох радіоінженерів модуляції безперервними сигналами. Що до цифрового стільникового зв'язку як обов'язкові вимоги для використовуваних методів модуляції звичайно вказують високу спектральну ефективність, низький рівень завад по суміжних частотних каналах, низьку частоту бітрової помилки (Bit Error Rate – BER), економічність (ефективність використання енергії джерела живлення, що особливо актуально для рухомої станції), простоту реалізації. Розглянемо конкретні методи модуляції, використовувані в стандартах D-AMPS і GSM, з мінімально необхідними поясненнями.

В стандарті D-AMPS використовується *диференціальна квадратурна фазова маніпуляція* зі зсувом $\pi/4$ ($\pi/4$ Differential Quadrature Phase Shift Keying – $\pi/4$ DQPSK). По суті це – дискретна фазова модуляція, з основним дискретом комутації фази $\pi/2$ (як при звичайній квадратурній фазовій маніпуляції), але з додатковим зсувом по фазі на $\pi/4$ при переході від символу до символу вхідної модульованої послідовності імпульсів. Слово *диференціальна* означає, що чергова зміна фази відлічується не відносно фази деякого опорного сигналу, а стосовно фази попереднього дискрета.

При поясненні методу $\pi/4$ DQPSK часто попередньо описують методи *бінарної фазової маніпуляції* (Binary Phase Shift Keying – BPSK), тобто, фазової маніпуляції з дискретом π , і *квадратурної фазової маніпуляції* (Quadrature Phase Shift Keying – QPSK) – фазової маніпуляції з дискретом $\pi/2$, а також метод *квадратурної фазової маніпуляції зі зсувом* (Offset Quadrature Phase Shift Keying – OQPSK). Обмежимося наведеним вище перерахуванням назв і перейдемо безпосередньо до методу $\pi/4$ DQPSK.

У цьому методі всі імпульси вхідної інформаційної послідовності b_k модулятора розбиваються на пари – на двобітові символи, і при переході від символу до символу початкова фаза НВЧ сигналу змінюється на величину $\Delta\phi$, що визначається бітами символу відповідно до алгоритму, наведеному у табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Закон фазової маніпуляції методу $\pi/4$ DQPSK

Біти вхідної послідовності модулятора		Зміна фази $\Delta\phi_k = \Delta\phi_k(X_k, Y_k)$
непарні (перші біти символу) X_k	парні (другі біти символу) Y_k	
1	1	$-3\pi/4$
0	1	$3\pi/4$
0	0	$\pi/4$
1	0	$-\pi/4$

Фазова діаграма, що відповідає цьому методу, подана на рис. 3.14. Кругечками позначені дискретні значення, які може приймати фаза носійної, що відлічується від деякого початкового значення. Стрілками позначені можливі переходи між дозволеними значеннями фази. Осі координат відповідають *синфазній* (Inphase – I) і *квадратурній* (Quadrature – Q) складовим сигналам. Ця фазова діаграма складається фактично із двох діаграм звичайної квадратурної фазової маніпуляції: фазові стани однієї з них позначені значком \oplus , а іншої – значком \otimes , і діаграми зсунуті одна відносно одної на кут $\pi/4$.

При переході від одного символу до іншого відбувається зміна фази від одного зі станів першої діаграми до одного зі станів другої, а при переході до наступного символу – повернення до попередньої діаграми, хоча швидше за все не до попереднього фазового стану. Результуючий вихідний сигнал модулятора (без врахування порівняно тонких ефектів, типу обмеженості смуги пропускання частотно-селективних елементів тракту) може бути поданий у вигляді:

$$s(t) = \cos(\omega_0 t + \varphi_k),$$

де ω_0 – несуча частота,

$\varphi_k = \varphi_{k-1} + \Delta\varphi_k$ – початкова фаза на інтервалі k -го символу.

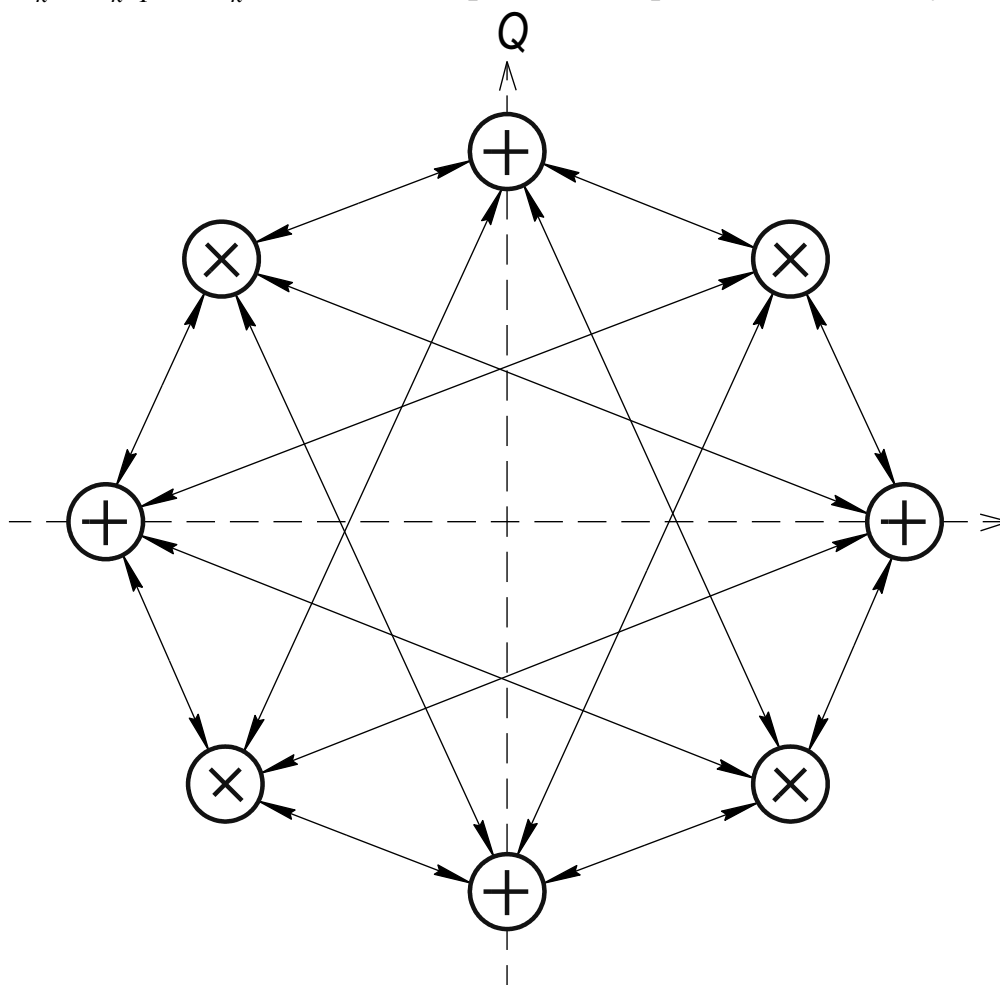


Рисунок 3.14 – Фазова діаграма, що відповідає методу $\pi/4$ DQPSK

Описаному вище модулятору $\pi/4$ DQPSK відповідає блок-схема, наведена на рис. 3.15. Мабуть єдине пояснення, що може бути зроблене до цієї схеми, робиться до роботи блока диференціального кодування фази. Останній здійснює формування амплітуд I_k, Q_k квадратурних складових чергового дискрета (символу) модульованого сигналу відповідно до алгоритму:

$$I_k = \cos \varphi_k = \cos(\varphi_{k-1} + \Delta\varphi_k) = \cos \varphi_{k-1} \cos \Delta\varphi_k - \sin \varphi_{k-1} \sin \Delta\varphi_k = \\ = I_{k-1} \cos[\Delta\varphi_k(X_k, Y_k)] - Q_{k-1} \sin[\Delta\varphi_k(X_k, Y_k)], \\ Q_k = \sin \varphi_k = \sin(\varphi_{k-1} + \Delta\varphi_k) = \sin \varphi_{k-1} \cos \Delta\varphi_k + \cos \varphi_{k-1} \sin \Delta\varphi_k = \\ = Q_{k-1} \cos[\Delta\varphi_k(X_k, Y_k)] + I_{k-1} \sin[\Delta\varphi_k(X_k, Y_k)],$$

де збільшення фази $\Delta\varphi_k$ визначається табл. 3.5. Виконання обчислень спрощується тим, що кожна з величин $\cos \Delta\varphi_k, \sin \Delta\varphi_k, I_k, Q_k$ може приймати, відповідно до рис. 3.11, лише одне з п'яти дискретних значень: $0, \pm\sqrt{2}/2, \pm 1$. Сума модульованих квадратурних складових дає остаточний вихідний сигнал:

$$I_k \cos \omega_0 t + Q_k \sin \omega_0 t = \cos \varphi_k \cos \omega_0 t + \sin \varphi_k \sin \omega_0 t = \\ = \cos(\omega_0 t + \varphi_k) = s(t).$$

Відмітимо, що наведена схема – лише ілюстрація принципу роботи модулятора, а варіантів її практичної реалізації існує щонайменше стільки ж, скільки радіоінженерів на світі.

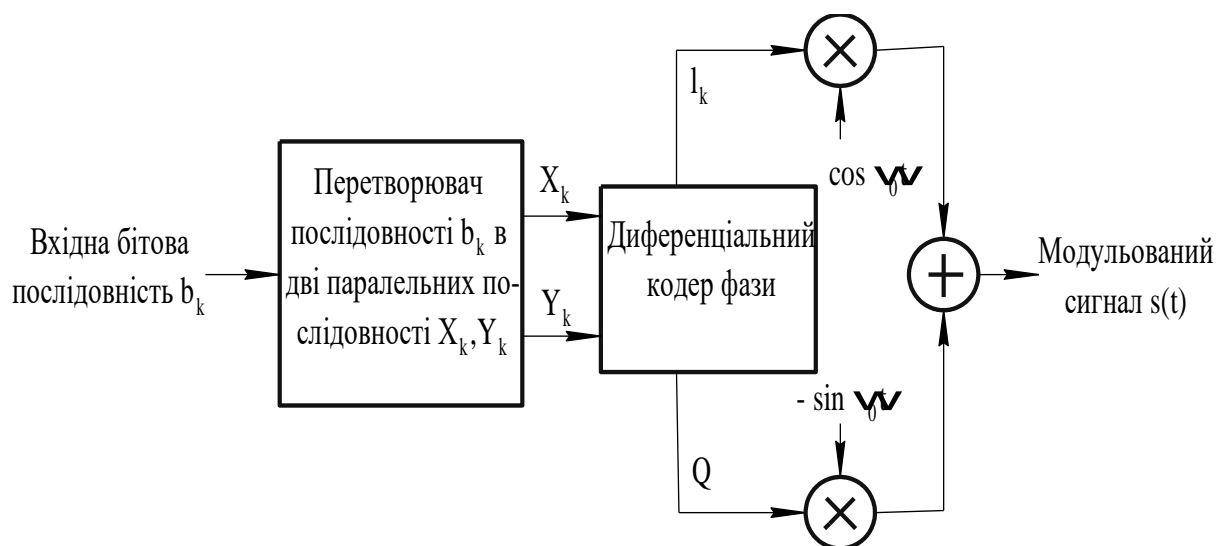


Рисунок 3.15 – Блок-схема модулятора $\pi/4$ DQPSK

У стандарті GSM використовується *гауссова 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 модульованої послідовності, – приймає значення

$$f_i = f_0 - F/4,$$

або

$$f_A = f_0 + F/4,$$

де f_0 – центральна частота використовуваного частотного каналу;

$F = 1/T$ – частота бітової послідовності.

Рознесення частот $\Delta f = f_A - f_i = F/2$ – мінімально можливе, при якому забезпечується ортогональність коливань частот f_i і f_A на інтервалі T тривалості одного біта; при цьому за час T між коливаннями частот f_i і f_A набігає різниця фаз, рівна π . Таким чином, термін "мінімальний зсув" у назві методу модуляції ставиться, у зазначеному вище змісті, до зсуву частоти. Оскільки модулююча частота у цьому випадку дорівнює $F/2$, а девіація частоти $F/4$, індекс частотної модуляції становить $\delta = (F/4)/(F/2) = 0,5$.

Термін «гауссова» у назві методу модуляції відповідає додатковій фільтрації бітової модульованої послідовності відносно смуговим фільтром Гаусса; саме ця додаткова фільтрація відрізняє метод GMSK від методу MSK (Minimum Shift Keying – маніпуляція з мінімальним зсувом).

Метод MSK іноді розглядають як метод квадратурної фазової маніпуляції зі зсувом (OQPSK), але зі заміною прямокутних модульованих імпульсів тривалістю $2T$ півхвильовими відрізками синусоїд або косинусоїд. Нижче ми пояснимо, у чому полягають підстави для такої інтерпретації. Розглянемо спочатку метод MSK, а потім відзначимо, до яких відмінностей приводить додаткова гауссова фільтрація.

У методі MSK вхідна послідовність бітових імпульсів модулятора розбивається на дві послідовності, що складаються відповідно з непарних і парних імпульсів, і модульований сигнал (вихідний сигнал модулятора) протягом чергового n -го біта визначається виразом, що залежить від стану поточного n -го та попереднього $(n-1)$ -го біта:

$$\begin{aligned} s(t) &= \pm \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \cos \omega_0 t \pm \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \sin \omega_0 t = \\ &= \pm \cos\left(\omega_0 t \pm \frac{\pi t}{2T}\right), (n-1)T \leq t \leq nT. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Тут $\omega_0 = 2\pi f_0$ – центральна частота каналу, а вибір знаків «плюс» або «мінус» перед відповідними членами виразу визначається алгоритмом, наведеним у табл.3.6.

Підкреслимо, що два біти, використовувані як аргументи закону модуляції (два перших стовпці в табл. 3.6), вибираються з врахуванням того, який біт є поточним: якщо поточний біт парний, то другим бітом пари є попередній непарний; якщо ж поточний біт непарний, то другий біт пари – попередній парний.

Таблиця 3.6 – Закон модуляції методу MSK

Біти вхідної послідовності модулятора		Знаки в першому поданні (3.1)		Знаки в другому поданні (3.1)		Значення носійної частоти
Непарний біт	Парний біт	Знак першого доданку (cos)	Знак другого доданку (sin)	Загальний знак виразу (cos)	Знак початкової фази ($\pi t/2T$)	
1	1	+	+	+	-	f_H
0	1	+	-	+	+	f_B
0	0	-	-	-	-	f_H
1	0	-	+	-	+	f_B

З виразу (3.1) слідує, що поточна фаза модульованого сигналу:

$$\varphi(t) = \omega_0 t \pm \frac{\pi t}{2T},$$

набіг фази на інтервалі T одного біта:

$$\Delta\varphi = \pm \frac{\pi}{2},$$

а миттєва частота як похідна від фази:

$$\omega(t) = \frac{d[\varphi(t)]}{dt} = \omega_0 \pm \frac{\pi}{2T} = 2\pi(f_0 \pm \frac{F}{4}).$$

Миттєва частота приймає одне із двох значень – f_H або f_B , постійне протягом біта, що й зазначено в останньому стовпці табл. 3.6.

Таким чином, зміна знака початкової фази в другій частині виразу (3.1) означає перехід від f_H до f_B або навпаки. Зміна загального знака виразу (3.1), еквівалентна зміні початкової фази на π , дозволяє зберегти безперервність фази при зміні частоти.

Наведемо ще одне пояснення методу MSK, що, можливо, буде більше наочним, для чого звернемося до рис. 3.16. На першому графіку рис. 3.16 поданий приклад вхідної бітової послідовності a модулятора.

Другий і третій графіки дають відповідно послідовності непарних a_I і парних a_Q біт вхідної послідовності, причому тривалість кожного біта збільшена вдвічі у бік запізнювання, тобто кожний біт «розтягнутий» у часі до двобітового символу, і для зручності наступних міркувань прийнято, що послідовності a_I і a_Q приймають значення +1 і -1 (значення -1 відповідає значенню 0 вихідної послідовності a).

В результаті для кожного бітового інтервалу тривалістю T розташовані одне над одним значення a_I і a_Q дають саме ту пару (парний і непарний) біт, які є аргументами закону модуляції (табл. 3.6).

Четвертий і п'ятий графіки рис. 3.16 показують форму модульованих сигналів двох квадратурних каналів b_I і b_Q , одержаних як добуток функцій a_I і a_Q відповідно на квадратурні низькочастотні сигнали і $\cos(\pi t/2T)$. Звернемо увагу на стрибкоподібні зміни фази цих сигналів на π в моменти

змін знаків a_I, a_Q .

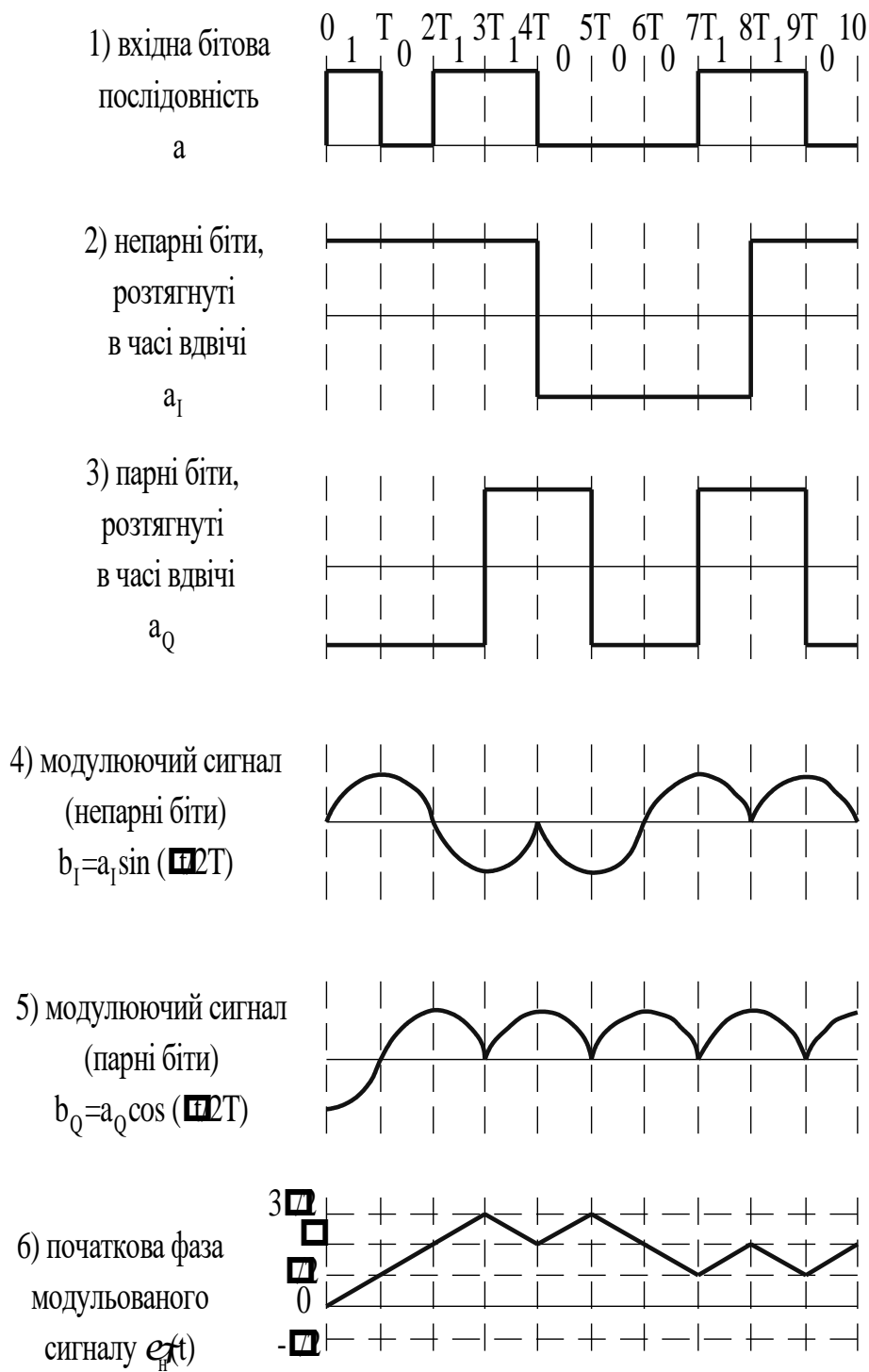


Рисунок 3.16 – Часові діаграми сигналів у методі MSK

Остаточний модульований сигнал відповідно до першої частини виразу (3.1) отримується як результат перемноження модульованих сигналів квадратурних каналів з відповідними несучими $\sin(\omega_0 t)$ і $\cos(\omega_0 t)$ і підсумовуванням отриманих добутків. Описаний принцип побудови модулятора MSK пояснюється блок-схемою рис. 3.17 (поки без врахування пер-

шого блока – фільтра Гаусса G). Підкреслимо, що ця схема також служить для ілюстрації принципу роботи модулятора. Поєднання рис. 3.16 і 3.17 разом із супутніми їм коментарями і є обіцямим раніше поясненням, чому метод MSK можна інтерпретувати як метод OQPSK із синусоїдальними модульованими імпульсами.

З наведених вище аналітичних виразів слідує, що початкова фаза φ_f модульованого сигналу в методі MSK описується лінійно-ламаною кривою (графік б на рис. 3.16), тобто залежність $\varphi_f(t)$ є безперервною, але не гладкою. Додавання гауссового фільтра, тобто фільтра низьких частот з амплітудно-частотною характеристикою у формі гауссової кривої (блок G на рис. 3.16), приводить до згладжування кривої $\varphi_f(t)$ у точках зміни. Ширина смуги B фільтра за рівнем 3 дБ вибирається рівною:

$$B = 0,3F,$$

тобто, добуток

$$BT = 0,3,$$

де T і F , як і раніше, – відповідно період і частота бітової модульованої послідовності.

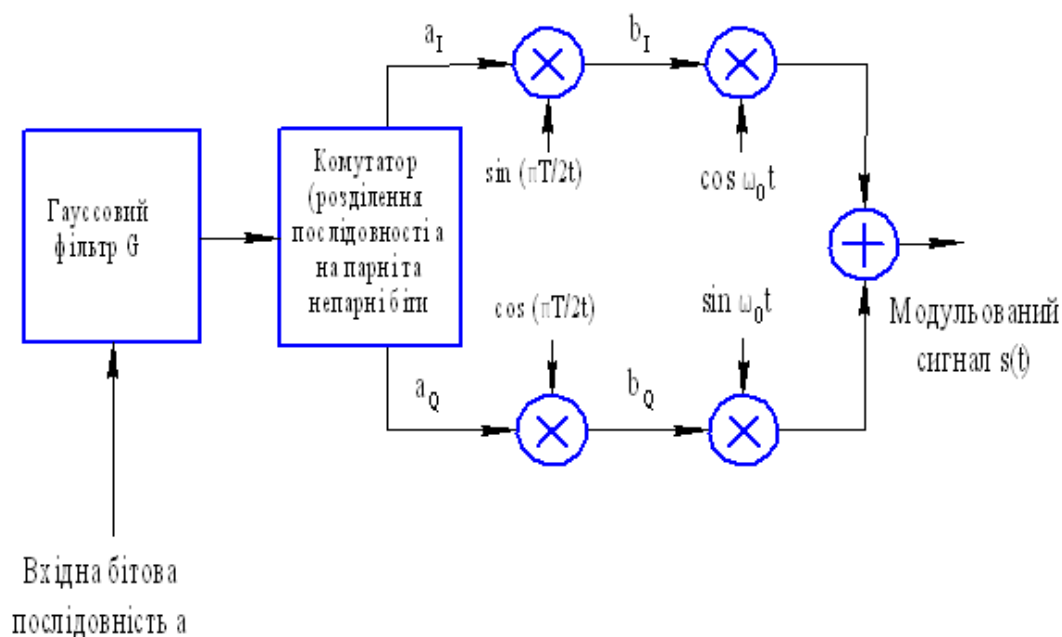


Рисунок 3.17 – Блок-схема модулятора GMSK

Оскільки в стандарті GSM $F=270,833кГц$, смуга гауссового фільтра дорівнює $B=81,3кГц$.

Введення гауссового фільтра приводить до звуження головного пелюстка й зниженню бічних пелюстків спектра на виході модулятора, чим забезпечується припустимий рівень завад по суміжних частотних каналах.

На закінчення розділу відзначимо, що методи модуляції $\pi/4$ DQPSK і GMSK є порівнянними за частотою бітової помилки (BER), хоча перша з

них забезпечує дещо більш високу ефективність використання смуги частот розраховуючи на 1 біт переданої інформації. Нагадаємо також, що метод модуляції $\pi/4$ DQPSK використовується в японському цифровому стандарті стільникового зв'язку PDC, а метод GMSK – у стандарті DECT бездротового телефону, але при $BT=0,5$.

Запитання для самоперевірки

1. У чому полягає основне завдання кодера мови?
2. Суть кодування мови на основі методу лінійного передбачення.
3. Наведіть структуру аналізуючого фільтра.
4. Наведіть структуру синтезуючого фільтра.
5. У чому полягає основне завдання кодера каналу?
6. Поясніть принцип діагонального перемежування.
7. Поясніть принцип блокового перемежування.
8. Охарактеризуйте гауссову маніпуляцію з мінімальним зсувом.
9. Наведіть і поясніть блок-схему модулятора GMSK.
10. Що таке критерій DAM?
11. Поясніть метод RPE-LTP.
12. Назвіть основні етапи цифрової обробки мови.

4 ЦИФРОВІ СИСТЕМИ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

Цифрові системи стільникового рухомого зв'язку являють собою системи другого покоління. У порівнянні з аналоговими системами вони надають абонентам більший набір послуг і забезпечують підвищену якість зв'язку, а також взаємодію з цифровими мережами з інтеграцією служб (ISDN) і пакетної передачі даних (PDN). Серед цих систем широке поширення одержали ті, які базуються на стандартах GSM (DCS1800), D-AMPS (ADC), IDC, DECT, CDMA. (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Порівняльні характеристики цифрових стандартів

Характеристики стандарту	GSM (DCS1800)	D-AMPS	JDC	CDMA
Метод доступу	TDMA	TDMA	TDMA	CDMA
Кількість мовних каналів на несучу	8(16)	3	3	32
Робочий діапазон частот, МГц	935-960 890-915 (1710-1785) (1805-1880)	824 - 840 869 - 894	810-826 940-956 1429-1441 1447-1489 1501 -1513	824-840 869-894
Рознесення каналів, кГц	200	30	25	1250
Еквівалентна смуга частот на один розмовний канал, кГц	25(12,5)	10	8,3	–
Вид модуляції	0,3 GMSK	n/4 DQPSK	n/4 DQPSK	QPSK
Швидкість передачі інформації, Кбіт/с	270	48	42	
Швидкість перетворення мови, Кбіт/с	13 (6,5)	8	11,2 (5,6)	
Алгоритм перетворення мови	RPE - LTR	VSELP	VSELP	
Розмір стільника, км	0,5–35,0	0,5–20,0	0,5–20,0	0,5–25,0

4.1 Система стандарту GSM

4.1.1 Загальні характеристики

Система стандарту GSM розрахована на використання в комерційній сфері. Вона надає користувачам широкий спектр послуг і можливість застосування різноманітного устаткування для передачі мовних повідомлень і даних, сигналів виклику і аварійних сигналів, а також можливість підк-

лючення до телефонних мереж загального користування, мереж передачі даних і цифрових мереж з інтеграцією служб.

При створенні цього стандарту і мереж стільникового зв'язку на його основі було прийнято рішення про поетапний розвиток послуг, наданих абонентам. Початковий етап - "Фаза 1" - фактично збігся з введенням у 1991 р. перших мереж GSM. У число послуг цього етапу входять:

1. *Переадресація виклику (Callforwarding);*
2. *Заборона виклику (Callbarring);*
3. *Чекання виклику (Callwating);*
4. *Утримання виклику (Callholding);*
5. *Глобальний роумінг (Globalroaming).*

Переадресація виклику дає можливість переведення вхідних викликів на інший телефонний номер у тих випадках, коли номер зайнятий або абонент не відповідає, коли телефон виключений або знаходиться поза зоною обслуговування мережі і под. Крім того, можлива переадресація факсів і комп'ютерних даних.

Заборона виклику дозволяє накласти заборону на усі вхідні/вихідні дзвінки, заборону на вихідні міжнародні дзвінки, заборону на вхідні дзвінки – за винятком внутрішньомережних.

Чекання виклику дозволяє прийняти вхідний виклик у той момент, коли ви з кимось розмовляєте. При цьому перший абонент або як і раніше буде знаходитися на зв'язку, або розмова з ним може бути завершена.

Утримання виклику – дозволяє, не розриваючи зв'язок з одним абонентом, подзвонити (або відповісти на вхідний виклик) іншому абонентові.

Глобальний роумінг дає можливість при відвідуванні кожної з країн, з якою ваш оператор підписав відповідну угоду, користуватися своїм стільниковим телефоном GSM без зміни номера.

Із розвитком технології стільникових мереж абонентам пропонувалися й інші послуги. Другий етап розвитку GSM – "Фаза 2" – завершився в 1997 році і разом з послугами етапу "Фаза 1" надав абонентам такі послуги:

1. *Визначення номера викликаючої лінії (Calling Line Identification Presentation);*
2. *Антывизначник номера (Calling Line Identification Restriction);*
3. *Груповий виклик (Multi party);*
4. *Створення закритої групи (Closed User Group);*
5. *Інформація про вартість розмови;*
6. *Порада щодо оплати (Advice of Charge);*
7. *Обслуговування додаткової лінії (Alternative Line Service);*
8. *Прийом коротких текстових повідомлень (Short Message Service);*
9. *Система голосових повідомлень (Voice mail).*

Визначення номера викликаючої лінії дозволяє при вхідному виклику висвічувати на екрані телефонний номер викликаючого абонента.

Антывизначник номера дозволяє заборонити визначення власного но-

мера при з'єднанні з іншим абонентом.

Груповий виклик дозволяє організувати режим телеконференції або конференц-зв'язку, об'єднуючи до п'яти абонентів у групу, і вести переговори між всіма членами групи одночасно.

Створення закритої групи (до десяти абонентів) дозволяє створювати групу користувачів, члени якої можуть зв'язуватися тільки між собою. Частіше за все до цієї послуги звертаються компанії, що надають термінали своїм службовцям для роботи.

Інформація про вартість розмови основана на використанні таймера, що визначає час зайнятості лінії, і лічильника викликів. Завдяки цій послугі можна перевіряти кредит, що залишився на рахунку.

Порада щодо оплати – дозволяє за вимогою користувача робити перевірку вартості і тривалості розмови в той час, коли телефон знаходиться на зв'язку.

Обслуговування додаткової лінії дає можливість користувачеві придбати два номери, що будуть приписані до одного телефону. У цьому випадку зв'язок виконується по двох лініях з наданням двох рахунків, двох голосових скриньок і под.

Приєм коротких текстових повідомлень (SMS) дає можливість прийому і передачі повідомлень до 160 знаків.

Система голосових повідомлень дозволяє автоматично переводити вхідні дзвінки на персональний автовідповідач (голосова пошта). Користуватися цим можна тільки в тому випадку, якщо в абонента активована послуга "Переадресація виклику".

Наступний етап розвитку мереж стандарту GSM, що одержав назву "Фаза 2+", не пов'язаний з конкретним роком впровадження. Нові послуги і функції стандартизуються і будуть впроваджені відразу після підготовки і затвердження їхніх технічних описів. Усі роботи з етапу "Фаза 2+" проводилися Європейським інститутом стандартизації електрозв'язку (ETSI). Кількість уже впроваджених і послуг, що знаходяться на стадії затвердження, перевищує 50. Серед них можна виділити такі:

1. Поліпшене програмне забезпечення SIM-карти;
2. Поліпшене повне швидкісне кодування мови EFR (Enhanced Full Rate);
3. Можливість взаємодії між системами стандартів GSM і DECT;
4. Підвищення швидкості передачі даних за рахунок *пакетної передачі даних* GPRS (General Packet Radio Service) або за рахунок *системи передачі даних по каналах, що комутуються*, HSCSD (High Speed Circuit Switched Data).

У порівнянні з іншими широко розповсюдженими цифровими стандартами GSM забезпечує кращі енергетичні характеристики, більш високу якість, безпеку і конфіденційність зв'язку. Прийнятна якість прийнятих мовних повідомлень у стандарті GSM забезпечується при відношенні "сигнал/шум" на вході приймача, рівному 9 дБ (для стандарту D-AMPS, це від-

ношення складає близько 16 дБ), а енергетичні витрати в реальних каналах зв'язку (при завмиранні сигналів) на 6 – 10 дБ нижчі в порівнянні зі стандартом D-AMPS.

Крім того, стандарт GSM надає своїм користувачам ряд послуг, що не реалізовані (або реалізовані неповністю) в інших стандартах стільникового зв'язку. До них відносяться:

1. Використання інтелектуальних SIM-карт для забезпечення доступу до каналу і послуг зв'язку;
2. Шифрування переданих повідомлень;
3. Закритий від прослуховування радіоінтерфейс;
4. Аутентифікація абонента і ідентифікація абонентського устаткування за криптографічними алгоритмами;
5. Використання служб коротких повідомлень, переданих по каналах сигналізації;
6. Автоматичний роумінг абонентів GSM у національному і міжнародному масштабах;
7. Міжмережний роумінг абонентів GSM з абонентами мереж стандартів DCS 1800, PCS1900, DECT, а також із супутниковими мережами персонального радіозв'язку (Globalstar, Inmarsat-P, Iridium).

Стандарт GSM цифрової загальноєвропейської стільникової системи наземного рухомого зв'язку передбачає роботу передавачів у двох діапазонах частот. Діапазон частот 890 – 915 МГц використовується для передачі повідомлень з рухомої станції на базову, а діапазон 935 – 960 МГц – для передачі повідомлень з базової станції на рухому. Причому при переключенні каналів під час сеансу зв'язку різниця між цими частотами постійна і дорівнює 45 МГц.

Рознесення частот між сусідніми каналами зв'язку складає 200 кГц. Таким чином, у відведеній для прийому/передачі смузі частот шириною 25 МГц розміщаються 124 канали зв'язку.

У стандарті GSM використовується багатостанційний доступ з часовим розділенням (ущільненням каналів – TDMA), що дозволяє на одній несучій частоті розмістити 8 мовних каналів одночасно. Як пристрій мовоутворення використовується мовний кодек RPE-LTP з регулярним імпульсним збудженням і швидкістю перетворення мови 13 Кбіт/с. Обробка мови в даному стандарті здійснюється в рамках прийнятої системи переривчастої передачі мови DTX (Discontinuous Transmission), що забезпечує включення передавача тільки тоді, коли користувач починає розмову і відключає його в паузах і наприкінці розмови (рис. 4.1). Система DTX керує детектором активності мови VAD, що забезпечує виявлення і виділення інтервалів мови із шумом і шуму без мови навіть у тих випадках, коли рівень шуму співрозмірний з рівнем мови.

Для захисту від помилок, що виникають у радіоканалах, застосовується блокове згорткове кодування з перемежуванням. Підвищення ефективності кодування і перемежування при малій швидкості переміщення рухо-

мих станцій досягається повільним переключенням робочих частот у процесі сеансу зв'язку (зі швидкістю 217 стрибків у секунду).

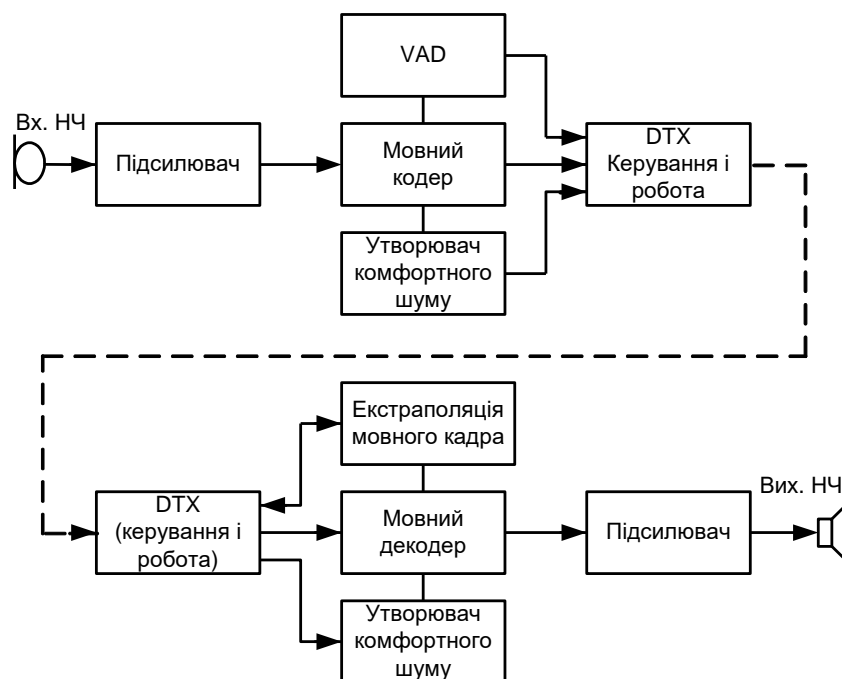


Рисунок 4.1 – Структурна схема обробки мови в стандарті GSM

Для боротьби з інтерференційними завмираннями прийнятих сигналів, викликаними багатопроменевим поширенням радіохвиль в умовах міста, в апаратурі зв'язку використовуються еквайзери, що забезпечують вирівнювання імпульсних сигналів зі середньоквадратичним відхиленням часу затримки до 16 мкс. Система синхронізації устаткування розрахована на компенсацію (до 233 мкс) абсолютного часу затримки сигналів. Це відповідає максимальній дальності зв'язку 35 км (максимальний розмір стільника).

Для модуляції радіосигналу застосовується спектрально-ефективна гауссова частотна маніпуляція з мінімальним частотним зсувом (GMSK). Маніпуляція називається так тому, що послідовність інформаційних бітів до модулятора проходить через фільтр нижніх частот з гауссовою амплітудно-частотною характеристикою, що дає значне зменшення ширини смуги частот випромінюваного сигналу. Формування GMSK-сигналу відбувається таким чином, що на інтервалі, який відповідає одному бітові, фаза несучої частоти змінюється на 90° . Це найменша зміна фази, що може бути виявлена при даному типі маніпуляції. Вихідний сигнал з неперервною зміною фази аналогічний сигналові, отриманому в результаті частотної модуляції з дискретною зміною частоти. Принцип формування GMSK-сигналу поданий на рис. 4.2.

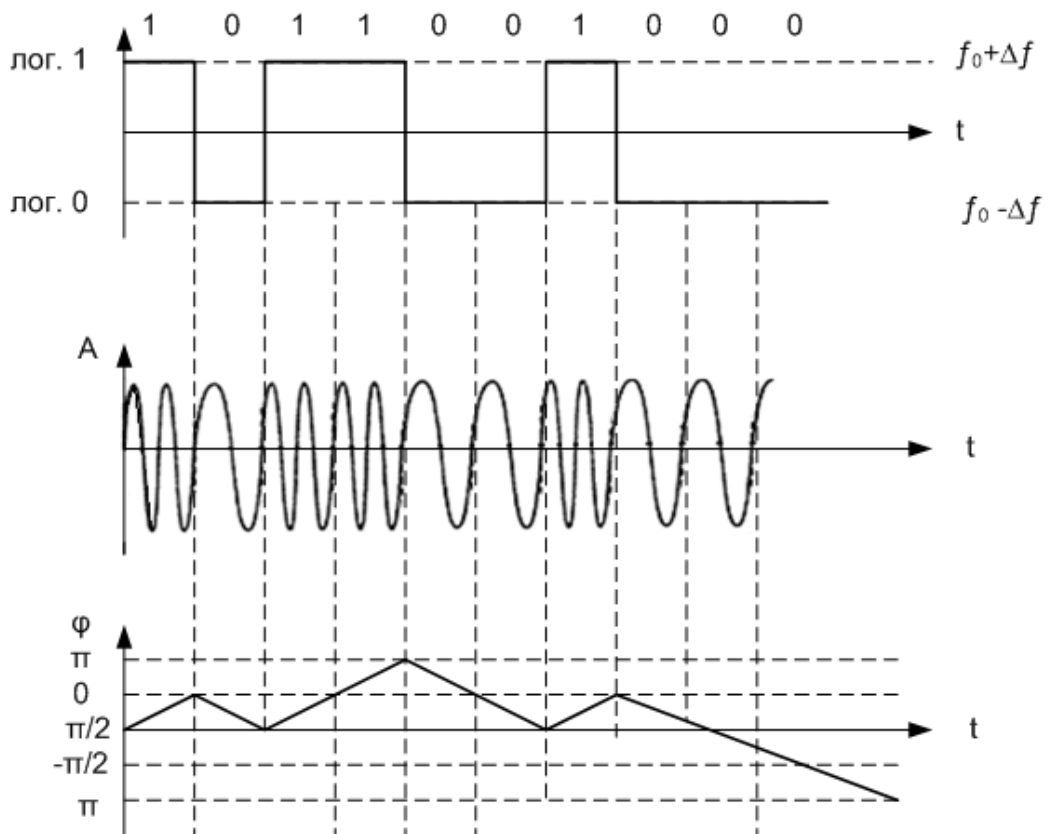
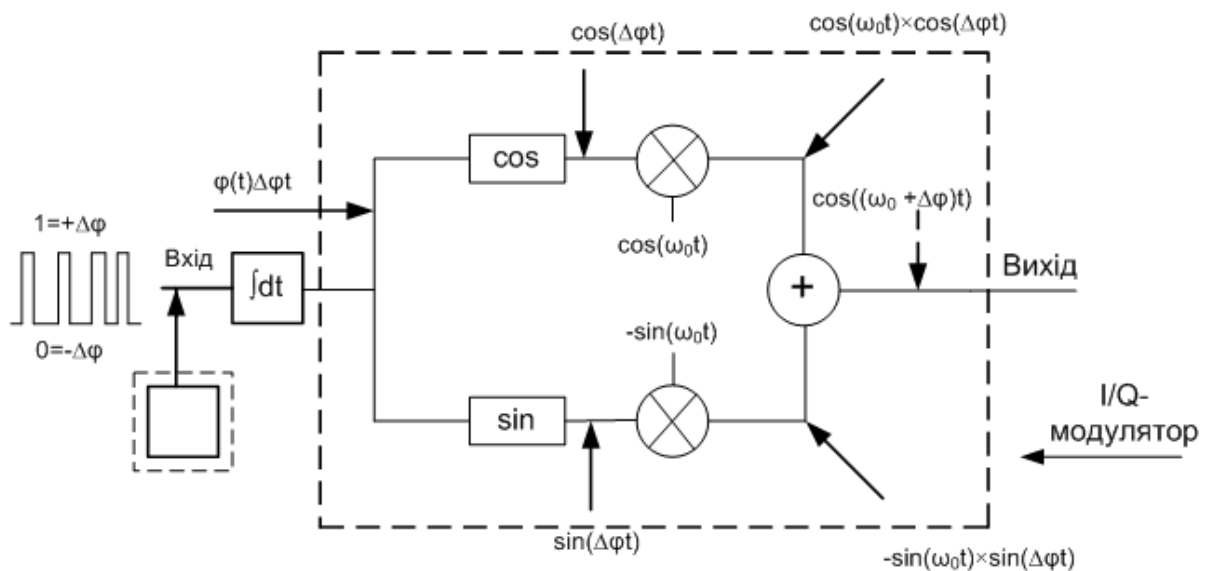


Рисунок 4.2 – Принцип формування GMSK-сигналу

У стандарті GSM використовується модуляція з нормованою смугою $BT = 0,3$, де B – ширина смуги фільтра за рівнем -3 дБ; T – тривалість передачі одного біта. Основою формувача GMSK-сигналу є I/Q-модулятор, який складається з двох помножувачів і одного суматора.

Модуляцію GMSK характеризують такі властивості:

1. Постійна за рівнем огинаюча, яка дозволяє використовувати пристрої передачі з підсилювачами потужності класу C;

2. Вузкий спектр на виході підсилювача потужності передавального пристрою, що забезпечує низький рівень випромінювання поза смугою;
3. Хороша завадостійкість каналу зв'язку.

4.1.2 Схема побудови і склад устаткування мереж

Устаткування мереж стандарту GSM містить рухомі станції (радіотелефони) і базові станції, цифрові комутатори, центр керування і обслуговування, різні додаткові системи і пристрої. Функціональне спряження елементів системи здійснюється за допомогою ряду інтерфейсів (рис. 4.3).

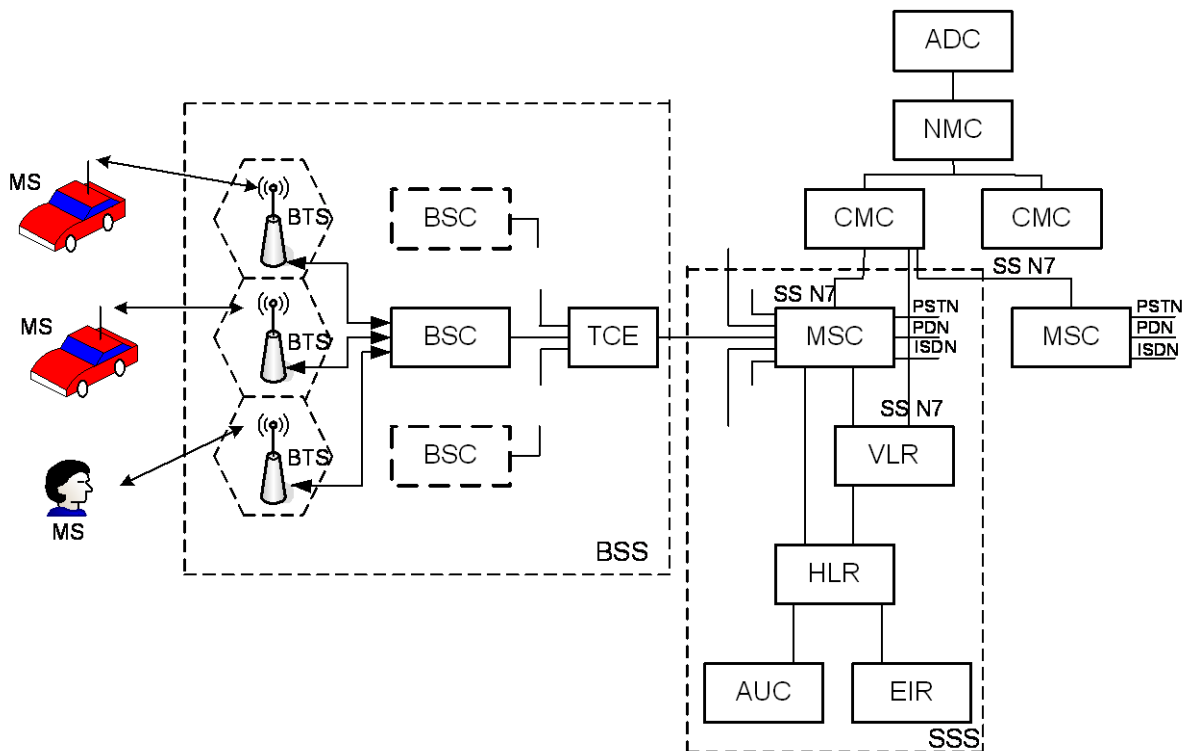


Рисунок 4.3 – Структурна схема побудови мережі стандарту GSM

Рухомі станції MS (транспортні і портативні) складаються з устаткування, призначеного для організації доступу абонентів мереж GSM до існуючих мереж зв'язку. У рамках стандарту GSM прийняті п'ять класів рухомих станцій: від моделі 1-го класу з вихідною потужністю до 20 Вт, що встановлюється на транспортних засобах, до моделі 5-го класу з максимальною вихідною потужністю до 0,8 Вт (табл. 4.2). При передачі повідомлень передбачається адаптивне регулювання потужності передавача, що забезпечує необхідну якість зв'язку. Рухомі і базові станції незалежні одна від одної.

Кожна рухома станція має свій міжнародний ідентифікаційний номер (IMSI), записаний у її пам'яті. Такий підхід дозволяє встановлювати радіотелефони, наприклад, в автомобілях, що здаються напрокат. Кожній рухомій станції присвоюється ще один міжнародний ідентифікаційний номер (IMEI), що використовується для виключення доступу до мереж GSM за

допомогою викраденої станції або станції, що не має таких повноважень.

Таблиця 4.2 – Класифікація моделей рухомих станцій

Клас моделі	Максимальна потужність передавача, Вт	Допустимі відхилення, дБ
1	20	1,5
2	8	1,5
3	5	1,5
4	2	1,5
5	0,8	1,5

Устаткування підсистеми базових станцій складається з контролера базових станцій BSC і власне базових станцій BTS. Один контролер може керувати декількома станціями. Він виконує такі функції: керує розподілом радіоканалів; контролює з'єднання і регулює їх черговість; забезпечує режим роботи зі "стрибучою" частотою, модуляцію і демодуляцію сигналів, кодування і декодування повідомлень, кодування мови, адаптацію швидкості передачі мови, даних і сигналів виклику; визначає черговість передачі повідомлень персонального виклику.

Устаткування підсистеми комутації складається з центра комутації рухомого зв'язку (MSC), реєстра положення (HLR), реєстра переміщення (VLR), центра аутентифікації (AUC) і реєстра ідентифікації устаткування (EI).

Центр комутації рухомого зв'язку обслуговує групу стільників і забезпечує всі види з'єднань, у яких має потребу рухома станція в процесі своєї роботи. Він являє собою інтерфейс між мережею рухомого зв'язку і фіксованими мережами (такими як телефонна мережа загального користування PSTN, мережі пакетної передачі PDN, цифрові мережі з інтеграцією служб ISDN), і забезпечує маршрутизацію викликів і функцію керування викликами. Крім цього на MSC покладаються функції комутації радіоканалів, до яких відносяться естафетна передача, що забезпечує безперервність зв'язку при переміщенні рухомої станції зі стільника до стільника, і переключення робочих каналів у стільнику з появою перешкод або несправностей.

Центр комутації здійснює постійне спостереження за рухомими станціями, використовуючи реєстри положення (HLR) і реєстри переміщення (VLR). У реєстрі положення зберігається та частина інформації про місце розташування якої-небудь рухомої станції, що дозволяє центрові комутації доставити виклик. Цей реєстр містить міжнародний ідентифікаційний номер рухомого абонента (IMSI), який використовується для впізнання рухомої станції в центрі аутентифікації (AUC), а також ще деякі дані, необхідні для нормальної роботи мережі GSM. Перелік довгострокових даних, що зберігаються в обох реєстрах, поданий на рис. 4.4.

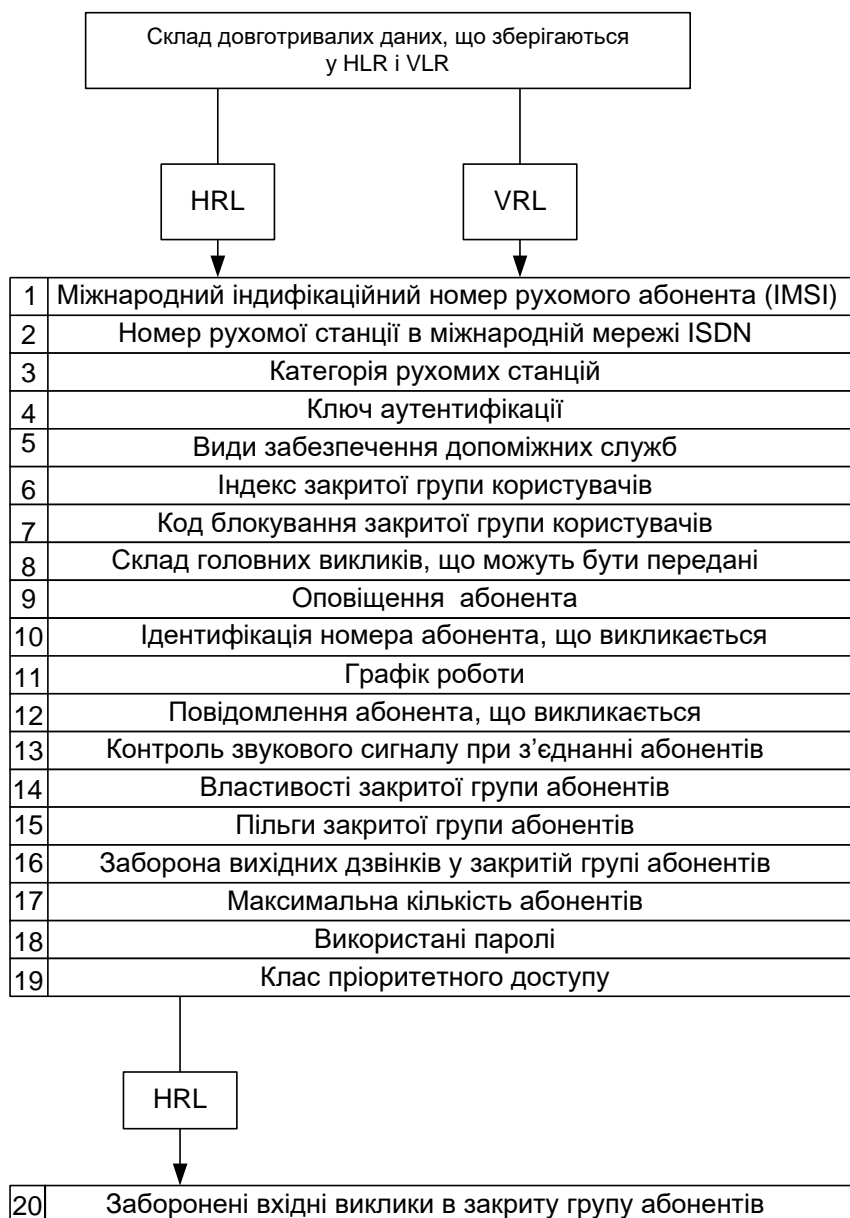


Рисунок 4.4 – Склад довгострокових даних, що містяться у реєстрі положення

Реєстр переміщення – це другий основний пристрій, що забезпечує контроль за пересуванням рухомої станції зі стільника до стільника. З його допомогою досягається функціонування рухомої станції за межами зони, контрольованої реєстром положення. Коли в процесі переміщення рухома станція переходить із зони дії одного контролера базових станцій у зону дії іншого, вона реєструється останнім, тобто в реєстр переміщення заноситься нова інформація. Для збереження даних, що знаходяться в реєстрах положення і переміщення, у випадку збоїв передбачений захист запам'ятовуючих пристроїв цих реєстрів. Склад короточасних даних, що зберігаються в обох реєстрах, наведений на рис. 4.5.

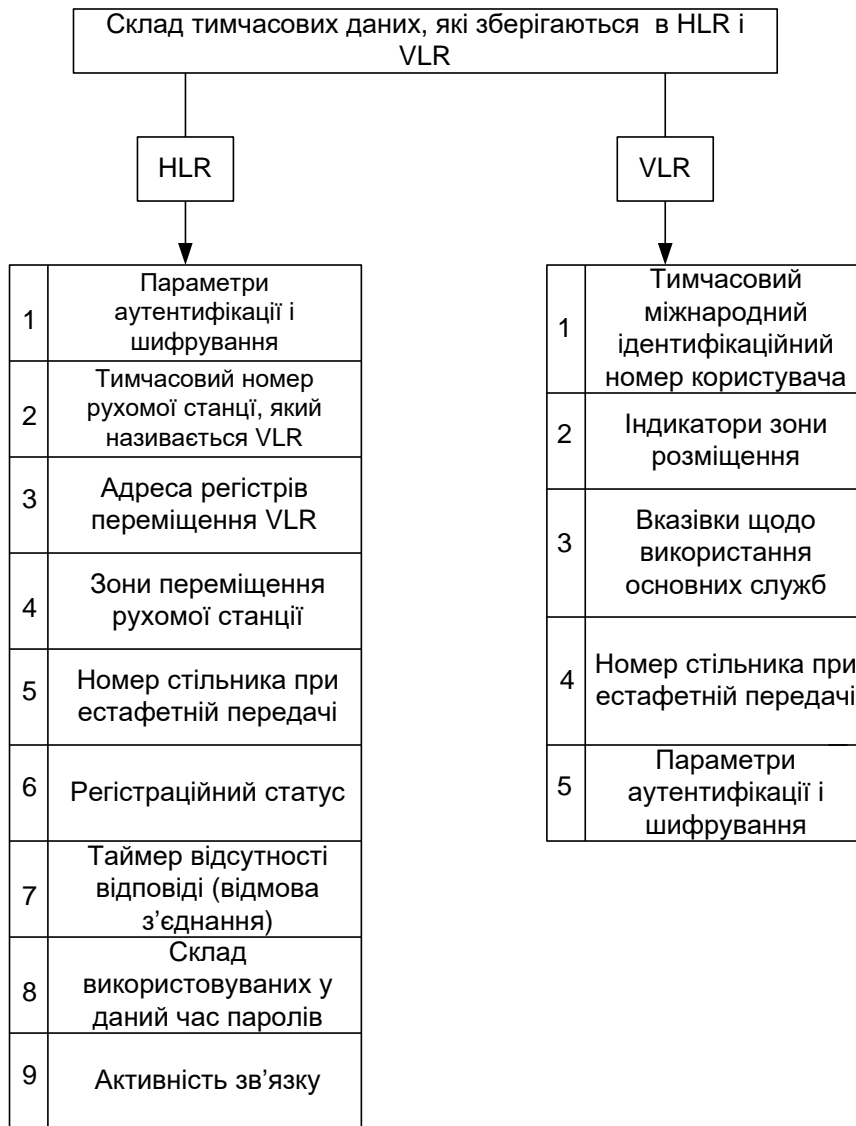


Рисунок 4.5 – Склад короткотривалих даних

Для виключення несанкціонованого використання ресурсів системи стільникового зв'язку в неї введені механізми аутентифікації – посвідчення дійсності абонента. Центр аутентифікації (AUC) складається з декількох блоків і формує ключі і алгоритми аутентифікації. З його допомогою перевіряються повноваження абонента і здійснюється його доступ до мережі зв'язку. AUC приймає рішення про параметри процесу аутентифікації і визначає ключі шифрування на основі бази даних, зосередженої в реєстрі ідентифікації устаткування (EI).

Кожен рухомий абонент на час користування системою стільникового зв'язку отримує стандартний модуль дійсності абонента – SIM-карту, яка містить: міжнародний ідентифікаційний номер абонента (IMSI), індивідуальний ключ аутентифікації (K_i), алгоритм аутентифікації (A3). За допомогою цієї інформації, у результаті взаємного обміну даними між рухомою станцією і мережею, здійснюється повний цикл аутентифікації і дозволяється доступ абонента до мережі.

SIM-карта (Subscriber Identification Module) являє собою пластикову смарт-карту з чипом, на якому міститься інформація, яка ідентифікує унікального абонента в стільниковій мережі. Крім того, на SIM-карті знаходиться різна інформація, наприклад, записна книжка з телефонами (кількість залежить від конкретного оператора і карти; звичайно це 100 номерів). Без SIM-карти телефон можна використовувати тільки для екстрених дзвінків – таких, як виклик міліції і швидкої допомоги. Розміри карти 25×15 мм, товщина 1 мм. Карта програмується стільниковим оператором і має свій номер, що для користувача не становить майже ніякого інтересу. Важливі тільки ті коди, що даються з SIM-картою: PIN-код і PUK-код.

PIN-код (Personal Identity Number) – персональний ідентифікаційний номер. Після того як SIM-карта вставлена в телефон і включене живлення, на дисплеї будь-якого телефону з'явиться повідомлення: "Введіть пін-код". Після цього в користувача є три спроби для правильного введення ідентифікаційного номера. Якщо цей номер не введений із трьох спроб, то SIM-карта телефону буде заблокована. Розблокувати SIM-карту можна, лише знаючи PUK-код.

PUK-код (Personal Unlock Key) – персональний ключ розблокування. При блокуванні SIM-карти телефону її можна розблокувати тільки введенням PUK-коду, на це в користувача є десять спроб, після чого, якщо код увесь час вводився неправильно, SIM-карта блокується цілком. Щоб розблокувати її після цього, доведеться звернутися до оператора стільникової мережі.

Процедура перевірки дійсності абонента подана на рис. 4.6.

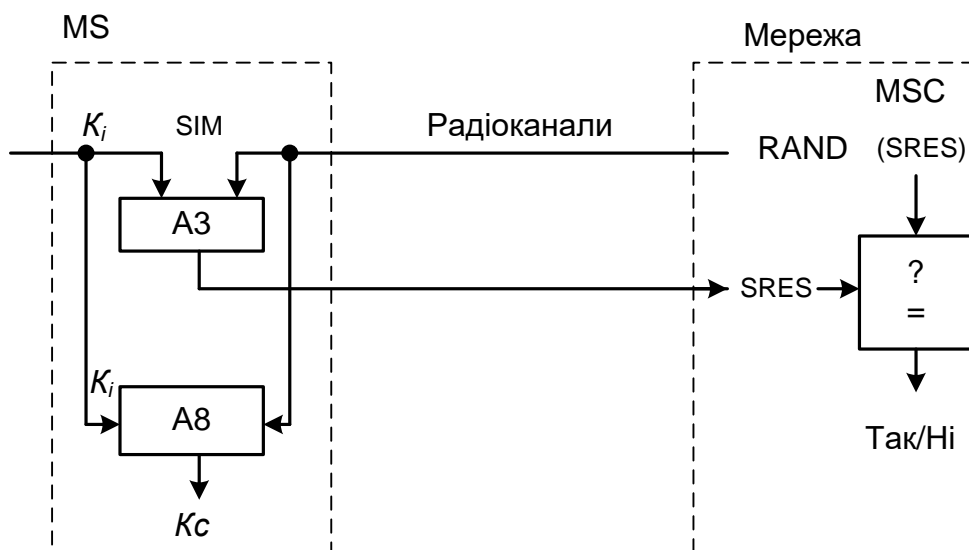


Рисунок 4.6 – Процедура перевірки абонента

Спочатку мережа передає на рухому станцію деяке випадкове число (RAND). В апаратурі стільникового радіотелефону за допомогою індивідуального ключа K_i і алгоритму A3 виконується перетворення отриманого

числа (шляхом математичних обчислень) і обчислюється результат (SRES), тобто нове число. Це число рухома станція посилає назад у мережу, яка порівнює його з числом, визначеним безпосередньо мережею. Якщо обидва числа збігаються – то рухома станція одержує доступ до мережі. У протилежному випадку зв'язок переривається, і індикатор рухомої станції показує, що ідентифікація (впізнання абонента) не відбулася. Для забезпечення таємності обчислення відгуку відбувається потай (SIM-картою).

Центр керування і обслуговування (ОМС) забезпечує розподіл функцій і організацію взаємодії між центром комунікації (MSC) і підсистемою базових станцій (BSS). Його функції збігаються з функціями центра керування і обслуговування в звичайних мережах зв'язку. Розходження полягає лише в тому, що в мережах стандарту GSM центр ОМС забезпечує керування роботою радіопідсистеми.

4.1.3 Структура і формування сигналів

У стандарті GSM прийнятий багатостанційний доступ з часовим розділенням каналів – TDMA (Time Division Multiple Access). Процес передачі сигналу виглядає так. Спочатку здійснюється перетворення аналогового мовного сигналу в цифрову послідовність, яка піддається шифруванню і кодуванню, що необхідно для захисту інформації від помилок у процесі передачі і прийому. Для цього використовуються:

1. Блокове кодування – для швидкого виявлення помилок при прийомі;
2. Згорткове кодування – для виправлення одиночних помилок;
3. Перемежування – для перетворення пакетів помилок у одиночні помилки.

У результаті цих перетворень кожен відлік рівня вихідного аналогового сигналу подається у вигляді зашифрованого повідомлення, що складається з 114 бітів – двох самостійних блоків по 57 бітів (рис. 4.7), розділених між собою еталонною (навчальною) послідовністю (26 бітів). При прийомі цієї послідовності визначається характер спотворень у тракці поширення сигналу, і характеристики приймача формуються вже відповідно до конкретних умов роботи в даний момент часу.

Для передачі інформації з каналів керування і зв'язку, для підстроювання несучих частот, забезпечення часової синхронізації і доступу до каналу зв'язку використовуються п'ять видів часових позицій (вікон):

1. NB (Normal Burst) – нормальний часовий інтервал;
2. FB (Frequency Correction Burst) – часовий інтервал підстроювання частоти;
3. SB (Synchronisation Burst) – інтервал часової синхронізації;
4. DB (Dummy Burst) – установний інтервал;
5. AB (Access Burst) – інтервал доступу.

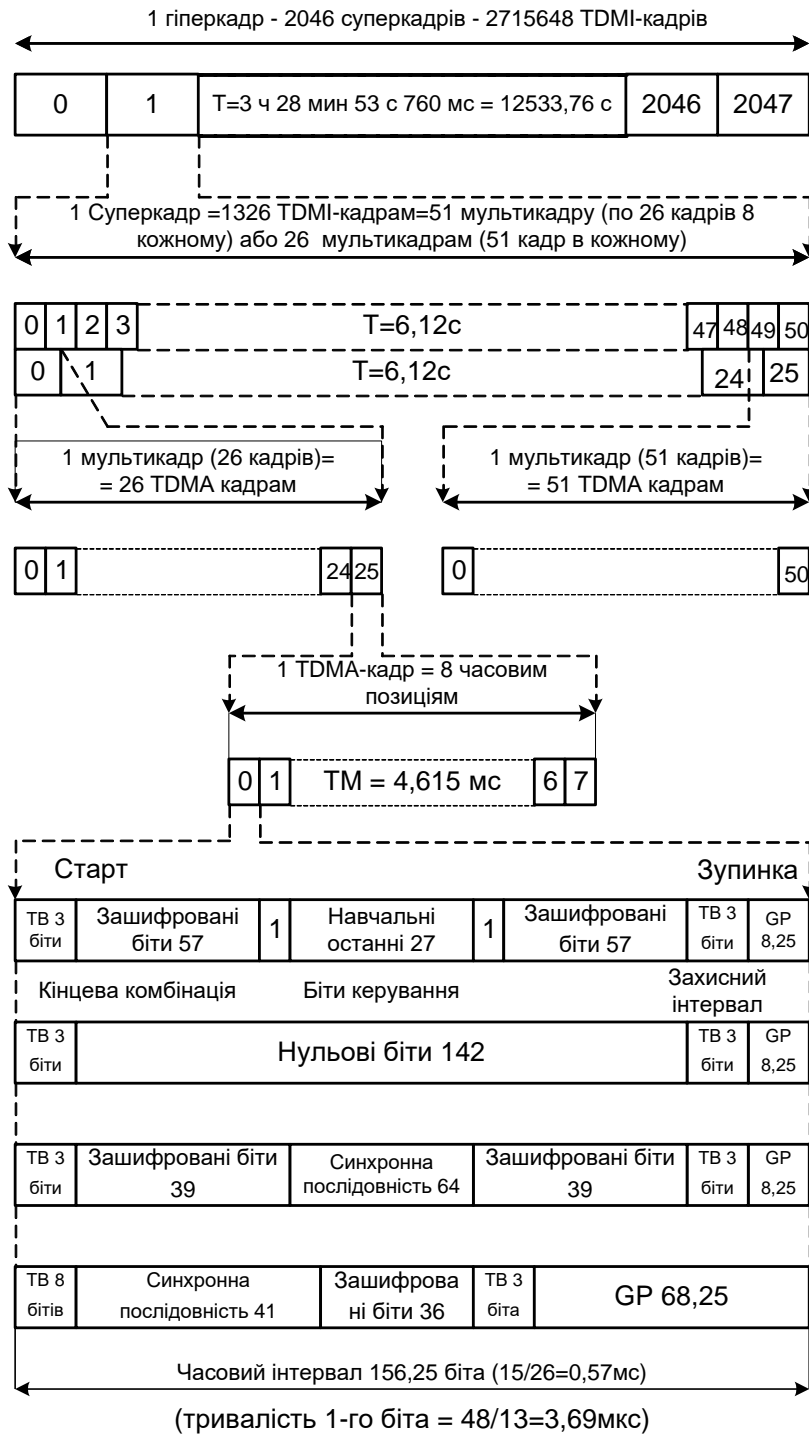


Рисунок 4.7 – Структура кадрів і формування сигналів у стандарті GSM

При передачі по одному розмовному каналі в стандарті GSM використовується нормальний часовий інтервал NB (пакет) тривалістю 0,577 мс, що містить у собі: 114 бітів зашифрованого повідомлення; дві кінцеві комбінації ТВ (Tail Bits) по 3 біти кожна; два контрольних біти, що розділяють зашифровані біти повідомлення і еталонну (навчальну) послідовність; захисний інтервал GP (Guard Period) тривалістю, рівною часу передачі 8,25

біта. Це означає, що інтервал NB містить 156,25 біта, а тривалість одного біта складає 3,69 мкс.

Часовий інтервал підстроювання частоти FB містить 142 нульових біти, дві кінцеві комбінації ТВ і захисний інтервал GP. Повторювані часові інтервали підстроювання частоти утворюють канал установлення частоти (FSSN).

Інтервал часової синхронізації SB використовується в рухомій станції для синхронізації роботи апаратури. Він складається із синхропослідовності довжиною 64 біти і двох зашифрованих блоків (по 39 бітів кожний), що несуть інформацію про номер TDMA-кадру і ідентифікаційний код базової станції. Цей інтервал передається разом з інтервалом установлення частоти. Повторювані інтервали синхронізації утворюють так званий канал синхронізації (SCH).

Установний інтервал DB забезпечує встановлення і тестування каналу зв'язку. За своєю структурою установний інтервал збігається з нормальним часовим інтервалом NB. Розходження їх полягає в тому, що інтервал DB містить встановлювальну послідовність довжиною 26 бітів і в ньому відсутні контрольні біти.

Інтервал доступу AB забезпечує дозвіл доступу рухомої станції до нової базової станції. Він містить великий захисний інтервал GP довжиною 68,25 біта (тривалістю 252 мкс), дві кінцеві комбінації ТВ (по 3 біти кожна), синхропослідовність довжиною 41 біт і 36 зашифрованих бітів. Великий захисний інтервал (252 мкс) забезпечує можливість зв'язку з рухомими абонентами в стільниках радіусом до 35 км, оскільки він перекриває час поширення радіосигналу в прямому і зворотному напрямках, що може досягати при цьому 233,3 мкс.

Передача інформації при часовому поділі каналів здійснюється в складі TDMA-кадру. Кожен часовий інтервал цього кадру позначається номером від 0 до 7, тобто в одному кадрі одночасно можуть передаватися 8 мовних каналів. Фізичний зміст часових інтервалів – це час, протягом якого здійснюється модуляція несучої частоти цифровим інформаційним потоком, що відповідає мовному повідомленню або даним.

Цифровий інформаційний потік являє собою послідовність пакетів, розташовуваних у цих часових інтервалах (вікнах). Формовані пакети трохи коротші, ніж інтервали, їхня тривалість складає 0,546 мс, що необхідно для прийому повідомлення при наявності часової дисперсії в каналі поширення. Загальна тривалість одного TDMA-кадру складає 4,615 мс.

З TDMA-кадрів складаються мультикадри. Для організації різних каналів зв'язку і керування в стандарті GSM використовуються два види мультикадрів:

1. Мультикадри, що складаються з 26 TDMA-кадрів;
2. Мультикадри, що складаються з 51 TDMA-кадру.

Тривалість одного мультикадру першого виду дорівнює 120 мс, другого – 235,385 мс. З 51 мультикадру першого виду (по 26 кадрів) або з 26

мультикадрів другого виду (по 51 кадр) складається суперкадр тривалістю 6,12 с (1326 TDMA-кадрів).

2048 суперкадрів складають 1 гіперкадр, що містить 2715648 TDMA-кадрів. Тривалість 1 гіперкадру складає 3 год 28 хв 53 с 760 мс. Необхідність такої великої тривалості гіперкадру обумовлена вимогами застосованого процесу криптографічного захисту, у якому номер кадру використовується як вхідний параметр шифрування. Однак навіть без додаткового шифрування прослуховувати розмови практично неможливо.

Однією з особливостей формування сигналів у стандарті GSM є використання повільних стрибків за частотою в процесі сеансу зв'язку – SFH (Slow Frequency Hopping). Головне призначення таких стрибків – забезпечення частотного рознесення в радіоканалах, що функціонують в умовах багатопробеневого поширення радіохвиль. Повільні стрибки за частотою використовуються у всіх рухомих мережах, що підвищує ефективність кодування і перемешування при повільному русі абонентських станцій.

Принцип формування повільних стрибків за частотою полягає в тому, що повідомлення, передане у виділеному абонентові часовому інтервалі TDMA-кадру тривалістю 0,577 мс, у кожному наступному кадрі передається (приймається) на новій фіксованій частоті (рис. 4.8). Відповідно до структури кадрів час для перестройки частоти складає близько 1 мс.

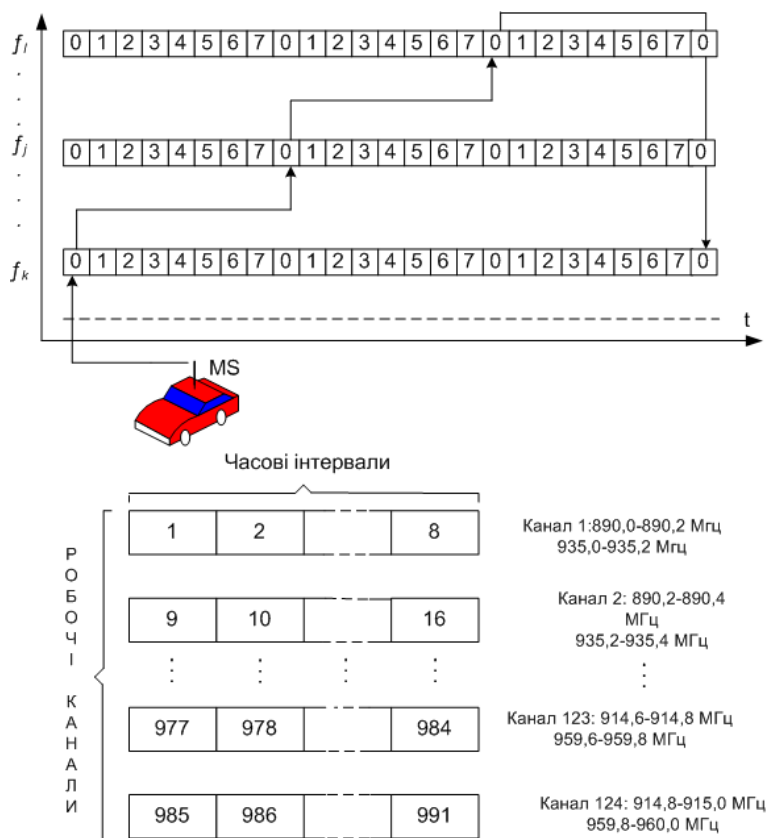


Рисунок 4.8 – Комбінована TDMA/FDMA система організації каналів зв'язку та принцип формування повільних стрибків за частотою

У процесі стрибків за частотою постійно зберігається рознесення 45 МГц між каналами прийому і передачі. Всім активним абонентам, що знаходяться в одному стільнику, ставляться у відповідність непересічні послідовності переключення частот, що виключає взаємні перешкоди при прийомі/передачі повідомлень абонентами. Параметри послідовності переключень частот (частотно-часова матриця і початкова частота) призначаються для кожної рухомої станції в процесі встановлення каналу зв'язку.

Канали зв'язку в стандарті GSM можна підрозділити на фізичні і логічні. Фізичний канал утворюється шляхом комбінування часового і частотного розділення сигналів і визначається як послідовність радіочастотних каналів (з можливістю стрибків по частоті) і часових інтервалів TDMA-кадру.

Кожна несуча містить 8 фізичних каналів, розміщених у 8 часових інтервалах у межах TDMA-кадру. Кожен фізичний канал використовує той самий часовий інтервал у кожному TDMA-кадрі.

До формування фізичного каналу як повідомлення, так і дані, подані в цифровому вигляді, групуються і поєднуються в логічні канали двох типів:

1. Канал зв'язку – для передачі кодової мови і даних;
2. Канал керування - для передачі сигналів керування і синхронізації.

При відповідній комбінації логічних каналів на одному і тому ж фізичному каналі може бути розміщений більш ніж один тип логічного каналу, логічні канали зв'язку також можуть бути двох типів:

1. Канал передачі повідомлень з повною швидкістю (22,8 Кбіт/с) – TCH/F (Full rate traffic channel);
2. Канал передачі повідомлень з половинною швидкістю (11,4 Кбіт/с) – TCH/H (Half rate traffic channel).

У логічних каналах використовується 26-кадровий мультикадр. *Швидкий об'єднаний логічний канал керування* FACH (Fast Associated Control Channel) використовується для передачі команд при переході рухомої станції зі стільника до стільника, тобто при естафетній передачі. *Повільний об'єднаний логічний канал керування* SACH (Slow Associated Control Channel) використовується в прямому каналі для передачі команди на установлення вихідного рівня потужності передавача рухомої станції, а в зворотному – для передачі даних про рівень встановленої потужності.

У повношвидкісному каналі зв'язку в кожному 13-му TDMA-кадрі мультикадра передається пакет інформації каналу SACH, при цьому кожен 26-й TDMA-кадр вільний. У напівшвидкісному каналі зв'язку той же пакет інформації передається в кожному 13-му і 26-му TDMA-кадрах мультикадра (рис. 4.9).

Оскільки у мультикадрі повношвидкісного каналу для передачі мови і даних використовуються 24 TDMA-кадри з 26-ти і тривалість одного мультикадра дорівнює 120 мс, то швидкість передачі інформаційних повідомлень по цьому каналі складає 22,8 Кбіт/с.



Рисунок 4.9 – Схема об'єднання каналів зв'язку

4.1.4 Захист і безпека інформації

У розглянутому стандарті під безпекою розуміється виключення несанкціонованого використання системи і забезпечення таємності переговорів абонентів. Для виконання цих вимог у стандарті GSM передбачені:

1. Аутентифікація;
2. Таємність передачі даних;
3. Таємність абонента;
4. Таємність напрямку виклику.

Захист сигналів керування і даних користувача здійснюється тільки при передачі по радіоканалі. У стандарті використовується алгоритм шифрування з відкритим ключем RSA, що забезпечує високий ступінь безпеки передачі мовних повідомлень.

Для виключення несанкціонованого використання ресурсів системи зв'язку в стандарт введені і визначені механізми аутентифікації – посвідчення особи абонента. Як уже відзначалося, кожен абонент на час користування системою одержує стандартний модуль дійсності абонента – SIM-карту, що містить:

1. Міжнародний ідентифікаційний номер рухомого абонента IMSI;
2. Свій індивідуальний ключ аутентифікації K_i ;
3. Алгоритм аутентифікації А3.

Для забезпечення таємності переданої по радіоканалі інформації її зашифровують. Алгоритм формування ключів шифрування А8 зберігається в SIM-карті. Одночасно з обчисленням відгуку SRES апаратура рухомої станції визначає і ключ шифрування K_c . Цей ключ не передається по радіоканалу, а обчислюється мережею і абонентським терміналом одночасно (рис. 4.10).

Разом з випадковим числом, рухомій станції пересилається числова послідовність, що містить ключ шифрування. Це число пов'язане з дійсним значенням K_c і дозволяє уникнути формування неправильного ключа. Число зберігається в рухомій станції і утримується в кожному першому повідомленні, переданому в мережу.

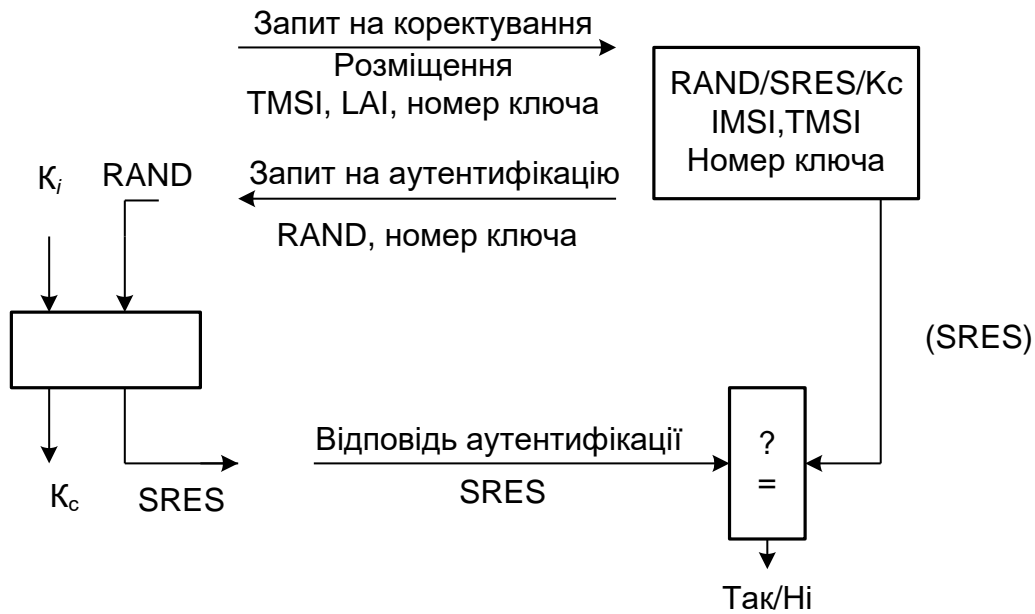


Рисунок 4.10 – Принцип аутентифікації

Для встановлення режиму шифрування мережа передає рухомій станції команду СМС (Ciphering Mode Command), після прийняття якої станція, використовуючи наявний у неї ключ, приступає до шифрування і дешифрування повідомлень. Потік переданих даних шифрують біт за бітом поточним шифром, використовуючи алгоритм шифрування А5 і ключ K_c . Процедура встановлення режиму шифрування подана на рис. 4.11.

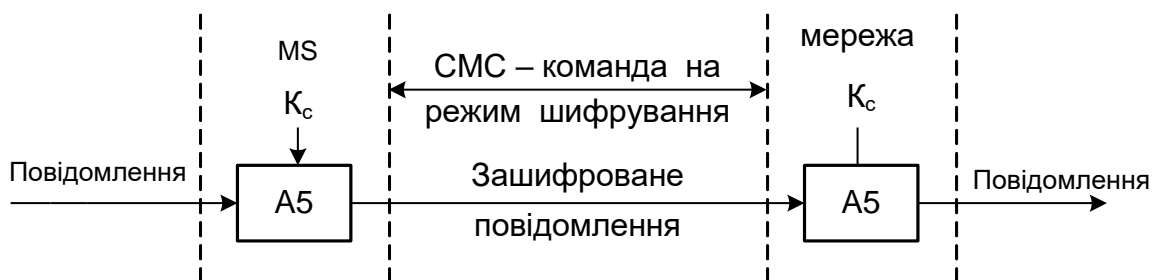


Рисунок 4.11 – Процедура встановлення режиму шифрування

Для виключення виявлення абонента шляхом перехоплення повідомлень, переданих по радіоканалу, кожному абонентові системи стільникового зв'язку присвоюється *тимчасовий міжнародний ідентифікаційний номер користувача* – TMSI (Time Mobile Subscriber Identity), що дійсний тільки в межах зони обслуговування з ідентифікаційним номером LAI (Location Area Identification). В іншій зоні обслуговування абонентові присвоюється новий TMSI. Якщо рухома станція переходить у нову зону обслуговування, то її TMSI повинен передаватися разом з LAI тієї зони, у

якій TMSI був присвоєний абонентові. При виконанні процедури коректування місця розташування по каналах керування здійснюється двосторонній обмін між рухомою станцією MS і базовою станцією BTS службовими повідомленнями, що містять тимчасові номери користувачів TMSI. У цьому випадку в радіоканалі необхідно забезпечити таємність зміни TMSI і їх належності конкретному абонентові. Процедура коректування місця розташування подана на рис. 4.12.

Розглянемо випадок коректування місця розташування в момент естафетної передачі. У цьому випадку рухома станція вже зареєстрована в реєстрі переміщення VLR з тимчасовим номером TMSI, що відповідає TMSI колишньої зони обслуговування. При вході абонента в нову зону здійснюється процедура впізнання, що проводиться за старим, зашифрованим в радіоканалі TMSI, переданим одночасно з номером LAI зони обслуговування. Останній подає інформацію центрові комутації і центрові керування про напрямок переміщення рухомої станції і дозволяє запросити попередню зону розташування про статус абонента і його дані, виключивши обмін цими службовими повідомленнями по радіоканалах керування. При цьому по каналі зв'язку повідомлення передається як зашифрований інформаційний текст із перериванням повідомлення в процесі естафетної передачі на 100 – 150 мс.

4.2 Система стільникового зв'язку CDMA

4.2.1 Загальна характеристика і принципи функціонування

Основні напрямки впровадження і використання CDMA (Code Division Multiple Access) - це наземні фіксовані безпроводні телефонні мережі (стандарт cdmaOne WLL), стільникові мобільні системи зв'язку і супутникові системи зв'язку.

На відміну від інших цифрових систем, що ділять відведений діапазон на вузькі канали за частотним (FDMA) або часовим (TDMA) признаком, у стандарті CDMA передану інформацію кодують і код перетворюють у шумоподібний широкопasmовий сигнал так, що його можна виділити знову, тільки маючи код на стороні прийому. При цьому одночасно в широкій смузі частот можна передавати і приймати безліч сигналів, що не заважають один одному. У широкополосній системі вихідний сигнал модулювання, наприклад, сигнал телефонного каналу зі смугою усього декілька кілогерц розподіляють у смузі частот, ширина якої може складати декільки мегагерц. Останнє здійснюється шляхом подвійної модуляції несучими переданим інформаційним сигналом і широкопasmовим сигналом кодування.

Основною характеристикою широкопasmового сигналу є його база B , що визначається як добуток ширини F спектра сигналу на його період T .

У результаті перемножування сигналу джерела псевдовипадкового шуму з інформаційним сигналом енергія останнього розподіляється в широкій смузі частот, тобто його спектр розширюється.

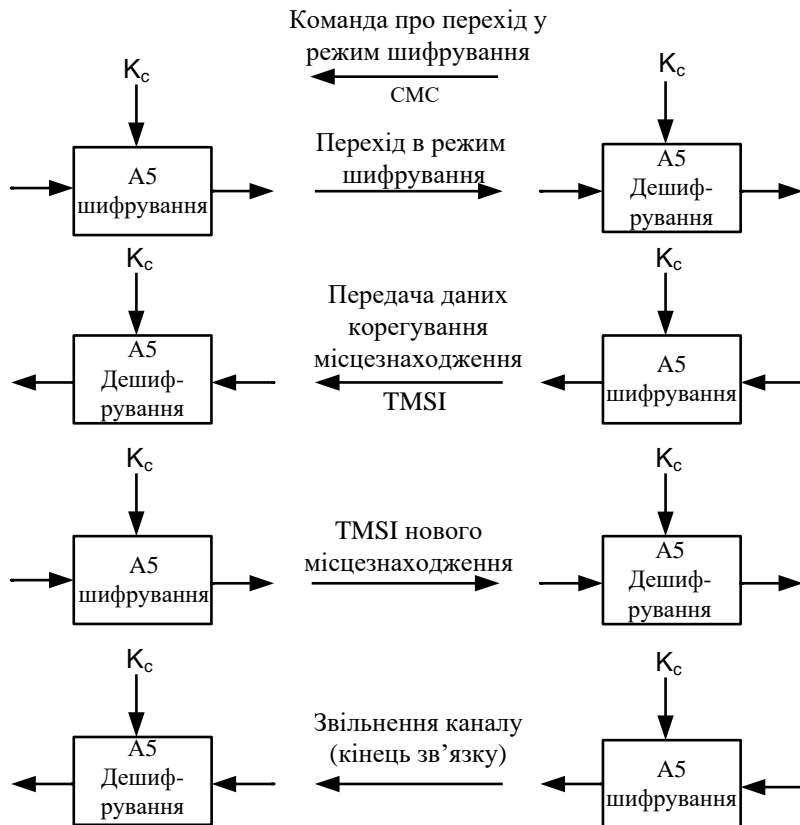


Рисунок 4.12 – Процедура коректування місцеположення

Інформація може бути введена в широкопугвий сигнал декількома способами. Найбільш відомий спосіб полягає у накладенні інформації на широкопугвову кодову модулюючу послідовність перед модуляцією несучої частоти F_0 для одержання широкопугввого шумоподібного сигналу ШПС (рис. 4.13). Вузкопугвовий сигнал множиться на псевдовипадкову послідовність (ПВП) з періодом T , що складається з N бітів тривалістю τ_0 кожний. У цьому випадку база ШПС чисельно дорівнює кількості елементів ПВП.

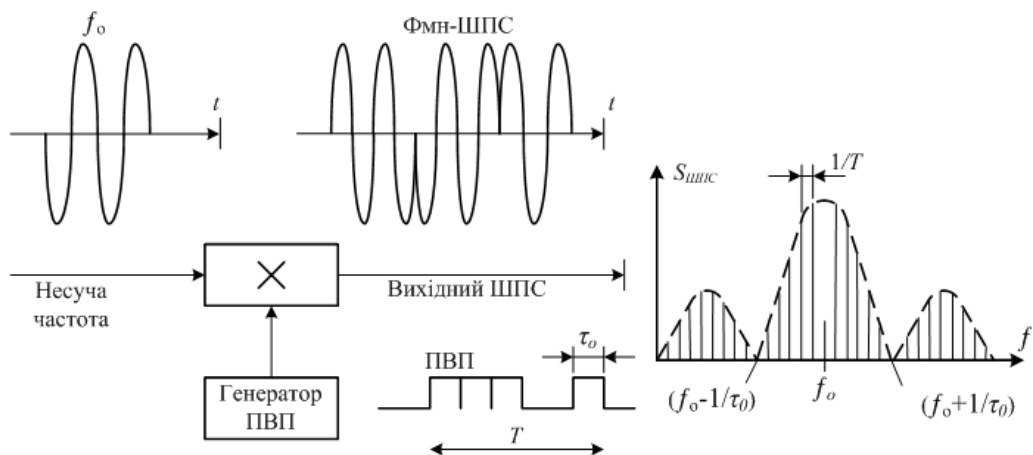


Рисунок 4.13 – Схема розширення спектра частот

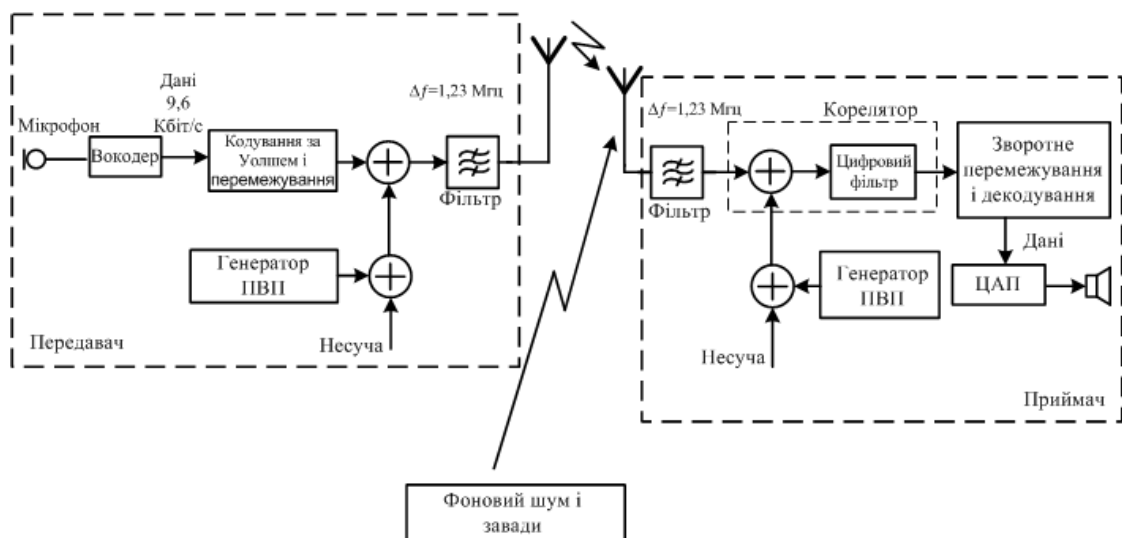
Таким чином, суть широкосмугового зв'язку полягає у розширенні смуги частот сигналу, передачі широкосмугового сигналу і виділенні з нього корисного сигналу шляхом перетворення спектра прийнятого широкосмугового сигналу в первісний спектр інформаційного сигналу.

У стандарті CDMA для кодового розділення каналів використовуються ортогональні коди Уолша, які можна використовувати для кодування і подальшого об'єднання ряду інформаційних сигналів. Коди Уолша формуються з рядків матриці Уолша:

$$W_L = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Кодування за Уолшем застосовується в прямому каналі (від базової станції до абонентського терміналу) для розділення користувачів.

На рис. 4.14 наведена спрощена структурна схема, що пояснює принцип роботи системи стандарту CDMA. Інформаційний сигнал кодується за Уолшем, потім змішується з несучою, спектр якої попередньо розширюється перемноженням із сигналом джерела псевдовипадкового шуму (ПСП). Кожному інформаційному сигналові призначається свій код Уолша, потім вони об'єднуються в передавачі, пропускаються через фільтр, і загальний шумоподібний сигнал випромінюється антеною пере-



давача.

Рисунок 4.14 – Принцип роботи системи стільникового зв'язку стандарту CDMA

На вхід приймача надходять: корисний сигнал, фоновий шум і завади

(від сусідніх базових станцій і від рухомих станцій інших абонентів). Після ВЧ-фільтрації сигнал надходить на корелятор, де відбувається стиснення спектра і виділення корисного сигналу в цифровому фільтрі за допомогою заданого коду Уолша. Спектр завад розширюється, і вони з'являються на виході корелятора у вигляді шуму. На практиці в рухомій станції використовуються декілька кореляторів для прийому сигналів з різним часом поширення в радіоканалі або сигналів, переданих різними базовими станціями.

У системах, оснований на інших методах доступу, необхідно планувати розподіл частотного ресурсу між сусідніми стільниками, для того щоб виключити взаємний вплив сигналів сусідніх комірок. У системах, що використовують стандарт CDMA, змінюючи синхронізацію джерела псевдовипадкового шуму, можна використовувати ту саму ділянку смуги частот для роботи у всіх стільниках мережі. Таке 100%-ве використання доступного частотного ресурсу є одним з основних факторів, що визначають високу абонентську ємність мережі стандарту CDMA і спрощують її організацію. У системах, що використовує методи доступу з часовим або частотним розділенням каналів, абонентська ємність стільника жорстко обмежена і визначається кількістю доступних каналів зв'язку або часових інтервалів. На противагу цьому системи стандарту CDMA мають динамічну абонентську ємність. І хоча є 64 коди Уолша, ця теоретична межа не досягається в реальних умовах і абонентська ємність системи обмежується внутрішньосистемною інтерференцією, викликаною одночасною роботою рухомих і базових станцій сусідніх стільників. На рис. 4.15 показано вплив один на одного основних показників системи: кількості абонентів, площі радіопокриття базової станції і якості мови в каналі.

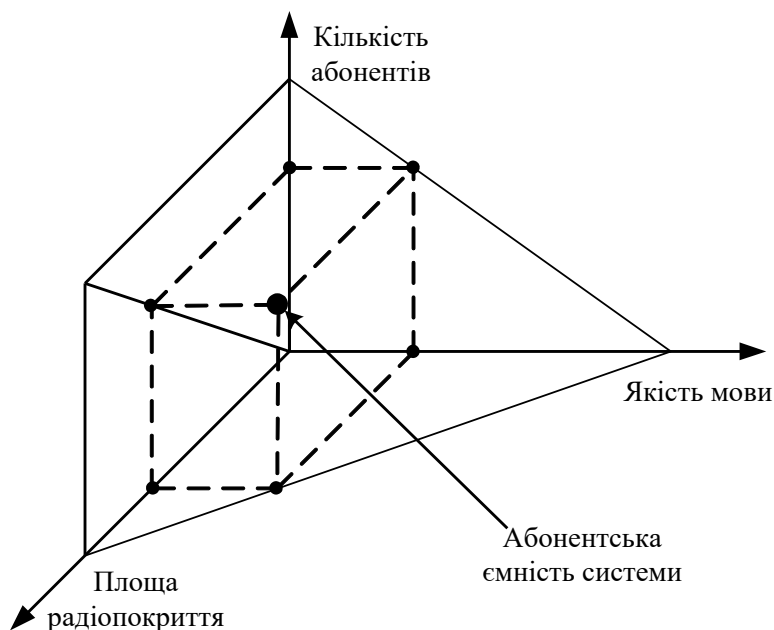


Рисунок 4.15 – Динамічна ємність системи стандарту CDMA

Ці показники взаємопов'язані, і не можна одночасно досягти максимальних значень кожного з них. Такий взаємозв'язок є перевагою системи, оскільки дає можливість гнучкого проектування мережі. Наприклад, у густонаселених районах можна зменшити площу радіопокриття, збільшивши кількість абонентів, а на окраїнах, за рахунок зниження цієї кількості, збільшити площу зони обслуговування (якість мови в обох випадках можна зберегти однаковою). У реальних системах стільникового рухомого зв'язку мова йде про 25-35 абонентів на одну базову станцію. У системах фіксованого абонентського радіодоступу їх більше (близько 45 абонентів). Розподілення навантаження на базову станцію в залежності від кількості викликів і місця розташування станції поданий на рис. 4.16.

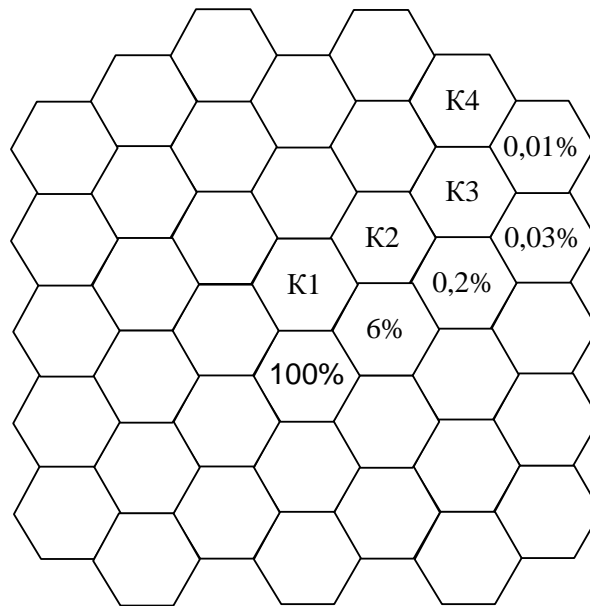


Рисунок 4.16 – Розподілення навантаження у мережі стандарту CDMA

4.2.2 Керування потужністю передавачів

Абонентська ємність стільника системи стандарту CDMA оптимізується завдяки використанню складного алгоритму регулювання, що встановлює потужність, випромінювану кожним абонентським терміналом, яка необхідна для одержання хорошої якості мови. У системі передбачені три механізми регулювання потужності:

1. У прямому каналі – розімкнута петля;
2. У прямому каналі – замкнута петля;
3. У зворотному каналі.

При передачі інформації базовою станцією і прийомі її рухомою станцією йде мова про прямий канал. Під зворотним каналом маємо на увазі канал, у якому рухома станція передає, а базова приймає повідомлення. Розглянемо процес регулювання потужності передавачів у зворотному ка-

налі. Кожна рухома станція безупинно передає інформацію про рівень помилок у прийнятому сигналі. На підставі цієї інформації базова станція розподіляє випромінювану потужність між абонентами таким чином, щоб у кожному випадку забезпечити прийнятну якість мови. Абоненти, на шляху до яких радіосигнал зазнає більше згасання, одержують можливість випромінювати сигнал більшої потужності. Основна мета регулювання потужності в зворотному каналі – оптимізація площі стільника. Регулювання потужності як в прямому, так і в зворотному каналі впливає і на термін служби акумуляторних батарей рухомих станцій. Середня випромінювана потужність рухомої станції в CDMA менша, ніж у системі AMPS, яка використовує інші методи доступу. Це безпосередньо пов'язано з такими параметрами радіотелефону, як тривалість безперервного заняття каналу і час перебування в режимі очікування. Процес регулювання потужності в прямому каналі відбувається трохи інакше. У ньому можливі два варіанти регулювання: за відкритим циклом (розімкнута петля) і за замкнутим циклом (замкнута петля), як це показано на рис. 4.17.

Розглянемо відкритий (розімкнутий) цикл регулювання потужності (менш точний). Рухома станція MS після включення шукає сигнал базової станції. Після синхронізації рухомої станції у цьому сигналі виконується вимірювання його потужності і обчислюється потужність переданого сигналу, необхідна для забезпечення з'єднання з базовою станцією. Обчислення ґрунтуються на тому, що сума рівнів передбачуваної потужності випромінюваного сигналу і потужності прийнятого сигналу повинна бути постійною і рівною -73дБ. Цей процес повторюється кожні 20 мс, але він все-таки не забезпечує бажаної точності регулювання потужності, тому що прямий і зворотний канали працюють у різних частотних діапазонах (рознесення частот 45 МГц), отже, вони мають різні рівні згасання при поширенні і по-різному піддаються впливу завад.

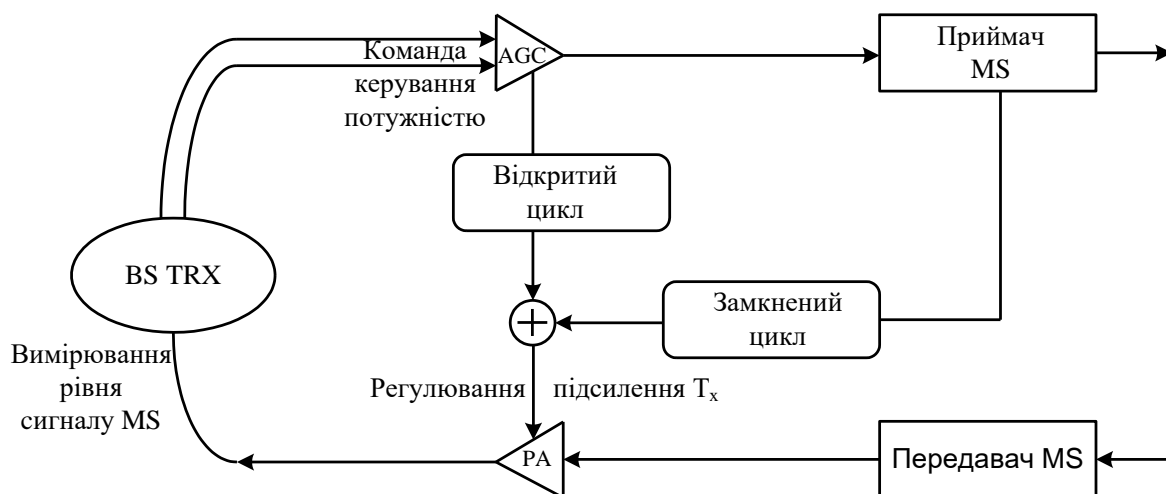


Рисунок 4.17 – Схема регулювання потужності передавачів у прямому каналі

Розглянемо тепер замкнутий цикл регулювання потужності як більш точний. Базова станція постійно оцінює імовірність помилки в кожному прийнятому сигналі. Якщо вона перевищує програмно заданий поріг, то базова станція дає відповідній рухомій станції команду збільшити потужність випромінювання. Регулювання здійснюється з кроком 1дБ. Цей процес повторюється кожні 1,25 мс. Мета такого процесу регулювання полягає в тому, щоб кожна рухома станція випромінювала сигнал мінімальної потужності, достатньої для забезпечення прийнятної якості мови. За рахунок того, що всі рухомі станції випромінюють сигнали необхідної для нормальної роботи потужності, і не більше, їхній взаємний вплив мінімізується і абонентська ємність системи зростає. Рухомі станції повинні забезпечувати регулювання вихідної потужності в широкому динамічному діапазоні – до 85 дБ.

Такі фактори, як кількість абонентів і відстань до них від базової станції, впливають на значення максимальної випромінюваної потужності. Вимоги до лінійності передатної функції підсилювача потужності, що працює при зміні рівня вхідного сигналу в межах 20дБ, надзвичайно високі. Лінійність передатної функції підсилювача – це фактор, критичний при забезпеченні бажаних характеристик системи. Необхідну лінійність забезпечують складні і дорогі методи лінеаризації (підсилювачі з попередніми перекручуваннями або підсилювачі зі зв'язком вперед). Спектр випромінюваного CDMA-сигналу, що отримується у результаті об'єднання безлічі кодованих за Уолшем базових сигналів, близький до спектра шумового сигналу з відношенням пікового значення до середнього, рівного приблизно 11 дБ.

У системі стандарту CDMA застосовуються квадратурна фазова маніпуляція (QPSK) у базових станціях і зміщена QPSK – у рухомих. При цьому інформація отримується шляхом аналізу зміни фази сигналу, тому фазова стабільність системи – це критичний фактор при забезпеченні мінімальної імовірності появи помилки в повідомленнях. Застосування зміщеної QPSK дозволяє знизити вимоги до лінійності підсилювача потужності рухомої станції, тому що амплітуда вихідного сигналу при цьому виді модуляції змінюється значно менше. До того як інтерференційні завади будуть подавлені методами цифрової обробки сигналів, вони повинні пройти через високочастотний тракт приймача і не викликати насичення ширококутового підсилювача і змішувача. Це змушує розроблювачів системи шукати баланс між динамічними і шумовими характеристиками приймача.

4.2.3 Схема побудови і склад устаткування

Після включення живлення рухома станція налаштовується на робочу частоту мережі і шукає сигнал базової станції (у мережі використовується загальний для всіх базових і рухомих станцій короткий код). Імовірно, що вона знайде декілька сигналів різних базових станцій, які можна розрізни-

ти за часовим зсувом в короткому коді. Рухома станція обирає сигнал з найбільшим рівнем і в такий спосіб одержує когерентну опору для здійснення подальшої демодуляції сигналу синхронізації. Цьому сигналові поставлений у відповідність 32-й код Уолта. У ньому передається інформація про майбутній зміст 42-розрядного регістра зсуву, використовуваного для формування довгого коду. Ця інформація посилається з випередженням щодо інформаційного каналу на 320 мс. Тому рухома станція має досить часу для декодування повідомлення і завантаження інформації в регістр. У такий спосіб досягається її синхронізація з мережним часом. Після цього рухома станція починає моніторинг одного з каналів виклику.

Склад устаткування мереж стандарту CDMA багато в чому подібний до складу устаткування мереж стандарту GSM і містить у собі рухомі і базові станції, цифрові комутатори, центр керування і обслуговування, різні додаткові системи і пристрої. Функціональне спряження елементів системи здійснюється за допомогою ряду інтерфейсів.

Структурна схема стільникової мережі стандарту CDMA подана на рис. 4.18.

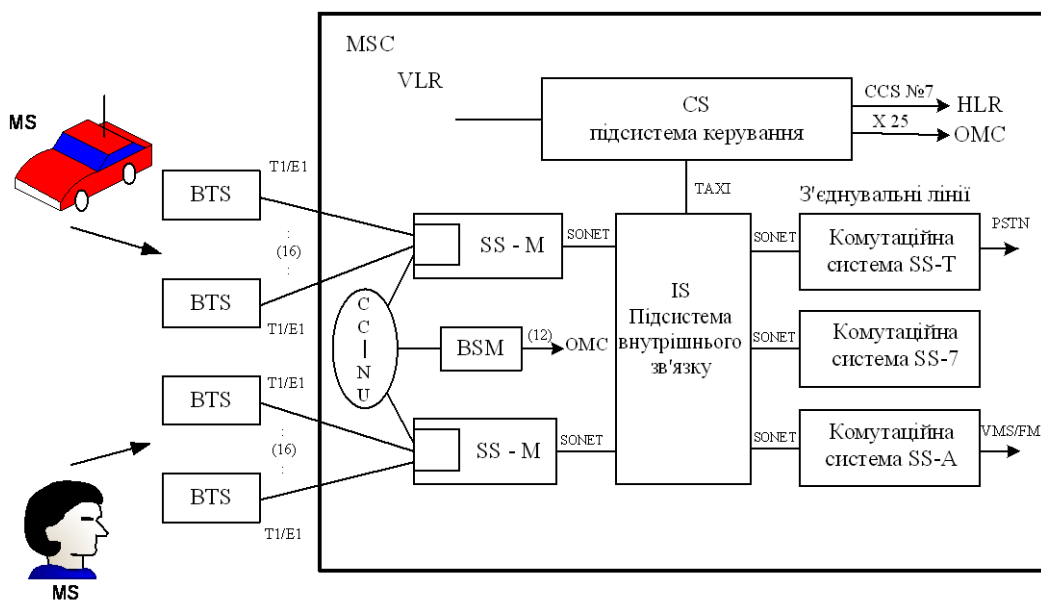


Рисунок 4.18 – Структурна схема мережі стандарту CDMA

4.2.4 Структура і формування сигналів

У стандарті CDMA застосовується метод багатостанційного доступу з кодовим розділенням каналів, оснований на використанні широкосмугових сигналів. Кожному викликові присвоюється унікальний код, що дозволяє відрізнити цей виклик від інших, переданих у тому ж частотному діапазоні. У цьому стандарті забезпечується більш висока якість мови, ніж у стандарті GSM, не говорячи вже про аналогові стандарти. Це багато в чому визначається застосуванням кодування мови. Розглянемо процес кодування

мови більш докладно.

У системі CDMA для перетворення аналогового мовного сигналу в цифровий використовується вокодер зі змінною швидкістю кодування, в основу роботи якого покладений алгоритм з лінійним передбаченням коду – CELP (Code Excited Linear Predictive). Цей алгоритм враховує особливості людської мови. Вокодер перекодує цифровий потік, що має швидкість 64 Кбіт/с, у потік зі швидкістю 8 або 13 Кбіт/с. У ході цього перетворення інформаційний потік ділиться на кадри, а інтервали, що містять паузи, видаляються. Результуючий потік має швидкість від 1 до 8 Кбіт/с. вокодер приймальної станції об'єднує кадри у єдиний потік і виконує зворотне перетворення.

Іншою важливою особливістю вокодера зі змінною швидкістю кодування є використання адаптивного порога для визначення потрібної швидкості кодування даних. Рівень порога змінюється відповідно до фонового шуму. Результатом є придушення фону і поліпшення якості мови навіть у гучному середовищі. Вокодер дозволяє підмішувати в мовний канал службову інформацію.

4.2.5 Організація естафетної передачі

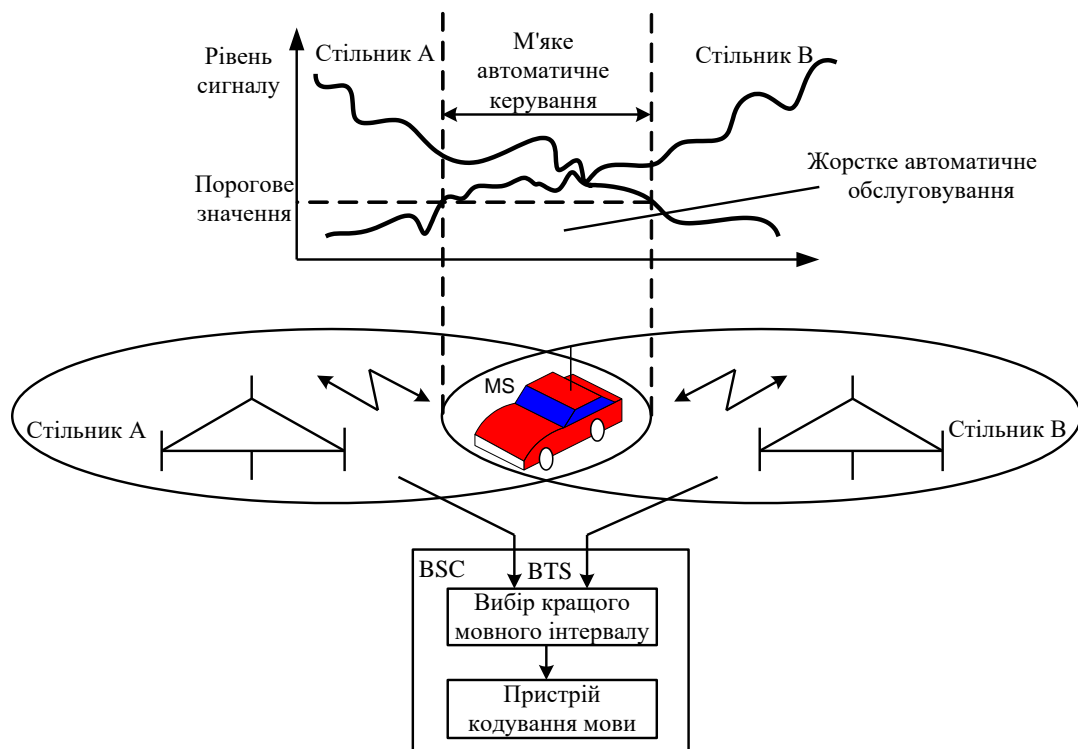
Приймачі стандарту CDMA використовують декількох корреляторів одночасно. Приймач з чотирма каналами прийому і обробки сигналу одержав назву Rake-приймача. У трьох каналах одночасно обробляються три найбільш сильні сигнали (у четвертому каналі постійно здійснюється пошук сигналу з більш високим рівнем). Ці сигнали складаються, і таким чином у системі з кодовим розділенням каналів реалізується метод часового рознесення прийому.

Рухома абонентська станція може одночасно приймати і обробляти сигнали декількох базових станцій. Це дозволяє здійснювати м'яку естафетну передачу абонента між базовими станціями. Перевага м'якої передачі полягає в тому, що виключається можливість втрати зв'язку при русі абонента уздовж границі стільника, коли має місце ефект "пінг-понгу". Цей процес наочно поданий на рис. 4.19. Недоліком такого процесу керування є одночасне використання двох базових станцій.

4.2.6 Кодування в прямому каналі

У системах стандарту CDMA використовуються різні види кодування. На рис. 4.20 подана схема кодування в прямому каналі (від базової станції до абонента). Базова швидкість передачі даних у каналі складає 9,6 Кбіт/с, що досягається доданням додаткових коригувальних двійкових символів до цифрового потоку вокодера (8,55 Кбіт/с). Для реалізації на приймальній стороні прямої корекції помилок (без повторної передачі повідомлення) у каналі використовується надлишкове кодування. Для цього базовий цифровий потік розбивається на пакети тривалістю по 20 мс і подається на згортковий кодер зі швидкістю 1/2. На його виході число бітів

подвоюється. Потім дані перемежуюються, тобто перемішуються в часовому інтервалі 20 мс. Це виконується для того, щоб рівномірно розподілити в потоці даних загублені під час передачі біти. Відомо, що помилково прийняті символи звичайно формуються в групи. У той же час, схема прямої корекції помилок працює найкраще, коли помилки розподілені рівномірно в часі. Це відбувається після здійснення на приймальній стороні процедури, зворотної перемежуванню при передачі. Після перемежування цифровий потік перетворюється за допомогою довгого коду і логічної



операції "виключне АБО" (додавання за модулем два).

Рисунок 4.19 – Принцип м'якої естафетної передачі

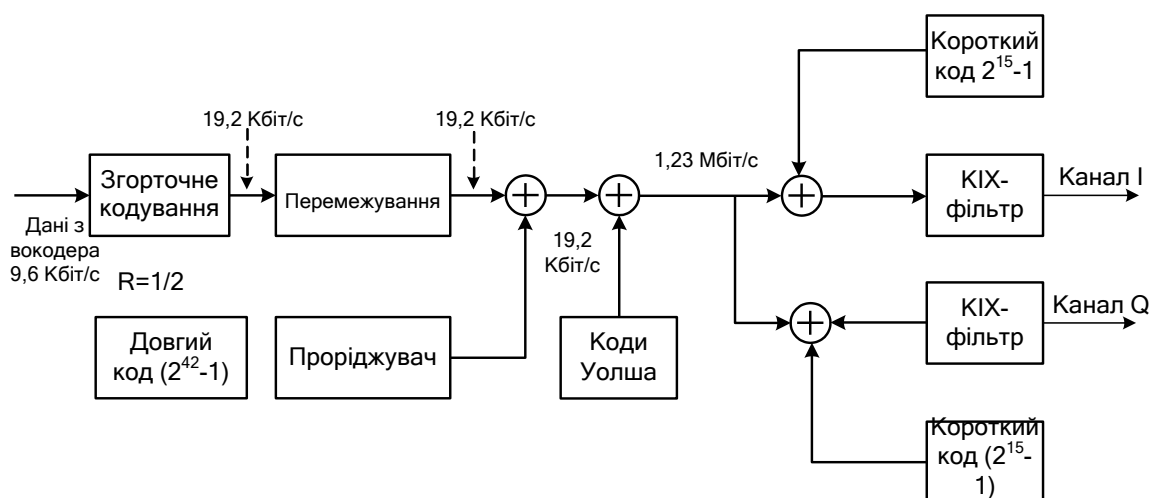


Рисунок 4.20 – Кодування у прямому каналі

Довгими кодами (кодами максимальної довжини) є коди, що можуть бути отримані за допомогою регістра зсуву або елемента затримки заданої довжини. В апаратурі стандарту CDMA довгий код формується в результаті декількох послідовних логічних операцій із псевдовипадковою двійковою послідовністю, яка генерується у 42-розрядному регістрі зсуву, і двійковою 32-бітовою маскою, що визначається індивідуально для кожного абонента. Такий регістр зсуву застосовується у всіх базових станціях цього стандарту для забезпечення режиму синхронізації всієї мережі. Оскільки інформаційний потік має швидкість 19,2 Кбіт/с, то в прямому каналі використовується тільки кожен 64-й символ довгого коду.

Наступний етап перетворення повідомлення – кодування за допомогою кодів Уолша. Один ряд матриці Уолша ставиться у відповідність каналові зв'язку між абонентом і базовою станцією. Якщо на вході кодера "0", то посиляється відповідний ряд матриці (код Уолша), якщо "1" – посиляється послідовність, сформована шляхом логічного заперечення відповідного ряду матриці (коду Уолша). Це підвищує швидкість інформаційного потоку з 19,2 Кбіт/с до 1,23 Мбіт/с. Відповідно розширюється і спектр сигналу.

На заключному етапі двійковий потік розділяється між синфазним і квадратурним каналом між (1-м і Q-каналом) для наступної передачі з використанням квадратурної фазової маніпуляції (QPSK). До подачі на змішувачі цифровий потік у кожному з каналів перетворюється за допомогою короткого коду і логічної операції "виключне АБО".

Короткий код являє собою псевдовипадкову двійкову послідовність довжиною 32768 двійкових символів, яка генерується зі швидкістю 1,3288 Мбіт/с. Ця послідовність є загальною для всіх базових і рухомих станцій у мережі. Короткий код формується в 15-розрядному регістрі зсуву з лінійним зворотним зв'язком.

Результуючий двійковий потік у кожному каналі проходить через цифровий фільтр з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ-фільтр), що дозволяє обмежити смугу випромінюваного сигналу. Частота зрізу фільтра складає приблизно 615 кГц. Отримані аналогові сигнали надходять на відповідні входи I/Q-модулятора. Ряд інформаційних сигналів утворюється шляхом злиття I- і Q-каналів.

Оскільки всі користувачі одержують об'єднаний сигнал, то для виділення інформації необхідно передавати опорний сигнал по каналі, що одержав назву пілотного. У пілотному каналі передається нульовий інформаційний сигнал, код Уолша для цього каналу формується з нульового ряду матриці Уолша. Іншими словами, у пілотному каналі передається тільки короткий код. Звичайно на ньому випромінюється близько 20% загальної потужності. Опорний сигнал необхідний для наступної фазової демодуляції.

Короткий код дозволяє багаторазово використовувати в кожній комі-

рці той самий набір кодів Уолша. Кожна базова станція має свій часовий зсув при формуванні коду і тому може бути однозначно визначена в мережі. Засновано це на властивості псевдовипадкових двійкових кодів: значення автокореляційного моменту наближається до нуля для всіх часових зсувів, що перевищують довжину біта.

4.2.7 Кодування в зворотному каналі

У зворотному каналі (від абонента до базової станції) застосовується інша схема кодування (рис. 4.21). Рухома станція не може використовувати переваги трансляції опорного сигналу. У цьому випадку необхідно було б передавати два сигнали, що значно ускладнило б демодуляцію в приймачі базової станції. У зворотному каналі застосовується такий же вокодер, як і в прямому, але зі швидкістю згорткового кодування $1/3$, що підвищує швидкість передачі даних з 9,6 до 28,8 Кбіт/с, і перемежування в пакеті тривалістю 20 мс. Після перемежування вихідний потік розбивається на слова по шість бітів у кожному. Шестибітовому слову можна поставити у відповідність один з 64 кодів Уолша. Таким чином, кожен абонентський термінал використовує весь їх набір. Після цієї операції швидкість потоку даних підвищується до 307,2 Кбіт/с. Далі потік перетворюється за допомогою довгого коду, аналогічного використовуваному базовою станцією. На цьому етапі відбувається поділ користувачів. Абонентська ємність системи визначається зворотним каналом. Для її збільшення застосовується регулювання потужності в зворотному каналі, методи просторового рознесення прийому на базовій станції. Остаточне формування потоків даних відбувається в такий же спосіб, як і в базовій станції, за винятком додаткового елемента затримки на $1/2$ тривалості символу в Q-каналі для реалізації зміщеної QPSK.

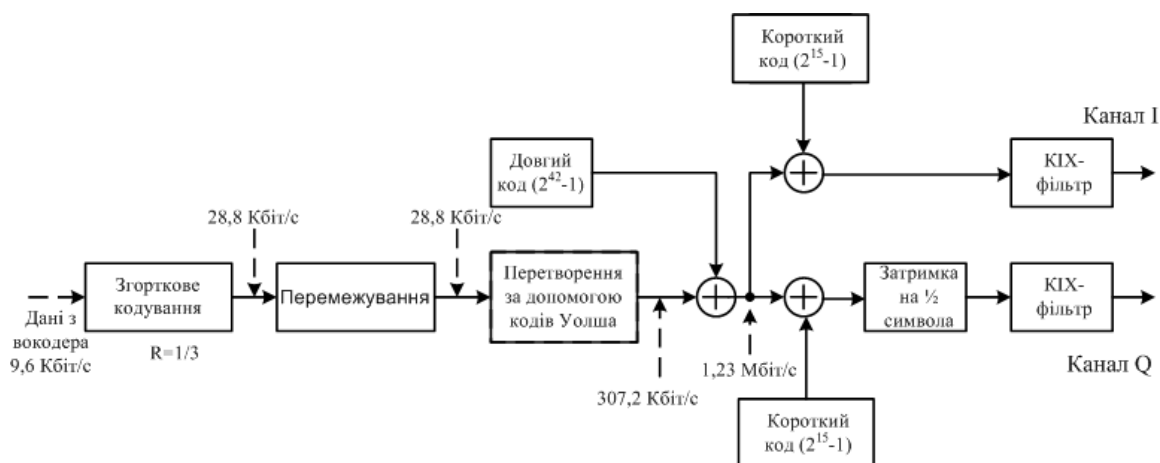


Рисунок 4.21 – Кодування у зворотному каналі

Таким чином на розділення абонентів у системі впливають багато параметрів, деякі з них подані в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Параметри, що впливають на розділення абонентів

Параметр	Призначення	Примітка
Частота	Розділення частотного спектра на кілька частотних каналів по 1,23 МГц	Прямий і зворотний канали рознесені на 45 МГц
Коди Уолша	Розділення абонентів одного стільника в прямому каналі	Призначається базовою станцією; нульовий код Уолша визначений для пілотного каналу, 32-й - для каналу синхронізації
Довгі коди	Розділення абонентів одного стільника в зворотному каналі	Залежить від часу і від ідентифікаційного номера абонента
Короткий код	Розділення базових станцій або секторів	Базові станції розрізняються за рахунок зміни початку синхронізації при формуванні коду

4.2.8 Встановлення вхідного і вихідного викликів

Якщо абонент намагається ввійти в мережу, тобто виконує встановлення вихідного виклику, то його станція буде намагатися здійснити з'єднання з базовою по одному з каналів доступу (рис. 4.22). У цьому випадку для формування довгого коду використовується двійкова маска, параметри якої індивідуальні для кожної базової станції мережі. Якщо одночасно декілька абонентів намагаються здійснити з'єднання, то виникає конфлікт. Якщо базова станція не підтверджує спробу з'єднання по каналу виклику, рухома станція вичікує довільний час і робить наступну спробу.

Після прийняття виклику рухомої станції базова станція призначає канал для з'єднання, що має відповідний код Уолша. Після цього рухома станція змінює параметри двійкової маски відповідно до ідентифікаційного номера абонента і переходить у режим прийому/передачі мовної інформації. Встановлення вхідного виклику відбувається відповідно до схеми, поданої на рис. 4.23.

Таким чином, система CDMA потенційно має велику ємність. Крім того, вона дозволяє відмовитися від частотного планування мережі, хоча при цьому припускає проведення ретельного балансу потужностей випромінювань станцій. Об'єктивно порівняти абонентські ємності систем, що використовують різні методи доступу (CDMA, FDMA, TDMA), важко, оскільки для них майже неможливо зробити однакові припущення. Більшість порівнянь проводяться між системами на різних етапах реалізації, але не між системами з різними методами доступу. Незважаючи на потенційні можливості стандарту CDMA, при порівнянні двох оптимізованих

систем, що використовують різні методи доступу, їх абонентські ємності можуть виявитися приблизно однаковими.

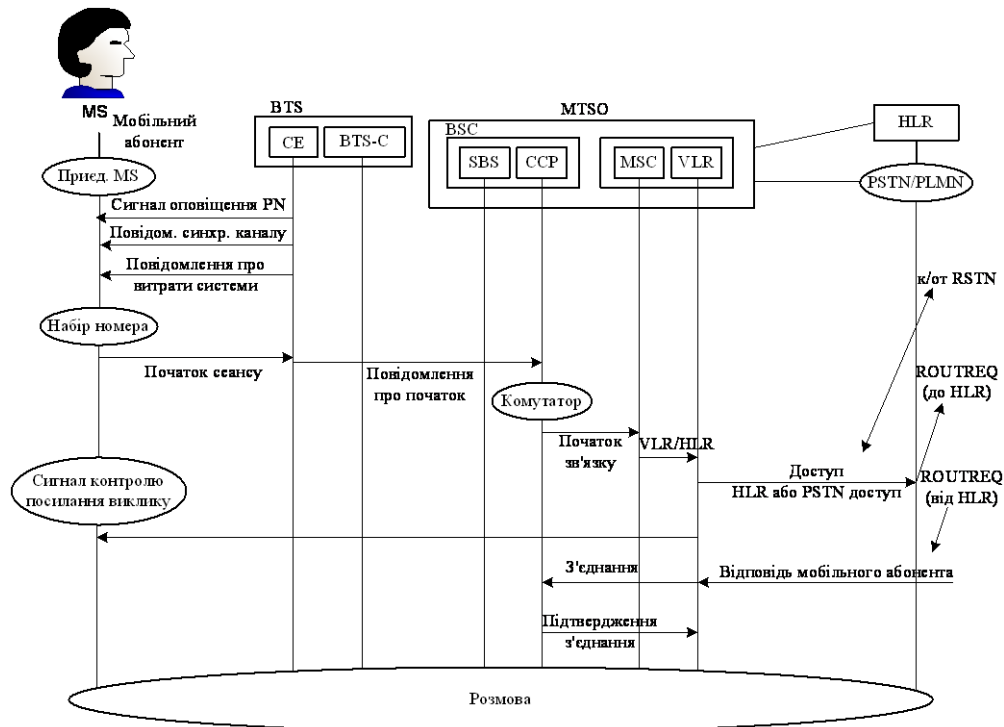


Рисунок 4.22 – Встановлення вихідного виклику

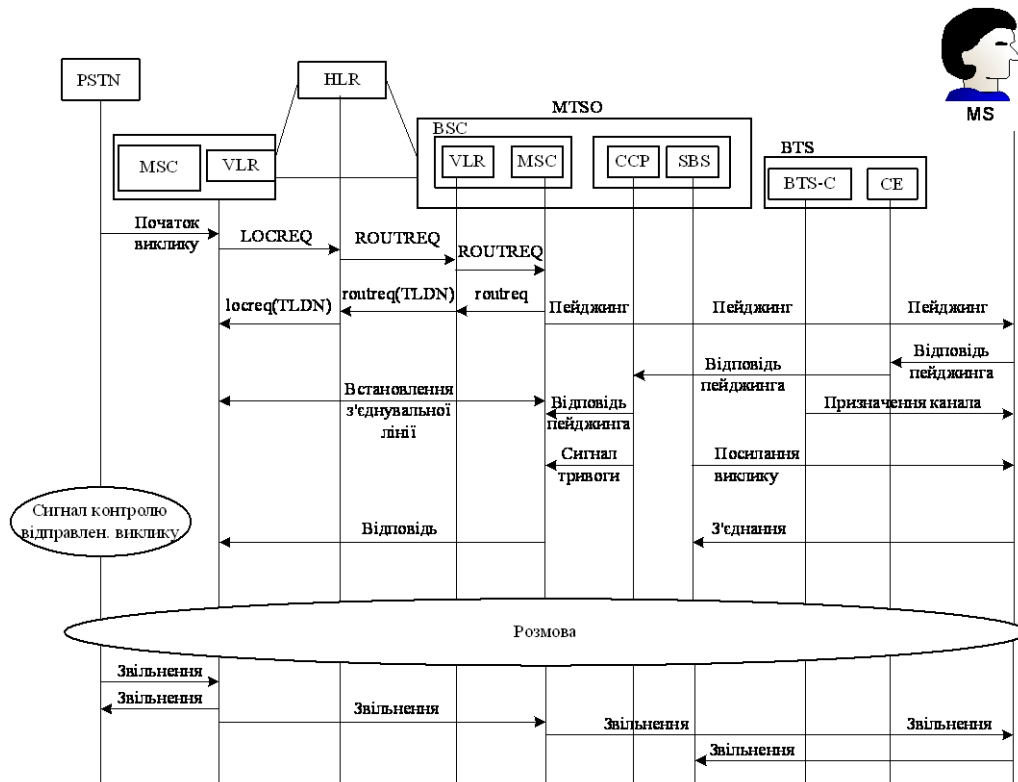


Рисунок 4.23 – Встановлення вхідного виклику
Запитання для самоперевірки

1. Загальні характеристики системи стандарту GSM.
2. Послуги системи стандарту GSM.
3. Особливості утворення мови у стандарті GSM.
4. Устаткування мереж стандарту GSM.
5. Функції реєстра положення.
6. Функції реєстра переміщення.
7. Аутентифікація абонента.
8. Встановлення режиму шифрування.
9. Формування широкосмугового сигналу у стандарті CDMA.
10. Керування потужністю передавачів у прямому каналі.
11. Керування потужністю передавачів у зворотному каналі.
12. Організація естафетної передачі у стандарті CDMA.

5 МОБІЛЬНІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ ТРЕТЬОГО ПОКОЛІННЯ

5.1 Загальна концепція мобільного зв'язку третього покоління

Лінія, що розділяє перші два покоління мобільного зв'язку, досить виразна: стандарти першого покоління (NMT-450, NMT-900, AMPS, TACS і ін.) були аналоговими, тоді як системи другого покоління (GSM, D-AMPS, PDC/JDC), що з'явилися в першій половині 1990-х рр., втілили багато потенційних переваг цифрової передачі повідомлень (ефективна компресія даних, завадостійке кодування, простота реконфігурування, технологічність і стабільність апаратних засобів і т. д.).

У ході стрімкої експансії комерційних мереж мобільних телекомунікацій досить швидко стало очевидним, що потенційний спектр надаваних ними послуг може простиратися далеко за рамки первісного призначення – бездротового телефонного сервісу. Серед експертів в області інформаційного маркетингу на певному етапі затвердилося переконання, що транснаціональні електронні гіганти можуть не вижити в телекомунікаційному секторі бізнесу, якщо не виступлять зі стратегічними ініціативами, що істотно розсовують границі мереж мобільного зв'язку. Величезним стимулюючим фактором при цьому став розвиток Internet і охоплення ним небаченої за своїми масштабами аудиторії. У підсумку мобільні системи зв'язку XXI століття стали розглядатися як універсальні мережі, що забезпечують високошвидкісний інформаційний обмін зі споживачем, не обмежуючи волі переміщення останнього і підтримуючи в будь-якій географічній точці Землі якість послуг на рівні тих, які могли б бути надані найкращою стаціонарною мережею транспортування інформації (ISDN, LAN та ін.). При цьому формат переданих даних може бути найрізноманітнішим: звичайна телефонна розмова, комп'ютерні файли, факсимільні й аудіовізуальні повідомлення, Internet-Пакети, електронна пошта та ін.

Ініціаторами й найбільш зацікавленими суб'єктами розробки стандартів третього покоління (3G) стали Міжнародний Телекомунікаційний Союз (ITU – International Telecommunication Union), Європейський інститут телекомунікаційних стандартів (ETSI – European Telecommunication Standards Institute), асоціація радіопромисловців США (TIA – Telecommunication Industry Association) і Японії (ARIB – Association of Radio Industries and Businesses), органи, що представляють інтереси телекомунікаційних співтовариств Китаю й Кореї, а також найбільші корпорації, що визначають кон'юнктуру світового ринку (Nokia, Eriksson, Qualcomm, Motorola, Lucent, Nortel і ін.). Одним з каменів спотикання виявилася невідповідність розподілів частот у різних частинах світу, що ускладнює стандартизацію діапазонів. Іншою серйозною перешкодою стало природне прагнення ряду корпорацій, особливо лідерів у просуванні систем стандарту IS-95 (QUALCOMM, Lucent і т. д.), максимально згладити

виробничі проблеми, що неминуче супроводжують перехід на нові технології, і дотриматись наступності між 2G і 3G стандартами. Однак у підсумку численних взаємних поступок, компромісів і спроб гармонізації проектів відносна згода до 2000 року була все-таки досягнута.

Погоджені базові вимоги, що визначають філософію 3G, є такими:

- швидкість передачі даних до 2 Мбіт/с у межах смуги не більше 5 МГц;
- можливість варіювання швидкості в широкому діапазоні залежно від характеру переданих даних;
- співіснування систем 2G і 3G і можливість естафетної передачі між ними з метою розширення зон покриття та вирівнювання трафіка;
- підтримка асиметричного режиму роботи, коли лінія «вниз» має значно більш напружений трафік (наприклад, при пошуку інформації в Internet) у порівнянні з лінією «вверх»;
- можливість реалізації дуплексної передачі у варіантах як частотного, так і часового рознесення ліній «вниз» і «вверх»;
- максимальна гнучкість мережного устаткування та можливість побудови його на основі "набору інструментів" (toolbox).

До середини 2002 р. лідируючі позиції закріпилися за двома проектами, загальною платформою яких є технологія кодового розділення (CDMA). Перший з них UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) є продуктом кооперації Євросоюзу (ETSI) і Японії (ARIB) та має діючу підтримку з боку Кореї, Китаю, а також багатьох корпорацій Європи і США. Хоча радіоінтерфейс UMTS, що одержав назву UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network), оснований на кодовому розділенні і практично не має нічого спільного з фізичним рівнем GSM, на мережному рівні пропонується стандарт цілком опирається на "готову" інфраструктуру GSM. Для завершення роботи над специфікацією стандарту створене організаційне ядро 3GPP (3G Partnership Project), найменування якого часто використовується як синонім назви самого проекту UMTS.

Другий проект, відомий під назвою cdma2000, є максимально спадкоємним стосовно системи cdmaOne (IS-95) і наполегливо просувається компаніями Qualcomm, Lucent і Motorola – основними постачальниками й операторами діючих CDMA-систем. З огляду на масштаби поширення cdmaOne у США та на азіатському субконтиненті, можна не сумніватися в життєздатності й перспективності названого проекту. Процес доведення специфікації цього стандарту також інтернаціоналізований і контролюється органом, названим 3GPP2 (3G Partnership Project number 2).

У даному розділі дається короткий огляд ключових рішень, що становлять основу фізичного рівня згаданих 3G стандартів. При цьому більша частина матеріалу присвячена радіоінтерфейсу UMTS.

5.2 Радіоінтерфейс системи UMTS/FDD

5.2.1. Загальна характеристика та основні параметри

Специфікація 3GPP являє собою надзвичайно громіздкий документ, завершена версія якого містить більше 4000 сторінок. За своїм призначенням це директива, головна мета якої – надати однозначні та недвозначні вказівки, що підлягають обов'язковому виконанню будь-яким виробником і оператором. Зупинимося на найбільш принципових рисах фізичного рівня радіоінтерфейсу UTRAN.

Міжнародним регламентом для SG-систем на європейському та більшій частині азіатського субконтинентів виділені ділянки спектра в районі частоти 2 ГГц: 1920... 1980 МГц для лінії "вверх" і 2110...2170 МГц для лінії "вниз". Тим самим передбачається організація дуплексного зв'язку на основі частотного рознесення (FDD - frequency division duplex). Однак зазначені діапазони доступні не у всіх частинах світу в силу історично сформованого розподілу частот, і тому в деяких регіонах (наприклад США) реалізація частотного дуплекса є неможливою. Тому, поряд з основним (частотним) варіантом дуплекса, стандарт обумовлює і додатковий – *часовий* (TDD - time division duplex), у якому частина часового кадру виділяється для передачі повідомлення від БС до МС, тоді як інша служить для передачі у зворотному напрямку.

Стандартом пропонується виконання таких вимог,

- швидкість передачі даних до 2 Мбіт/с у межах смуги не більше 5 МГц;
 - можливість варіювання швидкості в широкому діапазоні залежно від характеру переданих даних;
 - можливість мультиплексної передачі в рамках одного контакту даних різноманітного змісту й різного рівня вимог до якості (мова, мультимедіа, пакети й под.);
 - співіснування систем 2G і 3G і можливість естафетної передачі між ними з метою розширення зон покриття й вирівнювання трафіка;
 - підтримка асиметричного режиму роботи, коли лінія "вниз" має значно більше навантажений трафік (наприклад, при пошуку інформації в Internet) у порівнянні з лінією "вверх";
 - можливість реалізації дуплексної передачі у варіантах як частотного, так і часового рознесення ліній "вниз" і "вверх";
 - максимальна гнучкість мережного устаткування та можливість побудови його на основі "набору інструментів" (toolbox);
 - доступність мобілізації найбільш сучасних резервів поліпшення якості зв'язку (адаптація до умов поширення, просторова селекція терміналу – smart-антени, багатокористувацькі – multiuser-приймачі та ін.).
- Також встановлені тверді орієнтири за швидкістю передачі:
- поза межами великих міст при швидкості руху користувача до 500 км/год не менш 144 кбіт/с (у майбутньому до 384 кбіт/с);

- у приміській і міській зоні при швидкості до 120 км/год не менш 384 кбіт/с (у майбутньому до 512 кбіт/с);

- всередині приміщень при швидкості до 10 км/год не менш 2 Мбіт/с.

Крім того, специфікація 3GPP визначає UMTS як *широкополосову* (spread spectrum) систему з кодовим розділенням (CDMA) і *прямим розширенням* (direct sequence), жорстко обмовляючи структури розширювальних, каналізуючих та скремблюючих кодів, а також встановлюючи єдину й незмінну частоту проходження чипів названих кодів в 3,84 Мчип/с ($3,84 \cdot 10^6$ чипів у секунду).

5.2.2 Логічні, транспортні та фізичні канали

Під фізичним рівнем UTRAN відповідно до загальної класифікації багаторівневих відкритих систем розуміється сукупність процедур і засобів, безпосередньо пов'язаних з обміном даними між БС і МС. До таким, серед іншого, відносяться:

- завадостійке каналне кодування, мультиплексування та демультиплексування даних, що надходять із верхніх рівнів;
- узгодження швидкостей інформаційних потоків, що надходять по транспортних каналах із сіткою швидкостей, які надаються фізичними каналами;
- відображення транспортних каналів на фізичні;
- модуляція, *розширення* (spreading) і *стиснення* (despreading) спектра фізичних каналів;
- частотна та часова синхронізація;
- вимірювання параметрів каналу та керування потужністю випромінювання по замкнутій петлі;
- зважування та комбінування фізичних каналів;
- радіочастотна обробка сигналів.

Розглянемо більш детально зміст класифікації каналів, прийнятої в документах 3GPP, вона дещо відрізняється від характерної, наприклад, для стандарту GSM.

Поняття "логічний канал" відноситься до рівнів вище фізичного та відображає зміст даних, призначених для передачі (обмін повідомленнями зі споживачем або команди керування). Термін "транспортний канал" відноситься до способу та формату даних, переданих далі по фізичних каналах. У свою чергу, специфічні частота та й кодова послідовність, що забезпечують з'єднання між БС і МС, задають той або інший фізичний канал. Як можна бачити, інформація, структурована в транспортних каналах, далі проектується на фізичні канали, по яких передається "вниз" і "вверх".

Вкажемо ще одну класифікаційну ознаку, що відноситься як до фізичних, так і до транспортних каналів UMTS: і ті й інші поділяються на *виділені* (dedicated) і *загальні* (common). Виділені транспортні канали (по одному на кожного користувача) містять дані обміну між конкретним споживачем і мережею, а також сигнали керування, тоді як загальні транспортні

канали служать для передачі системної інформації, даних про конфігурацію мережі та параметри стільника, сигналів виклику, пакетних повідомлень та ін.

Всі фізичні канали мають стандартизовану часову структуру. Кожний канал ділиться на кадри тривалістю 10 мс (38 400 чипів). Кожний кадр складається з 15 слотів, що мають тривалість 666,6... мс (2560 чипів). Розподіл даних між слотами й у межах слота варіюється залежно від типу фізичного каналу та поточної швидкості передачі даних.

5.2.3. Виділені фізичні канали лінії "вверх"

Виділений фізичний канал використовується споживачем на монопольній основі. Існує два типи виділених фізичних каналів на лінії «вверх»: канал даних DPDCH (dedicated physical data channel) і канал керування DPCCCH (dedicated physical control channel). DPDCH використовується для передачі даних виділеного транспортного каналу, у той час як DPCCCH передає від МС до БС інформацію службового призначення: біти пілот-сигналу, необхідного для оцінювання поточних параметрів траси між даним МС і БС і когерентного детектування, команди керування потужністю випромінювання БС по замкнутій петлі й ін. Канал керування DPCCCH для даного користувача завжди один, тоді як каналів даних DPDCH може бути декілька: єдиний виділений транспортний канал може відображатися паралельно на декількох (до 6) фізичних з метою збільшення швидкості передачі (*мультикодова* передача). Ідентифікаційною ознакою кожного з виділених фізичних каналів (будь-то DPDCH або DPCCCH) є один з каналізуючих кодів.

У випадку використання даним споживачем єдиного DPDCH, об'єднання останнього з обов'язково присутнім каналом керування DPCCCH відбувається у квадратурному модуляторі, причому DPDCH подається в синфазну (I), а DPCCCH - у квадратурну (Q) гілку останнього. Попередньо кожний із цих каналів, що подає бітовий потік у формі двополярного сигналу, перемножується зі своїм каналізуючим кодом, а потім зважується відповідним множником (β_d для DPDCH, β_c для DPCCCH), для того щоб каналні потужності відповідали різним (при необхідності) вимогам до якості прийому користувачького повідомлення й даних контролю. Найбільший з коефіцієнтів завжди підтримується рівним одиниці, нульове значення означає відключення відповідного каналу, а проміжні значення рівномірно заповнюють інтервал (0,1) із кроком 1/15. Зміна ваг може відбуватися від одного кадру до іншого.

Якщо споживач втягує в роботу більше одного DPDCH, всі вони зважуються тим самим множником β_d і рівномірно розподіляються між гілками модулятора. Таким чином, всі паралельно діючі DPDCH абсолютно рівноправні. Сказане ілюструє рис. 5.1, де каналізуючий код, що відповідає i -му виділеному каналу даних (DPDCH $_i$, $i = 1, 2, \dots, 6$) позначено як KK_i , а код, що формує фізичний канал DPCCCH, – як KK_c .

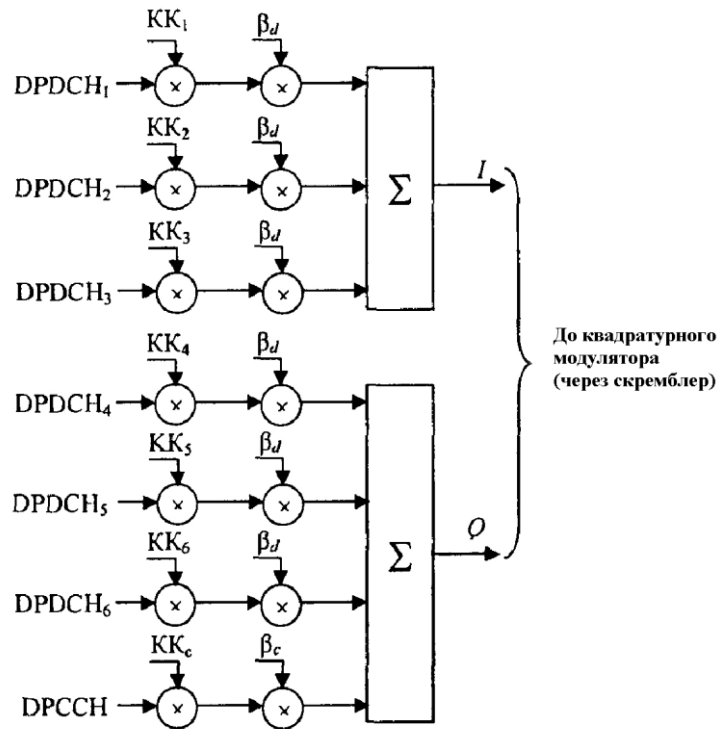


Рисунок 5.1 – Мультиплексування виділених каналів лінії «вверх»

5.2.4 Загальні фізичні канали лінії "вверх"

Загальні фізичні канали відрізняються від виділених тим, що їх ресурс надається у розпорядження відразу всім МС. Існує два типи загальних каналів лінії «вверх»: *канал випадкового доступу* RACH (random access channel) і *канал пакетної передачі* CPCH (common packet channel), причому ця класифікація ідентична і для фізичних, і для транспортних каналів з відповідним проектуванням других на перші. Канал RACH служить для ініціювання контакту з мережею з боку МС (наприклад, виклику) і для передачі коротких пакетних повідомлень, тоді як основний пакетний зв'язок між МС і мережею здійснюється через канал CPCH.

Фізичний канал випадкового доступу PRACH (*physical RACH*) містить преамбулу довжиною в 4096 чипів. Преамбула являє собою 256 разів повторений *ідентифікатор* (signature) з 16 чипів. МС може розпочати передачу по каналі PRACH на початку кожного з 15 спеціальних слотів доступу, що мають довжину 5120 чипів кожний і разом займають два кадри. Діаграма цих слотів задається у форматі передачі БС, для чого передбачено спеціальний *широкомовний транспортний канал* BCH (broadcasting channel) лінії "вниз". Таким чином, робота каналу PRACH відповідає протоколу ALOHA зі "слотуванням" (slotted ALOHA). Після прийому преамбули БС сигналізує МС про наявність контакту і МС передає повідомлення, що займає відрізок в 10 або 20 мс (один або два кадри). Оскільки зв'язок по каналу PRACH з кожної МС досить короткочасний, керування потужністю по за-

мкнутій петлі в ньому стандартом не передбачено.

Структура фізичного каналу пакетної передачі PCPCH (physical CPCH) багато в чому аналогічна, однак частина, що відводиться на передачу повідомлення, може займати декілька кадрів, а преамбульна частина доповнена спеціальною вставкою (4096 чипів), що служить для виявлення колізій (CD-P - collision detection preamble), тобто, спроб одночасного використання каналу декількома МС. Крім того, у PCPCH, як і у виділених користувацьких каналах, присутні сигнали керування потужністю по замкнутій петлі, а також окрема частина преамбули PC-P (power control preamble), що займає від 0 до 8 слотів. Остання є обов'язковою й може бути активізована БС для прискорення збіжності процедури регулювання потужності.

Як і у виділених каналах, в PRACH і PCPCH можна розрізнити два типи потоків даних: власне інформаційний і команди керування. Для їхнього мультиплексування одного з другим використовується той же варіант квадратурного ущільнення з попереднім зважуванням, що й для об'єднання DPDCH з DPSSCH. Для мультиплексування загальних каналів з виділеними використовуються каналізуючі коди, розглянуті в наступному підрозділі.

5.2.5 Каналізуючі коди лінії "вверх"

Оскільки кожна МС може використовувати для передачі декілька виділених каналів даних DPDCH, необхідні заходи, що гарантують їх роздільність у приймачі БС. Оскільки всі сигнали, передані однією МС, прив'язані до єдиної часової шкали, що задається стандартом частоти МС, інакше кажучи, строго синхронізовані, розділення каналів можна реалізувати як синхронне кодове ущільнення на основі ортогональних каналізуючих кодів.

Формат каналізуючих кодів у документах 3GPP описаний за допомогою двійкового кодового дерева, тобто ітераційного алгоритму. На кожній ітерації будь-яке кодове слово, отримане на попередньому кроці, перетворюється у два нових подвійної довжини шляхом дворазового повторення в одному слові та повторення зі зміною знака в іншому. Так, якщо C_k - яесь слово, отримане на k -му кроці, його "нащадками" на $k+1$ -му будуть слова вигляду (C_k, C_k) , $(C_k, -C_k)$. Таким чином, стартуючи із тривіального слова довжиною 1, рівного одиниці, за k ітерацій можна одержати 2^k кодів векторів довжиною $N = 2^k$, ортогональність яких є очевидною (рис. 5.2 для $k = 3$).

Для організації виділеного каналу керування DPSSCH завжди використовується кодове слово довжиною $N = 256$, що складаєть з одних одиниць. Для каналів даних DPDCH можуть використовуватися різні довжини кодів слів відповідно до реалізованого в UTRAN принципу керуваної швидкості передачі. Оскільки тривалість одного чипа є зафіксованою, зміна швидкості передачі, тобто тривалості одного біта, автоматично пропорційна співвідношенню між тривалістю біта й чипа (*коефіцієнт розширення спектра* SF – spreading factor). Якщо споживач використовує тільки один

канал даних DPDCH, він може варіювати SF у межах від 256 (найнижча швидкість передачі) до 4 (найвища в рамках єдиного DPDCH). При цьому завжди використовується кодовий вектор з номером $l = SF/4$, якщо відлік на дереві вести зверху вниз. Зрозуміло, що мінімальне розширення спектра $N = SF = 4$ відповідає швидкості передачі $R_t = (3,84/4) \cdot 10^6 = 0,96 \text{ Мбіт/с}$. (Швидкість передачі корисної інформації приблизно вдвічі нижча внаслідок застосування потужних коригувальних кодів.) У тих випадках, коли подібна швидкість виявляється недостатньою, МС може використовувати до 6 паралельних DPDCH обов'язково з тим самим (мінімальним) розширенням: $N = SF = 4$, причому правило вибору каналізуючих кодових слів для кожного числа каналів від 1 до 6 жорстко регламентовано специфікацією.

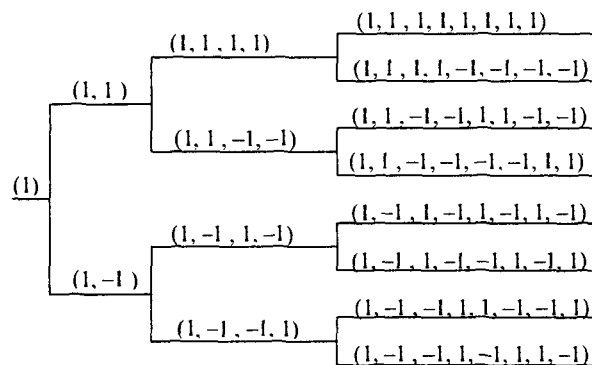


Рисунок 5.2 – Дерево каналізуючих кодів

Для мультиплексування загальних каналів PRACH і PCPCH із виділеними DPDCH і DPSSCH використовуються кодові слова, алгоритм вибору яких на кодовому дереві також визначається специфікацією.

Досить дискусійною є роботоздатність лінії "вверх" при настільки малому коефіцієнті розширення спектра, як $SF = 4$. Справа в тому, що при застосуванні на БС стандартного кореляційного приймача потужність асинхронної завади від інших споживачів (завади множинного доступу) послаблюється за рахунок стиснення спектра саме в SF раз. Зрозуміло, що для ефективного придушення згаданої завади потрібні набагато більші значення SF , ніж 4. У матеріалах 3GPP не вдається виявити будь-яких виразних роз'яснень із цього приводу. Одна з гіпотез, що пояснюють введення стандартом малих значень SF (4, 8, ...), може полягати в тому, що вони передбачаються для специфічних умов, які практично виключають появу взаємної завади (наприклад, у мікростільнику мережі всередині приміщення). Інше припущення: їхнє застосування можливо тоді, коли БС обладнана так званим *багатокористувацьким* (multiuser) приймачем, що потенційно забезпечує виграш у ступені нейтралізації завади множинного доступу в порівнянні із традиційним кореляційним. До недавніх пор подібні приймачі вважалися надто складними в реалізаційному плані, однак нині, очевидно, уже цілком доречно говорити про їхні практичні перспективи.

5.2.6 Скремблювання в лінії "вверх"

Завершальним кроком у розширенні спектра й реалізації кодового поділу в лінії "вверх" є скремблювання, тобто перемножування мультиплексованого сигналу МС зі специфічним для кожної МС скремблюючим кодом, що відіграє роль ідентифікатора (сигнатурної послідовності) МС. Зрозуміло, критерієм відбору підходящих сигнатурних кодів для МС слугує їхня слабка кореляція, що забезпечує розділення сигналів різних МС приймачем БС. Специфікацією пропонуються два можливих формати скремблювання в лінії "вверх": довгі та короткі коди.

Довгі коди передбачені для випадку, коли в приймачі БС застосовується алгоритм багатопрореневого рознесення. Кожна зі скремблюючих послідовностей при цьому являє собою код Голда довжиною $L = 2^{25} - 1$, усічений до 38400 чипів, тобто довжини одного кадру. Нагадаємо алгоритм формування ансамблю послідовностей Голда. Кожна з них може бути отримана підсумовуванням за модулем 2 двох спеціально підібраних M -послідовностей однієї й тієї ж довжини $L = 2^n - 1$, де n – пам'ять, рівна числу комірок регістра зсуву з лінійним зворотним зв'язком, що генерує кожну з M -послідовностей. Схема з'єднань у петлі зворотного зв'язку регістра визначається поліномом ступеня n з коефіцієнтами із двійкового поля Галуа $GF(2)$. Поліноми 25-го ступеня, позначені в специфікації:

$$f_1(x) = x^{25} + x^3 + 1,$$
$$f_2(x) = x^{25} + x^3 + x^2 + x + 1.$$

Поелементне підсумовування отриманих M -послідовностей за модулем 2 дає послідовність Голда. Циклічний зсув перед додаванням першої M -послідовності на один чип приведе до формування іншої послідовності Голда. Зміщення на два чипи породить третю послідовність Голда й т. д. У такий спосіб можна одержати $L = 2^n - 1$ різних послідовностей довжиною L . Ще дві послідовності Голда – це вихідні M -послідовності. Таким чином, загальний об'єм ансамблю Голда дорівнює $L + 2 = 2^n + 1$, тобто у випадку $i = 25$ перевищує 2^{25} . Зрозуміло, щоб використовувати отримані послідовності (як і будь-які інші, що складаються із символів 0, 1) для модуляції високочастотного коливання, варто перейти до дійсних символів ± 1 за правилом: $0 \Rightarrow +1, 1 \Rightarrow -1$.

Основна перевага ансамблю Голда в порівнянні з іншими – це оптимальність його періодичних кореляційних властивостей. Однак внаслідок усікання довжини до $N = 38\,400$ ця перевага повністю втрачається, і єдиним виправданням переваги саме ансамблю Голда можуть слугувати простота та регулярність правила формування дуже великого числа (не меншого $2^{25} + 1$) послідовностей. Кожна скремблююча послідовність жорстко синхронізована з часовою сіткою МС, так що початок кадру збігається з першим символом кодової послідовності Голда, яка періодично повторюється в кожному кадрі.

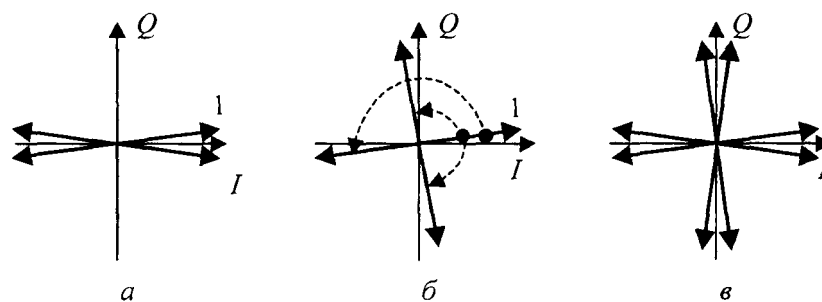


Рисунок 5.3 – Балансування квадратур при комплексному скремблюванні

Бінарна послідовність Голда із символами ± 1 далі перетвориться в чотирифазну. Зміст подібного переходу полягає у вирівнюванні потужностей у квадратурних каналах модулятора в результаті скремблювання. Справа в тому, що квадратурному мультиплексуванню виділених каналу даних і каналу керування передують зважування, так що потужності квадратурних компонентів у мультиплексованому сигналі можуть багаторазово відрізнитися. Сказане ілюструється рис. 5.3, а, де показані чотири можливі стани сигнального вектора, що відповідають 4 комбінаціям знаків квадратур, які мають різний рівень. Припустимо тепер, що подібний сигнал перемножується з випадковою чотирифазною послідовністю, яка має постійну амплітуду та рівну ймовірність появи кожного із чотирьох можливих символів $\pm 1, \pm j$. Тоді кожна з 4 точок на рис. 5.3, а (наприклад, 1) з рівною ймовірністю залишається на місці, переходить у протилежну або зміщується на $\pm 90^\circ$ (рис. 5.3, б). У підсумку діаграма станів сигнального вектора приймає вигляд рис. 5.3, в, що демонструє повну рівноправність квадратурних компонентів.

Операція скремблювання як така здійснюється у квадратурному модуляторі шляхом комплексного перемноження мультиплексованого сигналу зі скремблюючим кодом: Нехай скремблюваний і скремблюючий сигнали мають комплексні обвідні $\dot{S}(t) = S_i(t) + jS_q(t)$ і $\dot{C}(t) = C_i(t) + jC_q(t)$, де індекси i та q розділяють дійсну (синфазну) і уявну (квадратурну) частини комплексної обвідної. Тоді, відповідно до правила комплексного множення,

$$\dot{S}(t)\dot{C}(t) = [S_i(t)C_i(t) - S_q(t)C_q(t)] + j[S_i(t)C_q(t) + S_q(t)C_i(t)],$$

так що скремблювання може бути виконано схемою, показаною на рис. 5.4, де дійсна й уявна частини комплексної амплітуди скремблюваного сигналу знімаються із плеч I і Q схеми на рис. 5.1. Виходом є дійсна й уявна частини добутку $\dot{S}(t)\dot{C}(t)$, які потім модулюють синусне та косинусне коливання несучої частоти f_0 .

Механізм утворення комплексного скремблюючого коду, визначений специфікацією, полягає у тому, що бінарна усічена послідовність Голда задає безпосередньо дійсну частину скремблюючого коду $C(i)$. Та ж вихідна

послідовність Голда (до усікання) береться зі зсувом у 16 777 232 чипа, після чого виконується її усікання до необхідної довжини $N = 38\,400$. В отриманій в такий спосіб послідовності $C'(i)$ всі непарні символи замінюються на інверсії попередніх парних. Добуток результату з дійсною частиною $C(i)$ і використовується як уявний компонент. Отриманий тим самим чотирифазний скремблюючий код формально записується як

$$\dot{C}(i) = C(i)\{1 + j(-1)^i C'(2i/2)\}, \quad i = 0, 1, \dots, \quad (5.1)$$

де $[]$ позначає цілу частина числа. Настільки громіздка процедура побудови скремблюючого коду задумана з єдиною метою: вдвічі зменшити частоту переходів QPSK-сигналу в протилежний стан і полегшити тим самим енергетичний режим передавача. Безпосередня перевірка показує, що при переході від парних позицій до непарних знаки дійсної й уявної частин не можуть змінюватися одночасно, що й означає зміну сигнального вектора на сусідній, тобто поворот на кут $\pm 90^\circ$.

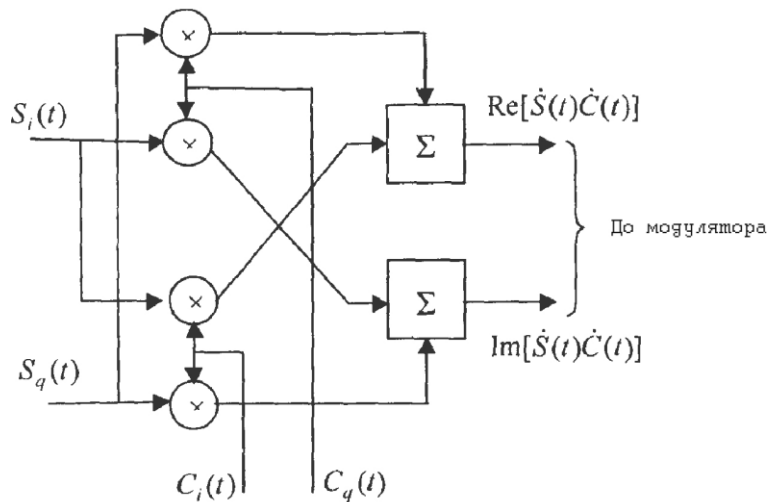


Рисунок 5.4 – До реалізації комплексного скремблювання

Короткі скремблюючі коди довжиною 256 відведені стандартом для випадків, коли на БС застосований багатокористувацький приймач. Довгі скремблюючі коди істотно ускладнили б структуру останнього, у зв'язку із чим і запропонована альтернатива коротких послідовностей довжини $N = 256$. Така окрема послідовність отримується шляхом підсумовування за модулем 4 рекурентної четвіркової послідовності над кільцем відрахувань за модулем 4 (Z_4), що задається поліномом

$$f(x) = x^8 + x^5 + 3x^3 + x^2 + 2x + 1,$$

і двох бінарних рекурентних послідовностей, що задаються поліномами

$$g_1(x) = x^8 + x^7 + x^5 + x + 1,$$

$$g_2(x) = x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + 1.$$

Отримана четвіркова послідовність $D(i)$ довжиною $N = 255$ розширюється на один елемент: $D(255) = D(0)$, після чого розщеплюється на дві бінарні послідовності $C(i)$, $C'(i)$, за правилом, заданим у специфікації

табл. 5.1.

Після цього бінарні послідовності $C(i)$, $C'(i)$ перетворюються в комплексний скремблюючий код згідно з (5.1), як це було й у випадку довгих кодів.

Таблиця 5.1 – Відображення кільця Z_4 у пари двополярних символів

$D(i)$	$C(i)$,	$C'(i)$
0	+1	+1
1	-1	+1
2	-1	-1
3	+1	-1

Скремблюючі коди "ізолюють" один від одного не тільки сигнали різних МС, але й канали загального користування (PRACH, PCPCH) від виділених (DPDCH, DPCCCH).

5.2.7 Транспортні канали лінії "вниз" і їх відображення на фізичні

Інформація, передана мережею винятково даному користувачеві, на транспортному рівні оформлена у вигляді єдиного *виділеного каналу* DCH (dedicated channel). На фізичному рівні, залежно від змісту переданого повідомлення, йому, як і в лінії "вверх", відповідають два виділені канали – даних DPDCH і керування DPCCCH.

Номенклатура загальних транспортних каналів у лінії "вниз" помітно ширша, ніж у протилежному напрямку. До неї, зокрема, входять уже згадуваний *широкомовний канал* BCH (broadcast channel), що несе інформацію, яка відноситься до системи або стільника в цілому і адресовану всім МС даного стільника *канал доступу* FACH (forward access channel), по якому БС передає командну інформацію МС, місце розташування якої БС знає; *канал виклику* PCH (paging channel), використовуваний для передачі команд МС із невідомою локалізацією; *груповий канал* DSCH (downlink shared channel) для зв'язку БС з декількома МС.

Фізичний шар каналів пов'язаний із транспортним такими відповідно-стями: для передачі BCH використовується *первинний загальний фізичний канал керування* P-CCPCH (primary common control physical channel); FACH відображається у *вторинний загальний фізичний канал керування* S-CCPCH (secondary common control physical channel); передача даних PCH здійснюється частково тим же фізичним каналом S-CCPCH, а частково *каналом синхронізації* SCH (synchronisation channel). Що ж стосується групового транспортного каналу, його інформація передається по шести фізичних каналах.

5.2.8 Організація фізичних каналів лінії "вниз"

Механізм мультиплексування виділених каналів DPDCH і DPCCCH у розглянутій лінії є іншим, ніж у лінії "вверх": кожен слот розбивається

на декілька вікон, кожне з яких відведене для передачі або даних, або команд керування. Такий варіант поділу каналів був відкинутий для лінії "вверх" через те, що дані можуть передаватися не завжди, тобто в якісь проміжки часу DPDCH може бути виключений. При цьому передача команд керування по DPCCCH не припиняється, і, отже, при часовому ущільненні DPDCH і DPCCCH випромінювання набуває переривчастого характеру, що створює завади близько розташованим радіоелектронним приладам. Подібне явище нерідко відмічається при користуванні терміналами стандарту GSM. Для БС же цей фактор є набагато менш значимим, оскільки поблизу її антени не можуть перебувати пристрої, що настільки сильно реагують на переривчасте випромінювання, чим і пояснюється вибір згаданого механізму мультиплексування в лінії "вниз".

Інша відмінність фізичних каналів лінії "вниз" полягає в застосуванні квадратурної (а не бінарної) ФМ для передачі інформації в кожному з каналів зв'язку із МС. При цьому вихідний двійковий потік даних розщеплюється в демультіплексорі DMX на два паралельних, так що парні біти надходять у синфазне (I), а непарні – у квадратурне (Q) плечі модулятора ФМ4 (рис. 5.5).

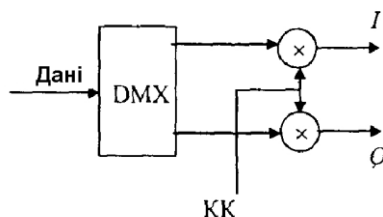


Рисунок 5.5 – Розщеплення даних у лінії "вниз"

Після перемноження з каналізуючим кодом КК результати, які інтерпретуються як дійсна й уявна компоненти комплексної величини, перемножуються зі скремблюючим кодом так само, як це робиться в лінії "вверх" (див. рис 5.4).

5.2.9 Каналізуючі коди лінії "вниз"

Якщо БС використовує тільки один виділений канал даних для зв'язку з певною МС, цей канал у парі з виділеним каналом керування задається за допомогою відповідного каналізуючого коду. Каналізуючий код є унікальним і відрізняє дану МС від інших. У тих випадках, коли для збільшення швидкості БС передає повідомлення даної МС по декількох каналах відразу, каналізуючі коди цих каналів повинні бути різними (ортогональними) і, зрозуміло, не можуть бути використані в лінії "вниз" для зв'язку з іншими МС. Відзначимо, що в цьому випадку (мультикодова передача) командна складова DPCCCH передається лише по одному з паралельно зайнятих фізичних каналів, причому швидкість передачі по DPDCH, а виходить і розширення

спектра у всіх цих каналах, однакові.

Для розділення загальних фізичних каналів з виділеними та між собою також використовуються ортогональні каналізуючі коди. Повне сімейство каналізуючих кодів будується за допомогою алгоритму, описаного раніше для лінії "вверх", тобто являє собою ансамбль функцій Уолша або OVSF по термінології специфікації. Діапазон можливих розширень спектра в лінії "вниз" – від 4 до 512.

Відзначимо, що при роботі з різними швидкостями в різних каналах доводиться використовувати каналізуючі коди з різним значенням розширення спектра. Опіраючись на алгоритм побудови кодів і рис. 12.2, можна побачити, що кодові слова з різним розширенням спектра (різною довжиною) зберігають ортогональність на мінімальній з довжин лише у випадку, коли жодне з них не є нащадком іншого. Як можна зрозуміти, процедура присвоєння тих або інших кодових слів фізичним каналам у лінії "вниз" є набагато серйознішою, ніж у лінії "вверх". Дійсно, кожна МС має у своєму монопольному розпорядженні все дерево в цілому, оскільки одна МС відділена від іншої унікальним законом скремблювання. У лінії ж "вниз" скремблюючий код для всіх МС даного стільника той самий і служить для розділення сигналів лише між різними БС. Таким чином, вся вага забезпечення внутрішньостільникової ємності лягає цілком на каналізуючі коди. У зв'язку із цим керування кодовим ресурсом у прямому каналі виявляється складною динамічною задачею, яка розв'язується на рівні координації роботи всієї мережі.

5.2.10 Скремблювання в лінії "вниз"

Як уже згадувалося, скремблюючі коди лінії "вниз" використовуються для розділення сигналів різних БС. Вихідним матеріалом для них служать бінарні послідовності Голда. Дві спеціально вибрані M -послідовності однакової довжини будуються на основі поліномів

$$f_1(x) = x^{18} + x^7 + 1,$$
$$f_2(x) = x^{18} + x^{10} + x^7 + x^5 + 1$$

Після поелементного підсумовування за модулем 2 пари таких послідовностей, взятих з деяким взаємним зсувом, виходить одна з послідовностей Голда довжиною $L = 2^{18} - 1 = 262143$. Хоча максимальна кількість одержуваних у такий спосіб послідовностей Голда дорівнює $L = 2^{18} - 1 = 262143$, стандартом передбачене використання тільки $2^{13} = 8192$ з них. Із всіх дозволених послідовностей вирізаються два сегменти довжиною 38 400: початковий і зсунутий на $2^{17} = 131072$ символи, які далі перетворюються в послідовності символів ± 1 за правилом $0 \rightarrow +1, 1 \rightarrow -1$. Перша з них $C(i)$ використовується як дійсна, а друга $C'(i)$ – як уявна частина чотирифазного скремблюючого коду $C(i) + jC'(i)$ у модуляторі рис. 12.4.

У специфікації встановлена строга ієрархія застосовуваних скремблюючих кодів. Насамперед 8192 коди систематизовані в 512 множин, кож-

на з яких складається з одного первинного та 15 вторинних кодів. Всі первинні коди розбиті на 64 групи по 8 кодів у кожній. Кожній БС приписується тільки один первинний код. Для деяких фізичних каналів (приміром Р-ССРСН) допускається використання тільки первинного коду, тоді як іншим дозволено використовувати як первинний, так і вторинні коди.

5.2.11 Канал синхронізації

Канал синхронізації SCH видіграє винятково важливу роль в архітектурі лінії "вниз", тому що з його допомогою МС здійснює ініціалізацію: пошук стільника та визначення границь кадрів і слотів у форматі передачі БС. Фактично канал є сукупністю двох підканалів: первинного та вторинного. Сигнали, передані й по первинному, і по вторинному каналах синхронізації, не піддаються скремблюванню або перемножуванню з каналізуючим кодом, оскільки етап ініціалізації має місце до того, як МС одержує відомості про конкретний скремблюючий код БС, що обслуговує зону присутності МС.

Сигнали первинного та вторинного каналів синхронізації займають початкові 256 чипів кожного слота. При цьому первинний синхросигнал ідентичний не тільки в кожному слоті, але й для всіх БС. Тому, виконуючи пошук первинного сигналу, МС не має можливості вибору тієї або іншої БС: з якою із них вдалося увійти в контакт, з'ясується лише після завершення синхронізації. Після захоплення первинного синхросигналу МС знає границі слотів, але не знає границь кадру. Тому на другому етапі синхронізації здійснюється вибір між 15 (за числом слотів у кадрі). Для цього використовується вторинний канал синхронізації, сигнал якого має період в 15 слотів (1 кадр). Закон формування вторинного синхросигналу є специфічним для кожної БС і жорстко прив'язаний до однієї з 64 груп первинних скремблюючих кодів. Таким чином, після закінчення другого етапу синхронізації МС у стані упізнати, яка зі згаданих груп використовується знайденою БС, а потім, перевіряючи 8 гіпотез про конкретний скремблюючий код в даній групі, усунути й цю невизначеність.

Первинний синхронізуючий код PSC (primary synchronization code) визначений специфікацією як 16-елементна послідовність

$$a = (1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, 1),$$

повторена 16 разів у прямому або інвертованому вигляді, тобто як $-a$, відповідно до закону

$$C_{ps} = (a, a, a, -a, -a, a, -a, -a, a, a, -a, a, -a, a, a)$$

у результаті чого виходить послідовність довжиною 256.

Вторинні синхрокоди будуються на базі шаблону z довжиною 256, складеного аналогічно первинному синхрокоду. Для цього 16-елементна послідовність

$$b = (1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1),$$

яка збігається з a в перших вісьмох символах і з інверсією a - у інших,

маніпулюється за правилом

$$z = \{b, b, b, -b, b, b, -b, -b, b, -b, b, -b, -b, -b, -b, -b\}.$$

Далі використовується матриця Адамара \mathbf{H}_8 розміром 256, побудована за рекурентним алгоритмом Сильвестра:

$$H_0 = 1, H_{k+1} = \begin{bmatrix} H_k & H_k \\ H_k & -H_k \end{bmatrix},$$

кожен 16-й рядок якої поелементно перемножується із шаблоном z . Отримані 16 ортогональних векторів довжиною 256 служать алфавітом для побудови 64 16-кових кодових слів довжиною 15. Кожне з таких кодових слів і використовується як вторинний синхросигнал. Алгоритм побудови синхрокоду має гарантувати досить слабку кореляцію як між будь-якими циклічними зсувами різних вторинних кодових послідовностей, так і між будь-яким словом і його ж циклічними зсувами на число позицій, не кратне 15.

Деякі з рішень, що відносяться до каналу синхронізації, провокують сумнів в їх безальтернативності. Так, первинний синхрокод у силу свого призначення повинен мати досить малі бічні пелюстки автокореляційної функції, що незмінно відзначається в літературі як домінуючий критерій його вибору. Подібна вимога багаторазово підсилюється, якщо взяти до уваги, що для всіх БС цей код однаковий, і тому бічні пелюстки сторонніх синхросигналов будуть створювати додаткові завади процедурі пошуку стільника. Тим часом жодних оптимальних властивостей АКФ рекомендованого синхрокода не має, маючи максимальні бічні пелюстки, рівні чверті основної (рис. 5.6, а). При довжинах, близьких до 256, можна знайти безліч набагато кращих кодів. Для прикладу на рис. 5.6, б наведена аперіодична АКФ бінарного коду довжиною 256, отриманого видаленням одного символу з послідовності Лежандра довжиною 257. Максимальна бічна пелюстка цього коду дорівнює $3/64$ від основної, тобто більш ніж у п'ятеро нижча, ніж у коду зі специфікації. Взагалі, каскадна структура вибраного коду сприяє помітному спрощенню узгодженого фільтра в приймачі МС.

Не цілком адекватним можна вважати й вибір вторинних синхрокодів. Так, вторинні синхрослова беруться з (15,3) коду Ріда–Соломона, тобто мають мінімальну відстань Хемінга, рівну 13. З врахуванням ортогональності 16-кових символів це без ускладнень перераховується у викиди періодичних авто- і взаємних кореляцій вторинних синхросигналів, рівних $2/15$ від основного піка. Разом з тим нескладний підрахунок показує, що використовувана розмірність простору сигналів 256×15 є цілком достатньою для досягнення повної ортогональності кожної з 64 синхропослідовностей як власним нетривіальним циклічним зсувам, так і всім зсувам будь-якої іншої послідовності (загальне число векторів 64×15 менше розмірності простору 256×15).

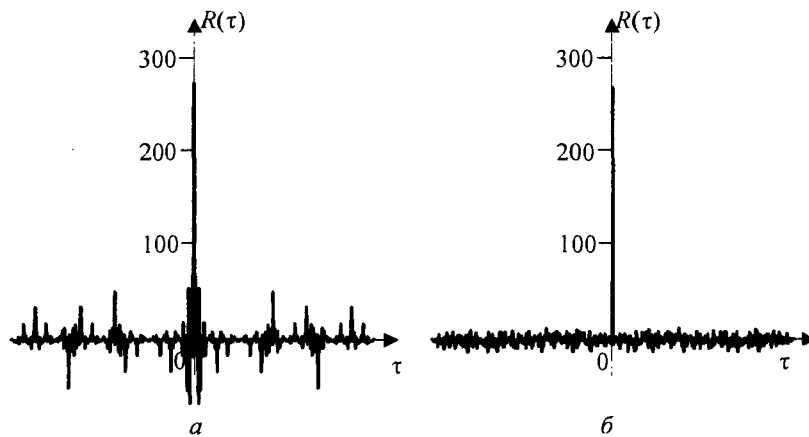


Рисунок 5.6 – Автокореляційні функції первинного синхрокоду UMTS і альтернативного коду

5.2.12 Процедури фізичного рівня UMTS

Функції фізичного рівня здійснюються як ряд процедур: швидке керування потужністю, випадковий доступ, виклик, вимірювання, пов'язані з естафетною передачею, рознесення при передачі із БС та ін. Зупинимося коротко на деяких з них.

Швидка замкнута петля керування потужністю. По цій петлі, що називається також внутрішньою, БС посилає команди МС на збільшення або зменшення потужності сигналу, переданого останньою. Тверда регламентація потужностей МС є принциповою для будь-яких CDMA радіоінтерфейсів, оскільки без неї вимоги до лінійного діапазону приймача БС виявилися б нереалістичними: різниця потужностей сигналів від ближніх і дальніх МС могла б перевищити 100 дБ, і найменша нелінійність приймача БС привела б до придушення слабого сигналу сильним (проблема "ближній-далекий" – near-far). Тому контур швидкого керування потужністю підтримує для кожної МС рівень випромінювання, що забезпечує задане (цільове) відношення сигнал – завада на вході приймача БС.

Команди по петлі передаються в кожному слоті, тобто із частотою 1500Гц. Кожна команда збільшує або зменшує потужність на 1 дБ, однак можливе збільшення кроку до 2 дб. Якщо потрібна зміна потужності менше ніж на 1 дБ, то це досягається пропуском команди в даному слоті без зміни дійсного кроку регулювання.

Цільове відношення сигнал – завада може встановлюватися різним в залежності від конкретних умов прийому в даному стільнику та динаміки споживача. Установлення його відноситься до відповідальності окремої, так званої *зовнішньої* (outer) петлі, й координується на рівні керування мережею.

Відкрита петля керування потужністю. У *відкритій* (open) петлі МС змінює потужність передавача не за командою БС, а автономно в залежності від рівня сигналу, прийнятого від БС: якщо цей рівень є великим, то МС робить висновок про те, що відстань до БС є малою й власна випромі-

нювана потужність повинна бути малою та навпаки. Точність вимірювання потужності приймачем МС є невисокою, до того ж через розходження частот ліній "вниз" і "вверх" умови поширення в них неоднакові, так що відкрита петля виконує досить грубе регулювання із кроком ± 9 дБ.

Відзначимо, що, на відміну від cdmaOne, відкрита петля UMTS функціонує не паралельно із замкнутою, а лише до того як МС ініціює роботу по каналу випадкового доступу (RACH) або по загальному пакетному каналу (CPCH). Це робиться тому, що замкнута петля має значно більш високу швидкодію і може реагувати на досить глибокі флуктуації умов поширення сигналу.

Виклик. Робота каналу виклику PCN організована в такий спосіб. Будь-який термінал, що один раз зареєструвався в мережі, приписується до деякої групи виклику. Для кожної групи є індикатор виклику, переданий періодично по спеціальному каналі індикаторів виклику PCN (paging indicator channel) щоразу, як тільки надходить виклик абонента даної групи. Термінал, зафіксувавши присутність сигналу виклику своєї групи, у наступному кадрі звертається до вторинного загального каналу керування S-CCPCH, з повідомлення якого він довідається, чи адресований виклик саме йому. Подібна двоступінчаста процедура вважається кращою з погляду енергозбереження та продовження терміну служби батареї МС.

Випадковий доступ. Під випадковим доступом розуміється входження МС у контакт із БС із ініціативи першої. Оскільки відкрита петля керування потужністю є досить неточною, а замкнута ще не функціонує, МС змушена встановлювати стартову потужність передавача на низькому рівні, щоб не загострювати проблему "ближній - далекий". Загальна схема процедури є такою:

1) з повідомлення широкомовного каналу BCN термінал впізнає скремблюючі коди доступних підканалів RACH випадкового доступу та дозволені ідентифікатори;

2) термінал випадковим чином вибирає один з дозволених його групою доступу субканалів RACH і (також випадковим чином) один із допустимих ідентифікаторів;

3) вимірюється рівень прийнятого від БС сигналу й встановлюється початкова потужність випромінювання МС по каналу RACH із достатнім запасом на неточність вимірювань;

4) передається преамбула тривалістю 1мс разом з ідентифікатором;

5) термінал декодує сигнал у каналі індикації захоплення AICH (acquisition indication channel), переданий БС, щоб дізнатися, чи прийнята послана їм преамбула;

6) якщо підтвердження захоплення по каналу AICH не надійшло, то термінал збільшує потужність передачі із кроком, кратним 1 дБ, і знову посилає преамбулу й ідентифікатор;

7) після надходження підтвердження МС передає 10 або 20 мс сегмент повідомлення.

Коефіцієнт розширення спектра в частині, відведеної на повідомлення, може змінюватися від 32 до 256 в залежності від вибраної швидкості. При максимальній швидкості протягом 20 мс передається 1200 каналних символів, що з врахуванням застосування кодів зі швидкістю порядку 1/2 відповідає 600 біт інформації.

Загальний пакетний канал CPCH. Загальний пакетний канал, що також надає ресурс всім МС на рівноправній основі, відрізняється від каналу випадкового доступу RACH лише тим, що по ньому можуть передаватися більш довгі повідомлення, які займають декілька кадрів. Внаслідок цього збільшується ймовірність колізії пакетів різних МС, для сигналізації про відсутність якої БС використовує спеціальний канал CD-ICH (collision detection indication channel). В іншому робота каналів CPCH і RACH має багато спільного.

Пошук стільника. Це процедура первісної синхронізації МС із мережею, що стартує із включенням живлення мобільного терміналу. Вона складається із трьох основних етапів.

1. Відразу після включення МС починає пошук первинного синхросигналу PSC. Нагадаємо, що PSC є однаковими для всієї мережі і не є ідентифікаторами БС. Оскільки PSC повторюється в кожному слоті, після завершення етапу МС знає границі слотів.

2. На другому етапі МС усуває неоднозначність відносно границь кадру й впізнає групу первинних скремблюючих кодів, опираючись на вторинний синхросигнал SSC. Існує 15×64 конкуруючих гіпотез, оскільки в кадрі міститься 15 слотів і загальна кількість різних SSC дорівнює 64. Співставивши відгуки кореляторів (або узгоджених фільтрів) на всі 15 циклічних зсувів всіх 64 SSC, приймач МС приймає рішення на користь пари зсув - код, яка максимізує відгук. Оскільки SSC жорстко синхронізований з кадром і прив'язаний до певної групи первинних скремблюючих сигналів, завершивши другий етап, МС знає границі кадру та групу скремблюючих кодів, приписану БС, з якої МС увійшла в контакт.

3. У кожній групі міститься 8 можливих первинних скремблюючих кодів, тому на третьому етапі МС перевіряє 8 конкуруючих гіпотез і після завершення етапу знає конкретний первинний скремблюючий код даної МС.

Естафетна передача. Процедури естафетної передачі в UTRAN поділяються на три основні групи:

- *внутрішньомодова* (intra-mode);
- *міжмодова* (inter-mode);
- *міжсистемна* (inter-system).

Перша означає передачу МС від однієї БС до іншої, коли обидві вони працюють у форматі UTRAN із частотним дуплексом (FDD). При цьому розрізняють *м'яку передачу* (soft handover), тобто паралельний контакт МС із декількома БС із постійним заміщенням одних БС іншими на основі вимірів інтенсивностей їх сигналів, *більш м'яку передачу* (softer handover, у

межах стільника між секторами) і жорстку передачу, типовим прикладом якої є перемикання між БС, що працюють на різних частотах.

Міжмодова передача означає ситуацію, коли МС переходить із зони дії БС, яка працює у форматі частотного дуплекса (FDD), у зону оператора, що використовує часовий дуплекс UTRAN TDD.

Нарешті міжсистемна передача означає кооперування із системами другого покоління (надалі й з cdma2000), для того щоб один термінал мав можливість простого перемикання між ними з усіма наслідками стосовно розширення зони охоплення та свободи роумінгу.

5.3 Особливості радіоінтерфейса UMTS/TDD

Варіант UMTS з часовим дуплексом TDD передбачений для тих регіонів, у яких розділення частот у діапазоні 2 ГГц не дає достатньої свободи для організації частотного рознесення ліній "вниз" і "вверх". Міжнародним регламентом для UMTS/TDD відводяться так звані непарні ділянки спектра: 1900..1920 МГц, 2010...2025 МГц у Європі, 1850...1910 МГц, 1930...1990 МГц у США. Хоча фізичні рівні версій UMTS з часовим і частотним дуплексом цілком гармонізовані в тому, що стосується цифр: спектральних характеристик, діапазону швидкостей передачі, частоти проходження чипів, параметрів кадру і под., – філософія радіоінтерфейса TDD має мало спільного з тим, про що говорилося в попередньому розділі. Зупинимося лише на деяких специфічних аспектах побудови радіоінтерфейса TDD.

Почнемо з перерахування запозичень із варіанта FDD: частота проходження чипів розширювальних кодів – 3,84 Мчип/с; структура інформаційного потоку – кадри тривалістю 10 мс (38 400 чипів), розбиті на 15 слотів по 2560 чипів у кожному; канал синхронізації лінії "вниз" має двоступінчасту будову з використанням попереднього первинного синхрокоду та вторинного синхрокоду, модифікованого несуттєвим чином.

Однак на противагу FDD, розглянутий радіоінтерфейс не є системою з "чистим" кодовим розділенням: в обох напрямках розділення сигналів здійснюється на основі комбінації TDMA і CDMA. Для цього дані розділяються по слотах послідовних кадрів так, що БС передає дані, адресовані конкретній МС, лише в деяких певних слотах деяких певних кадрів. Послідовність всіх таких слотів і кадрів називається пачкою - *burst*. Конфігурація пачки періодично повторюється з кожним суперкадром, що охоплює 72 кадри. У кожному слоті, крім цього, використовуються каналізуючі коди у вигляді функцій Уолша, однак тільки до довжини 16. Таким чином, на частку кодового розділення припадає тільки 16 каналів, інша частина абонентської ємності реалізується індивідуальним призначенням слотів і кадрів, тобто часовим розділенням.

Часове дуплексування здійснюється за рахунок резервування частини слотів кадру за лінією "вниз", а інших – за лінією "вверх". Приклад на

рис. 5.7 показує послідовність кадрів, у якій i -й МС надані трійки слотів у парах суміжних кадрів, що повторюються з періодом 12, причому лінії "вниз" віддані перший, другий і третій слоти, а лінії "вверх" – восьмий, дев'ятий, десятий.

Як можна зрозуміти, у розглянутому варіанті радіоінтерфейса існують три ресурси керування швидкістю передачі в напрямку індивідуальної МС (і назад): число слотів у кадрі, виділене даному користувачеві, а також (як і у варіанті FDD) зміна коефіцієнта розширення (числа чипів на інформаційне посилення) і використання паралельних кодових каналів (мультикодова передача).

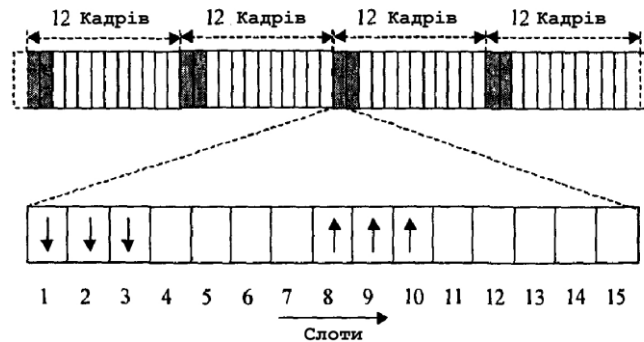


Рисунок 5.7 – Кадри та слоти, виділені i -й МС у лініях "вниз" і "вверх"

Іншою особливістю радіоінтерфейса TDD є квазісинхронна побудова лінії "вверх". БС постійно контролює затримку сигналу від МС, що посиляється у відповідь на запит БС, і передає МС команду на "випередження" (timing advance), для того щоб сигнали різних МС були по можливості синхронними на вході приймача БС. На даному етапі допустима похибка синхронізму сигналів МС встановлена в межах чотирьох тривалостей чипа. При подібних взаємних часових зсувах функції Уолша одного періоду втрачають ортогональність, і тому на частку кодового розділення припадає вже тільки 4 канали (число різних періодів функцій Уолша до 16). Однак є намір у майбутньому довести точність сполучення сигналів на вході приймача БС до частин тривалості чипа, що повністю зрівняє лінії "вверх" і "вниз" у плані можливостей застосування синхронного кодового розділення.

Запитання для самоперевірки

1. Наведіть процедури фізичного рівня UMTS.
2. Чим відрізняються загальні фізичні канали від виділених?
3. Наведіть дерево каналізуючих кодів.
4. Наведіть механізм утворення комплексного скремблюючого коду.
5. Охарактеризуйте групи процедур естафетної передачі у UTRAN.

6 СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ

Системи персонального супутникового зв'язку мають ряд переваг у порівнянні зі системами мобільного зв'язку. Наприклад, якщо користувач перебуває за межами зони обслуговування місцевих стільникових мереж, супутниковий зв'язок відіграє ключову роль, оскільки вона не має обмежень пов'язаних з конкретною місцевістю Землі. Однак у багатьох регіонах світу попит на послуги мобільного зв'язку може бути вдоволений тільки за допомогою супутникових систем. *Супутниковий зв'язок* (satellite communication) є перспективним видом зв'язку, що швидко розвивається, це обумовлено такими його перевагами, як

- можливість обслуговування великої кількості абонентів, віддалених на значні відстані та розташованих у будь-яких регіонах Землі;
- простота реконфігурації систем супутникового зв'язку (ССЗ) при зміні місць розташування абонентів;
- незалежність витрат при організації зв'язку від відстані;
- незначний вплив атмосфери та географічних особливостей місць установлення наземних станцій (НС) на стійкість зв'язку.

6.1 Класифікація систем супутникового зв'язку

Принцип дії систем супутникового зв'язку (ССЗ) оснований на використанні проміжного супутникового *ретранслятора* СР (retransmitter), через який забезпечується зв'язок між НС (рис. 6.1).

Залежно від призначення ССЗ зв'язуються пункти, що можуть бути розташовані на поверхні Землі, в атмосфері або космосі. У кожному із цих пунктів встановлюється звичайно приймально-передавальна зв'язкова радіостанція (одноканальна або багатоканальна), а на супутниках – СР, що приймають радіосигнали від одних абонентів і ретранслюють ці сигнали іншим абонентам. У найпростішому випадку ретрансляція зводиться до підсилення потужності вхідних сигналів і перенесення їх спектрів на інші несучі частоти. Однак у ряді ССЗ у СР виробляється більш складна обробка сигналів, щоб зменшити перехресні завади між сигналами від різних ССЗ і підвищити завадостійкість системи. У загальному випадку для забезпечення якісного зв'язку між всіма пунктами (абонентами) СР доводиться розміщати на декількох супутниках, що обертаються на різних орбітах.

ССЗ розрізняють за ступенем глобальності та універсальності обслуговування абонентів. Ступінь глобальності ССЗ характеризується належністю й розміром зони обслуговування, а універсальності ССЗ – набором категорій абонентів і числом видів надаваного зв'язку.

За належністю ССЗ підрозділяються на міжнародні, національні, корпоративні. За зоною обслуговування ССЗ діляться на глобальні, регіональні, зонові (рис. 6.2).

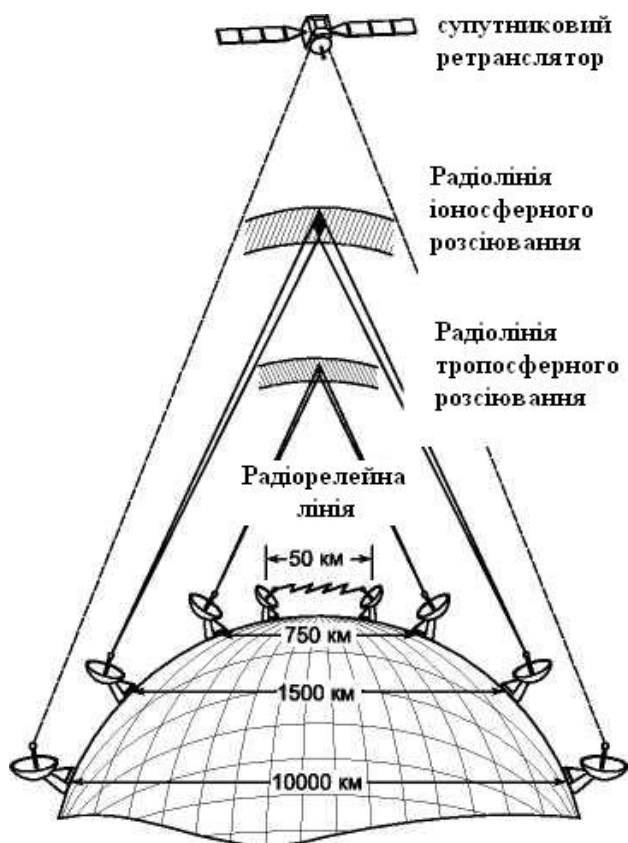


Рисунок 6.1 – Принцип дії систем супутникового зв'язку

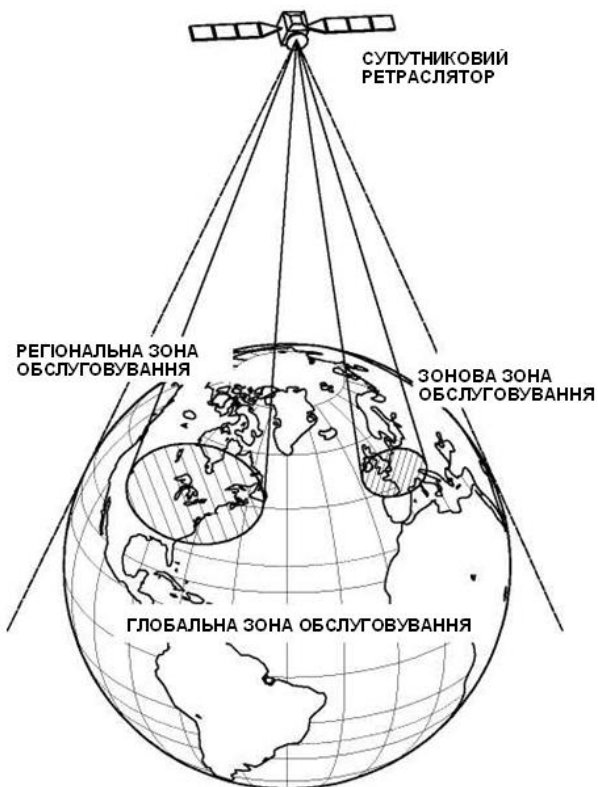


Рисунок 6.2 – Зони обслуговування ССЗ

6.2 Послуги, які надають системи супутникового зв'язку

У залежності від виду наданих послуг системи супутникового зв'язку можна розділити на три основних класи:

1. Системи пакетної передачі даних (доставки циркулярних повідомлень, автоматизованого збору даних про стан різних об'єктів, у тому числі транспортних засобів, і т. д.);
2. Системи радіотелефонного зв'язку;
3. Системи для визначення місця розташування (координат) споживачів.

Системи пакетної передачі даних призначені для передачі в цифровому вигляді будь-яких даних (телекських і факсимільних повідомлень, комп'ютерних даних та ін.) Швидкість пакетної передачі даних у системах супутникового зв'язку складає від одиниць до сотень кілобітів у секунду. У цих системах, як правило, відмовляються від безперервності обслуговування і не висувають жорстких вимог до оперативності доставки повідомлень. У такому режимі працює "електронна пошта" (інформація, що надійшла, запам'ятовується бортовим комп'ютером супутника і доставляється кореспондентові в заздалегідь визначений час доби).

При радіотелефонному зв'язку за допомогою супутників використовують цифрову передачу повідомлень, при цьому обов'язково повинні виконуватися загальноприйняті міжнародні стандарти. У таких системах затримка сигналу на трасі поширення не повинна перевищувати 0,3 с і переговори абонентів не повинні перериватися під час сеансу зв'язку. Обслуговування абонентів повинне бути безперервним і відбуватися в реальному масштабі часу. У цьому випадку при побудові радіотелефонної супутникової мережі необхідно враховувати, що:

1. Супутники повинні оснащуватися високоточною системою орієнтації для утримання променя їхньої антени в заданому напрямку;
2. Кількість супутників у системі повинна бути достатньою для забезпечення суцільного і безперервного покриття зони обслуговування;
3. Для забезпечення достатньої кількості каналів зв'язку повинні застосовувати багатопроменеві антенні системи, що працюють на високих частотах (вище 1,5 ГГц), що значно ускладнює конструкцію антен і космічних апаратів (КА);
4. Для забезпечення безперервності радіотелефонного зв'язку через супутник, оснащений багатопроменевими антенними системами, потрібна велика кількість вузлових (шлюзових) станції з дорогим комунікаційним обладнанням.

У багатьох випадках абонентові необхідно знати своє місце розташування (координати) на Землі. З цією метою застосовують апаратуру двох типів:

1. Стандартну навігаційну апаратуру GPS, що забезпечує дуже високу точність визначення координат абонента;

2. Спеціальну навігаційну апаратуру, яка за сигналами супутників персонального зв'язку і/або шлюзових станцій дозволяє визначати координати абонента, але з меншою точністю.

Використовуючи апаратуру другого типу, можна визначати координати абонента одним із таких способів:

1. За сигналами чотирьох супутників персонального зв'язку;
2. За сигналами шлюзових наземних станцій;
3. За сигналами супутників і шлюзових станцій.

У космічних системах, що вирішує задачі персонального зв'язку, використовуються супутники, що можуть знаходитися на різних орбітах.

6.3 Класифікація орбіт зв'язних космічних апаратів

Орбіти (orbit) космічних апаратів (КА) класифікуються: за формою, періодичності проходження КА над точками земної поверхні і нахилом.

За формою розрізняють такі типи орбіт:

1. Кругові – важко реалізувати на практиці, потребують часті корекції за допомогою бортових коригувальних двигунів КА;

2. Близькі до кругового. Це найбільш поширений тип орбіт у системах супутникового зв'язку. На таких орбітах висоти апогею (H_a) і перигею (H_p) розрізняються на декілька десятків кілометрів;

3. Еліптичні. H_a і H_p можуть значно розрізнятися (наприклад, $H_a = 38000 - 40000 \text{ км}$, $H_p = 400 - 500 \text{ км}$). Такі орбіти також широко застосовуються в системах супутникового зв'язку;

4. Геостаціонарні. Це – кругові екваторіальні орбіти з періодом обертання супутника, рівним періодові обертання Землі ($T \approx 23 \text{ г } 56 \text{ хв}$). На такій орбіті КА розташовується на висоті $H_a = H_p = 36000 \text{ км}$ і знаходиться постійно над певною точкою екватора Землі. Космічні апарати, що знаходяться на геостаціонарній орбіті, мають велику площу огляду Землі, що дозволяє з успіхом використовувати їх у системах персонального супутникового зв'язку;

5. Параболічні і гіперболічні. Застосовуються, як правило, при вивченні планет Сонячної системи.

За періодичністю проходження КА над точками земної поверхні розрізняють такі типи орбіт:

1. Синхронні. Вони, у свою чергу, підрозділяються на синхронні ізомаршрутні і синхронні квазіізомаршрутні. Ізомаршрутні орбіти характеризуються тим, що проекції орбіти КА на земну поверхню (траси) збігаються щодоби. Квазіізомаршрутні орбіти характеризуються тим, що проекції орбіти КА на земну поверхню збігаються один раз у кілька діб;

2. Несинхронні. Характеризуються тим, що траси, які відповідають будь-яким двом оборотам КА навколо Землі, не збігаються.

Під нахилом i орбіти розуміється кут між площинами екватора Землі і орбіти КА. Нахил відраховується від площини екватора до площини орбіти

проти годинникової стрілки. Він може змінюватися від 0 до 180° . В залежності від нахилу розрізняють наступні типи орбіт:

1. Прямі ($i < 90^\circ$)
2. Зворотні ($i > 90^\circ$)
3. Полярні ($i = 90^\circ$)

4. Екваторіальні ($i = 0^\circ$ або $i = 180^\circ$). При $i = 0^\circ$ КА рухається у напрямку обертання Землі із заходу на схід, при $i = 180^\circ$ КА рухається проти напрямку обертання Землі зі сходу на захід. Значенню $i = 0^\circ$ відповідають геостаціонарні (кругові екваторіальні) орбіти.

Висота орбіт КА вибирається на основі аналізу багатьох факторів, включаючи енергетичні характеристики радіоліній, затримку при поширенні радіохвиль, близькість до орбіти радіаційних поясів Ван Аллена, розміри і розташування територій, що обслуговуються. Крім того, на висоту орбіти впливають спосіб організації зв'язку і вимоги щодо забезпечення необхідного значення кута місця КА.

Аналізуючи низкоорбітальні групування різних систем, можна помітити, що висоти кругових орбіт КА більшості з цих групувань знаходяться в діапазоні від 700 до 1500 км. Це обумовлено такими факторами:

1. На орбітах, висота яких не перевищує 700 км, щільність атмосфери досить висока, що викликає зменшення ексцентриситету і поступове зменшення висоти апогею, що приводить до підвищеної витрати палива і збільшення частоти маневрів для підтримки заданої орбіти

2. На висотах вище 1500 км розташовується перший радіаційний пояс Ван Аллена, у якому неможлива робота електронної бортової апаратури.

Середньовисотні орбіти (5000–15000 км) знаходяться між першим і другим радіаційним поясом Ван Аллена. У системах, що використовують розташовані на таких орбітах КА, затримка поширення сигналів через супутник-ретранслятор складає приблизно 130 мс, що практично непомітно для людського вуха і, отже, дозволяє використовувати такі КА для радіотелефонного зв'язку.

Геостаціонарні космічні системи з висотою орбіт супутників, рівною приблизно 36 000 км, мають дві важливі переваги:

1. Супутники завжди знаходяться над певною точкою Землі;
2. Система, що складається з трьох геостаціонарних супутників, забезпечує огляд практично всієї земної поверхні.

Однак орбітальним групуванням, що складаються з геостаціонарних супутників, властивий один великий недолік: великий час поширення радіосигналів, – що приводить до затримок передачі сигналів при радіотелефонному зв'язку.

Системи, що використовують КА з висотою орбіти 700-1500 км, мають кращі енергетичні характеристики радіоліній, ніж системи з висотою орбіт КА, рівною приблизно 10 000 км, але поступаються їм у тривалості активного існування КА.

Слід також зазначити, що КА, який знаходиться на низькій орбіті, по-

падає в зону прямої видимості абонента лише на 8-12 хвилин. Виходить, для забезпечення безперервного зв'язку будь-якого абонента буде потрібно багато КА, які послідовно повинні забезпечувати безперервний зв'язок. Зі збільшенням висоти орбіти КА зона прямої видимості супутника-ретранслятора і абонента збільшується, що приводить до зменшення кількості супутників, необхідних для забезпечення безперервного зв'язку. Таким чином, зі збільшенням висоти орбіти збільшуються час і розміри зони обслуговування і, отже, потрібна менша кількість супутників для охоплення однієї і тієї ж території.

6.4 Структура систем персонального супутникового зв'язку

До складу системи персонального супутникового зв'язку СПСЗ, структура якої наведена на рис. 6.3, незалежно від їхнього призначення входять такі компоненти, як:

1. Космічна станція (КС), що являє собою супутниковий ретранслятор (СР), який включає в себе приймально-передавальний пристрій, антени для прийому та передачі радіосигналів, а також ряд систем забезпечення енергопостачання, орієнтації антен і сонячних батарей, корекції положення КА на орбіті і т. д.;

2. Абонентські НС, що забезпечують дуплексний обмін інформацією;

3. Центральна (координуюча) НС (ЦНС), що забезпечує контроль за режимом роботи СР і дотриманням НС важливих для роботи ССЗ параметрів (потужності випромінювання, несучої частоти, виду поляризації, характеристик модулюючого сигналу і т. д.);

4. Центральна НС системи керування й контролю КА (ЦУС), що забезпечує керування всіма технічними засобами, розміщеними на КА, і контроль за їхнім станом;

5. Сполучні наземні лінії (СНЛ), що забезпечують підключення НС до джерел і споживачів переданої інформації;

6. Центр керування (ЦУП) ССЗ, що являє орган, який здійснює керівництво експлуатацією ССЗ і її розвитком.

Для СПСС виділені діапазони частот, наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Діапазони частот, виділені для супутникових систем

Діапазон	Смуга частот, ГГц
L	1,452-1,50 і 1,61 -1,71
S	1,93-2,70
C	3,40-5,25 і 5,725-7,075
Ku	10,70-12,75 і 12,75-14,80
Ka	14,40-26,50 і 27,00-50,20
K	84,00-86,00

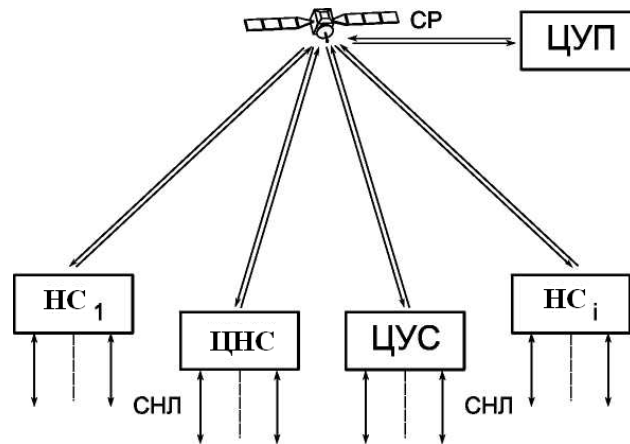


Рисунок 6.3 – Склад системи персонального супутникового зв'язку

6.5 Система Iridium

Проект низькоорбітальної супутникової системи зв'язку Iridium оснований на широкому міжнародному співробітництві. У розробленому проекті спочатку передбачалося використовувати 77 супутників. Саме цій кількості супутників проект зобов'язаний своєю назвою: 77-й елемент у таблиці Менделєєва – іридій. Правда пізніше з ряду причин було вирішено зменшити кількість супутників в орбітальному групуванні до 66, але назва проекту залишилася попередньою. В орбітальному групуванні для забезпечення мінімальної відстані між сусідніми супутниками вибрана оптимальна різниця кутів $(27)^\circ$ між площинами їхніх орбіт (рис. 6.4).



Рисунок 6.4 – Система Iridium: 66 супутників на шести квазіполярних орбітах

6.5.1 Основні параметри та характеристики системи Iridium

Основні параметри орбітального групування:

1. Орбіти – квазіполярні з нахилом $i = 86,4^\circ$
2. Кількість орбіт – 6
3. Кількість супутників на одній орбіті – 11
4. Кутова відстань між супутниками, що знаходяться на одній орбіті, – $32,7^\circ$
5. Висота орбіт – 780 км
6. Період обертання супутників навколо Землі – 100 хв.

Відмінними рисами ССЗ Iridium є використання міжсупутникових каналів зв'язку і супутникових ретрансляторів (СР) зі складною обробкою сигналів. При цьому в ССЗ Iridium забезпечується можливість з'єднання абонентів системи без участі наземних ліній зв'язку. Однак для досягнення незалежності системи Iridium від наземних мереж доводиться використовувати досить складні та дорогі КА. Принципи керування зв'язком у ССЗ Iridium використовуються ті ж самі, що і у стільникових системах радіозв'язку.

Однак на відміну від наземних стільникових систем, де базові станції зв'язку встановлюються стаціонарно, а абоненти рухомі відносно базової станції, у системі Iridium рухомою є сама базова станція, встановлена на КА.

Зв'язок з рухомих абонентом здійснюється в діапазоні рухомої супутникової служби, а зі шлюзовими станціями, що здійснюють сполучення з комутованою мережею загального користування, – у діапазоні фіксованої супутникової служби.

6.5.2 Послуги системи Iridium

Система Iridium призначена для глобального рухомого персонального зв'язку за принципом "кожен – кожному" на основі міжсупутникового зв'язку. Вона забезпечує такі види зв'язку і послуг:

1. Дуплексний радіотелефонний зв'язок;
2. Факсимільний зв'язок;
3. Передача даних;
4. Зв'язок між абонентами, що мають персональні супутникові термінали;
5. Зв'язок абонентів загальної телефонної мережі з користувачами персональних супутникових терміналів;
6. Передача сигналів оповіщення на пейджер;
7. Визначення місця розташування абонентів.

Для надання перерахованих видів послуг компанія Motorola пропонує різні малогабаритні супутникові телефони і мобільні персональні термінали (масою до 2,5 кг). Кожен користувачський термінал реєструється в національній шлюзовій станції, де йому присвоюється кодовий номер і визначається первинне територіальне розміщення.

До складу кожного супутникового телефону входить змінний або постійно встановлюваний елемент – модуль ідентифікації абонента (SIM-карта), що містить індивідуальний номер телефону та іншу інформацію. Абонент системи Iridium має єдиний номер телефону, доступний у будь-якому куточку світу, де дозволено користуватися послугами цієї системи.

Користувачами універсального сервісного пакета послуг можуть стати як абоненти мережі Iridium, так і абоненти наземних стільникових мереж (підписуючи на такий пакет послуг, вони зберігають свій номер стільникового телефону). Практично цей вид послуг розширює для останніх зону дії системи стільникового зв'язку. Міський сервісний пакет системи Iridium призначений для користувачів, що мають потребу у використанні наземного рухомого зв'язку між стільниковими мережами різних стандартів.

Швидкість передачі мовних повідомлень – 4800 біт/с.

Поряд з телефонним зв'язком Iridium здатний забезпечити передачу даних і факсимільних повідомлень між будь-якими точками планети. Для цього абонентам системи досить обладнати мовний термінал модемом. Швидкість передачі даних – 7400 біт/с.

Крім того система забезпечує передачу повідомлень про координати абонента, обумовлених як засобами мовного зв'язку, так і спеціальними абонентськими пристроями.

Пропускна здатність системи Iridium складе 56000 дуплексних телефонних каналів.

6.5.3 Діапазони і смуги частот радіоліній

Будь-який супутник орбітального групування системи Iridium формує 48 променів випромінювання, утворюючи кожним променем на Землі стільник розміром 640 км. Орбітальне групування формує на поверхні Землі приблизно 2150 стільників при використанні 48 променів кожного супутника.

У сукупності 48 променів створюють підсупутникову зону розміром приблизно 4500 км. Все орбітальне групування формує квазісуцільну підсупутникову зону, що покриває всю поверхню Землі. Формування підсупутникової зони здійснюється за допомогою розташованих на кожному супутнику шести антенних фазованих ґраток. Кожна ґратка формує вісім променів.

Завдяки застосуванню багатопромених антен і стільникової структури зони обслуговування, робочі частоти в системі Iridium використовуються багаторазово. При цьому в суміжних стільниках використовуються різні частоти, а в кожному восьмому стільнику можливе повторення частот. У результаті частоти діапазону 1616,0–1626,5 МГц використовуються в системі більш 150 разів.

У табл. 6.2 подані L- і K_a-діапазони частот радіоліній системи Iridium.

Таблиця 6.2 – Діапазони частот радіоліній системи Iridium

Діапазон	Радіолінія	Діапазон частот	Смуга частот каналу зв'язку
L	"Абонент–КА"	1616,0-1625,5 МГц	126 кГц
	"КА–абонент"	1616,0-1626,5 МГц	280 кГц
Ka	"КА-шлюзова станція"	19,6 ГГц	100 МГц
	"Шлюзова станція-КА"	29,1-29,3 ГГц	100 МГц
	Міжспутниковий зв'язок "КА–КА"	23,18-23,38 ГГц	200 МГц

У радіолініях "Абонент–КА" і "КА–абонент" застосовується часове розділення каналів. Формат багатостанційного доступу поєднує часове розділення каналів для кожного стільника і частотне розділення для суміжних стільників (FDMA). За допомогою фазової маніпуляції FM-4 здійснюється кодування інформації, що забезпечує стиснення мовної інформації в цифровому вигляді. Інформація про стиснення, а також сигнали циклічної і тактової синхронізації передаються по каналу керування, для чого в радіолінії "КА–абонент" задіяні 4 радіоканали. Коефіцієнт стиснення інформації (2,2/1) дозволяє забезпечити передачу в радіолінії "КА–абонент" 55 мовних каналів на 25 несучих частотах. Імовірність помилки на біт не перевищує: 10^{-3} – при передачі радіотелефонної інформації; 10^{-6} – при передачі цифрових даних.

Кожен супутник орбітального групування має радіолінії зв'язку з двома сусідніми супутниками, що знаходяться в одній орбітальній площині з ним, і двома супутниками в сусідніх (ліворуч і праворуч) орбітальних площинах

Для підтримки міжсупутникового зв'язку на кожному супутнику є чотири щілинні антенні ґратки з коефіцієнтом підсилення 36 дБ. Точність керування діаграмою спрямованості кожної антени складає $\pm 5^\circ$. Використовується смуга частот шириною 200 МГц у діапазоні 23,18–23,38 ГГц. Для виключення взаємних завад у міжсупутникових каналах зв'язку смуга частот шириною 200 МГц розбита на 8 окремих частотних смуг, що утворюють окремі канали зв'язку. Швидкість передачі інформації в кожному каналі – 25 Мбіт/с. Метод модуляції і кодування інформації – такі ж, як у радіолінії "КА-абонент". Імовірність помилки не вища 10^{-6} на 1 біт інформації. Кожен канал міжсупутникової лінії зв'язку підтримує 600 телефонних каналів без стиснення.

6.5.4 Склад системи Iridium

Система Iridium, структура якої наведена на рис. 6.5, містить чотири сегменти:

- космічний сегмент;

- сегмент керування, що складається із центра керування системою (ЦУС), який містить обчислювальний центр (ОЦ) і станцію управління (СУ);
- шлюзові наземні станції (ШС), що здійснюють швидкий і ефективний зв'язок ССЗ із телефонними мережами загального користування (ТФЗК);
- абонентські термінали.

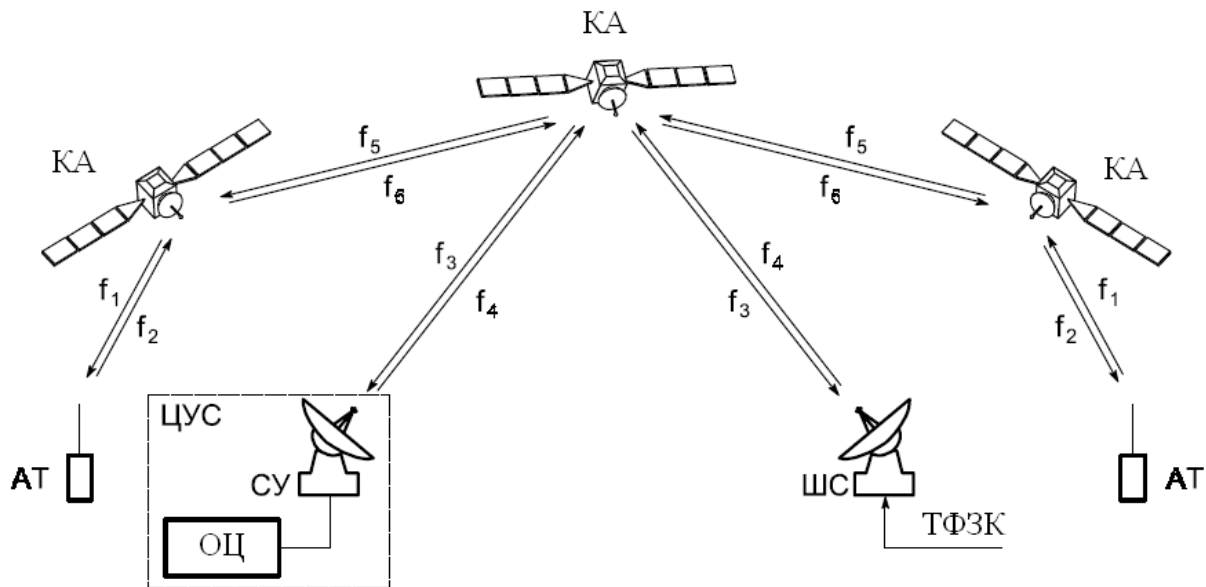


Рисунок 6.5 – Склад системи Iridium

Кожний супутник має вагу до 450 кг і містить по три СР, призначених для реалізації користувацького (абонентського) каналу, каналу керування і сполучення та каналу міжсупутникового зв'язку.

Кожний з КА має по три комплекти антен:

- основного призначення;
- перехресного міжсупутникового зв'язку;
- каналу керування.

Анени основного призначення служать для зв'язку з абонентськими пристроями. У комплект антен основного призначення супутника включені сім антен з фазованими ґратками, кожна з яких містить набір локальних модулів прийому й передачі. Шість ідентичних антен утворюють тіло супутника у формі шестикутного циліндра, а сьома, розташовувана в його нижній частині, приймає сигнали за одиничним променем та випромінює сигнали від супутника.

У системі Iridium повинні використовуватися як мінімум дві станції керування, оскільки сегмент керування повинен організувати комунікаційні канали зі «східним» супутником до перерви зв'язку з «західним» супутником.

З метою забезпечення нормального функціонування системи в різних

ситуаціях – при невдалій роботі або аваріях земних станцій і навіть при катастрофічних відмовах будь-яких ланок земного або космічного сегмента, скажемо, через порушення деяких міжсупутникових каналів мережі сузір'я, відсутності з якихось причин супутника на своїй «робочій» орбіті і т. д., у ССЗ Iridium передбачене використання біля десяти станцій керування, розосереджених по різних континентах.

Шлюзова станція складається з трьох ідентичних комплексів прийому і передачі. Кожен комплекс має швидкодіючий комп'ютер (у якому зберігається банк даних про персональні термінали) і комутаційне устаткування для зв'язку з телефонною мережею загального користування. У роботі постійно знаходяться два комплекси прийому і передачі, що по черзі підтримують зв'язок із супутниками, які знаходяться в зоні видимості. Третій комплекс прийому і передачі – резервний. При необхідності він може замінити 1-й або 2-й комплекс.

Абонентські термінали (АТ) являють собою:

- 1) портативні й мобільні засоби;
- 2) телефонні будки з сонячними батареями;
- 3) спеціалізоване авіаційне й морське користувацьке устаткування;
- 4) алфавітно-цифрові радіовикличні пристрої, за допомогою яких система Iridium буде забезпечувати своїх користувачів принаймні однією з таких послуг: телефонний і факсимільний зв'язок, передача цифрових даних, передача інформації про місцезнаходження.

Для підтримки сучасних засобів передачі даних і факсимільних повідомлень в абонентських пристроях системи Iridium передбачені порти для підключення комп'ютера або факс-апарата.

6.6 Система Globalstar

Globalstar – це глобальна цифрова система персонального зв'язку, основана на використанні низькоорбітальних супутників. До складу орбітального групування системи Globalstar входять 48 низькоорбітальних супутників-ретрансляторів, розміщених на восьми кругових орбітах (по шість супутників на кожній). Висота орбіт над поверхнею Землі складає 1414 км. Нахил орбіт ($\beta = 52^\circ$) вибрано так, щоб забезпечити максимальну частоту обслуговування абонентів у середніх широтах. Полярні області (вище 70° півн. ш. і 70° півд. ш.) космічним сегментом цієї системи не обслуговуються (рис. 6.6).

Кожен супутник має три системи стабілізації, що складаються з пристроїв орієнтації по Землі і Сонцю, а також лазерних гіроскопів. Термін активного існування кожного супутника не менш 7,5 років.

У системі Globalstar не передбачені міжсупутникові зв'язки, однак для підвищення надійності зв'язку вона розрахована на постійне дворазове покриття земної поверхні, що дозволяє:

1. Забезпечити безперервний зв'язок при переході абонента з зони дії

одного променя в зону дії іншого променя того самого супутника та із зони видимості одного супутника в зону видимості іншого

2. Значно підвищити надійність зв'язку з рухомими абонентами завдяки усуненню ефекту затемнення приймальної антени терміналу користувача складками рельєфу місцевості за рахунок когерентного додавання сигналів декількох супутників, а також сигналів, відбитих від різних перешкод на земній поверхні



Рисунок 6.6 Система Globalstar – 48 супутників на 8 орбітах

6.6.1 Послуги системи Globalstar

Послуги, що надаються компанією супутникового зв'язку GlobalStar:

1. Мобільна і стаціонарна голосова телефонія;
2. Асинхронна передача даних;
3. Мобільний інтернет (номер дозвона 123);
4. Обмеження за типом зв'язку;
5. Міжнародний роумінг;
6. Визначення місця розташування об'єкта;
7. Визначник номера (CLIP);
8. Антивизначник номера (CLIR);
9. Переадресація;
10. Очікування виклику + утримання виклику;
11. Повне (добровільне) блокування всіх дзвінків;
12. Супутникова пошта;
13. Web-Інтерфейс;
14. FTP сервіс;
15. Факс-мейл (вхідний);
16. Факс-мейл (вихідний);
17. Автоматизована служба сервісу абонента;
18. Послуга поповнення особового рахунка абонента за

допомогою карток експрес-оплати.

6.6.2 Діапазони частот радіоліній та канали зв'язку

Для зв'язку із Земними станціями (фідерні лінії зв'язку) на супутнику встановлюються по дві рупорні антени (для прийому і передачі), які працюють в С-діапазоні частот (5090-5250 для лінії «вверх» Земля-ШСЗ і 60875-7055 МГц для лінії «вниз» ШСЗ-Земля). Цей діапазон за рахунок використання правої і лівої поляризації буде використовуватися двічі.

Для ліній зв'язку ШСЗ з мобільними користувачами передбачена експлуатація частот L-діапазону (1610-1626,5 МГц) для лінії «вверх» абонент-ШСЗ і S-діапазону (2483,5-2500 МГц) для лінії «вниз» ШСЗ-абонент.

Основні технічні характеристики щодо використання частотного ресурсу системою Globalstar наведено в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Діапазони частот радіоліній системи GlobalStar

Напрямок передачі	Лінія “вверх”	Лінія “вниз”
Абонентська лінія, МГц	1610–1626,5	2483,5–2500
Фідерна лінія, МГц	5090–5250	6875–7075

Загальна смуга частот шириною 16,5 МГц, виділена для зв'язку у L- і S-діапазонах, розділена на 13 піддіапазонів шириною 1,25 МГц, в кожному із яких виконується кодове ущільнення сигналів від декількох (порядку 50) абонентів. Для цього сигнал абоненту перетворюється в широкосмуговий сигнал (1,25 МГц) [7].

Антени L- і S-діапазонів являють собою активні фазовані антенні решітки (ФАР) з 16 променями. Кожний промінь має свою зону обслуговування на поверхні Землі, площею приблизно 2,9 млн. км². Сукупність променів утворює зону обслуговування ШСЗ, яка близька за формою до кола діаметром 5760 км. Приймальна антена (L-діапазон) складається з 61 елемента. Передавальна ФАР (S-діапазон) утворюється 91 підсилювальним елементом потужністю 4 Вт кожний. Загальна потужність в S-діапазоні досягає 400 Вт і може плавно розподілятися між променями.

В системі Globalstar використовується декілька видів каналів. По каналу пілот-сигналу передається послідовність типу «всі нулі». Вона використовується для контролю рівня сигналу в радіоканалі. Всі станції сполучення використовують один і той же короткий код, але з різним зсувом відносно єдиної шкали часу. Зсув коду однозначно ідентифікує станцію сполучення, супутник і промінь. По каналу синхронізації передається потік даних зі швидкістю 1200 біт/с. В цьому потоці міститься поточний час, код ідентифікації станції сполучення, розклад каналів пейджингового зв'язку. По каналу персонального виклику передається технічна інформація необхідна для встановлення з'єднання (частота, код ідентифікації користувача, номер викликуваного абонента).

Прямий інформаційний канал використовується для передачі інформаційних повідомлень абонентам мережі Globalstar. В каналі використову-

ється алгоритм перекодування інформаційних потоків зі швидкістю 2,4...9,6 кбіт/с у вихідний потік 19,2 кбіт/с. Всі абоненти системи використовують одну і ту ж саму послідовність, але з різним (унікальним для кожного користувача) часовим зсувом.

Канал доступу використовується для передачі запитів у вигляді пакетів тривалістю 60 мс. В каналі використовуються протоколи доступу типу АЛОХА. Пакет складається з преамбули та інформаційної частини. Преамбула являє собою елемент псевдовипадкової послідовності. Швидкість передачі в каналі доступу - 4,8 кбіт/с.

По зворотному інформаційному каналу абонент передає повідомлення на станцію сполучення. В каналі використовується блокове перемежування пакетів символів тривалістю 20 мс.

Перехід абонента із зони в зону здійснюється плавно без переривання зв'язку і погіршення якості прийому інформації. Це дозволяє вирішити проблему затінення антени рельєфом місцевості і підвищити надійність зв'язку. Механізм зміни обслуговування досить простий. В будь-якому з 16-ти променів кожного супутнику передається свій пілот-сигнал, призначений для оперативного контролю рівня прийманого сигналу, як тільки відбувається зниження рівня пілот-сигналу в даному промені, абонентський термінал автоматично перемикається на двоканальний режим роботи. В цьому режимі забезпечується одночасний прийом сигналів від двох різних променів або від різних супутників. Двоканальний режим роботи радіолінії триває до тих пір, поки не надійде команда на відключення будь-якого променя. Після цього обмін інформацією буде відбуватися тільки через один промінь з найкращою якістю. Таким чином відбувається плавне перемикавання абонента із однієї зони в іншу без переривання зв'язку і погіршення якості.

Однією із головних особливостей системи Globalstar є використання шумоподібних і широкосмугових сигналів (ШСС) і метод багатостанційного доступу з кодовим розділенням (CDMA). Це дозволяє вирішити ряд проблем, зокрема проблему багатократного використання смуги частот і підвищення пропускної спроможності системи.

При застосуванні ШСС відбиті від сторонніх об'єктів сигнали складаються з основним сигналом за допомогою багатоканальних приймачів, що значно підвищує завадозахищеність системи. Це також дозволяє здійснювати так званий м'який перехід абонента із зони дії одного променя у зону дії іншого без втрати зв'язку.

Тут, на відміну від систем з часовим або частотним розділенням каналів, при переходах зв'язок абонента підтримується двома променями доти, поки рівень сигналу одного з них не стане нижче певного значення. Такий алгоритм дозволяє ймовірність втрати зв'язку.

Пропускна здатність кожного каналу дуже висока завдяки кодовому розділенню сигналів і змінній швидкості передачі цифрового потоку (1200–9699 біт/с), що дозволяє забезпечити передачу сигналів інформації в

паузах мови.

6.6.3 Склад системи Globalstar

Космічний сегмент системи Globalstar складається з 48 супутників на низькій (1410 км) орбіті. Мала висота орбіти дозволяє використовувати носимі (ручні) абонентські термінали на зразок апаратів стільникового зв'язку. Супутники розміщені у восьми орбітальних площинах, по 6 рівнорозміщених супутників в одній площині.

Штучний супутник Globalstar являє собою ретранслятор з перетворенням частот, який здійснює прийом сигналів в межах зони обслуговування, їх перетворення і передачу на земну станцію. Всі операції із оброблення викликів, їх комутація, перетворення сигналів і розділення каналів проводиться на Землі, де реалізація даних функцій обходиться значно дешевше, апаратура доступна для технічного обслуговування і може з часом бути замінена. Відсутність обробки сигналів на борту космічного апарата, а також відсутність в системі Globalstar ліній міжсупутникового зв'язку (на відміну від Iridium) дозволяє виконувати космічні апарати простіше і надійніше.

На супутнику Globalstar передбачена триступенева система стабілізації. Вага штучного супутника становить 450 кг. Сонячні батареї мають потужність 1100 Вт. Потужність передавальної системи штучного супутника Землі приблизно рівна 1 кВт. За рахунок оперативного регулювання споживаної потужності бортового ретранслятора в кожному каналі відповідно до умов прийому мінімізуються енергетичні ресурси ШСЗ.

Супутник системи Globalstar розроблено таким чином, щоб забезпечити мінімальну вартість супутника і його запуску. Телеметрична і керуюча інформація, як і комунікаційний трафік, передаються в С-діапазоні. Сигнали телеметрії і керування поступають на звичайну орбітальну комунікаційну антену С-діапазону. Крім неї є також антена телеметрії/керування на стороні супутника, протилежній Землі. Ця антена працює, коли супутник неправильно зорієнтований або в інших нештатних ситуаціях. Це забезпечує передачу телеметричної і прийом керуючої інформації в будь-якому випадку.

Бортова апаратура зв'язку містить засоби захисту каналів зв'язку С-діапазону від несанкціонованого доступу. Це запобігає безкоштовному використанню ресурсів супутникового зв'язку.

Земний сегмент системи складається із декількох станцій, увімкнених в загальні комутуючі станції наземних мереж зв'язку і абонентських станцій. Станція має чотири параболічні антени діаметром 5,5 метрів з програмним наведенням: три антени супроводжують три супутники в зоні обслуговування, а четверта готується супроводжувати новий супутник, який має з'явитися на горизонті. Вартість такої станції складає приблизно 5,5 млн. доларів.

Сегмент користувача Globalstar може включати один з трьох основних типів терміналу: портативні (аналогічні стільниковим), мобільні (встанов-

люються в автомобілях) і стаціонарні (телефонні апарати, таксофони), додаток Г. Послідовний порт введення/виведення даних дозволяє підключати до терміналу користувача комп'ютер, факсимільний апарат або інші зовнішні пристрої. Передбачене адаптивне керування потужністю передавача терміналу.

Портативні мобільні апарати обладнані ненаправленими антенами і можуть функціонувати також в наземній стільниковій мережі стандарту GSM, AMPS або IS-95. Фірмою QUALCOMM пропонується трирежимні портативні мобільні термінали (Globalstar/AMPS/IS-95), дворежимні (Globalstar/GSM) і однорежимні (Globalstar). Термінали Globalstar, які працюють більше, ніж в одному режимі, повинні спочатку перевіряти можливість роботи в наземній мережі персонального радіозв'язку і лише після неможливості встановлення зв'язку буде виконуватись встановлення зв'язку через супутник. При переході таких терміналів від режиму роботи в стільниковій мережі в режим роботи в системі Globalstar автоматичне переключення не передбачене. Якщо абонент покинув зону дії стільникової мережі, то зв'язок буде перервано і для його відновлення необхідно знову встановити з'єднання, але уже супутникової системи зв'язку Globalstar.

Всі ручні і мобільні термінали, розроблені для системи Globalstar мають модулі ідентифікації абонента (Subscriber Identification Module – SIM). Ручний термінал користувача виглядає як звичайний стільниковий телефон. На телефонній трубці розміщені індикатори, які показують режим роботи. Вага портативного терміналу – близько 350 г, розміри 190×60×30 мм, а його потужність не перевищує 0,6 Вт. Заряду акумулятора при роботі в системі Globalstar буде вистачати на 8 годин очікування і на 1 годину розмови. У режимі наземної стільникової системи зв'язку тривалість його роботи збільшиться до 12 годин очікування і до 2 годин розмови (або навіть більше).

Мобільні термінали відрізняються від портативних додатковим підсиленням потужності і зовнішньою антеною. Потужність мобільного терміналу не перевищує 3 Вт.

Стаціонарні апарати Globalstar надають послуги зв'язку у віддалених районах, де немає ні стільникових систем зв'язку, ні наземних комунікацій. Такі термінали призначені для роботи тільки в супутникових системах зв'язку Globalstar. Вони обладнані підсилювачем і зовнішньою антеною з підсиленням +7 дБ і мають еквівалентну ізотропну-випромінювану потужність 3,2 Вт. Для портативних і мобільних абонентних терміналів передбачений випуск пристроїв, призначених як для роботи в системі Globalstar, так і для роботи в системі Globalstar/стільникові мережі:

- Globalstar/AMPS/CDMA - трьимодові термінали
- Globalstar/GSM - двомодові термінали
- Globalstar - одномодові термінали.

6.7 Система Inmarsat

Міжнародна ССЗ Inmarsat існує з 1982 р. і об'єднує 67 країн. Спочатку система призначалася для забезпечення глобального телефонного та телеграфного зв'язку, передачі даних з метою підвищення безпеки мореплавання й ефективності керування морськими суднами.

ССЗ Inmarsat являє собою систему геостаціонарних штучних супутників Землі, які є ретрансляторами (СР) повідомлень між судами, обладнаними спеціальними станціями супутникового зв'язку (СС) і спеціальними береговими станціями (БС) і мережами телефонного й телеграфного зв'язку. У ССЗ Inmarsat судові (СС) і берегові (БС) станції відповідають наземним (НС) і центральним наземним (ЦЗС) станціям. ССЗ Inmarsat – повністю автоматизована система, що забезпечує високі показники надійності, оперативності і якості зв'язку.

На першому етапі розвитку ССЗ Inmarsat з 1982 по 1990 рр. використовувалися СР, встановлені на КА першого покоління «Inmarsat-1», послуги зв'язку забезпечувалися в «Стандарті-А» з використанням методів цифрової і аналогової обробки інформації.

На другому етапі розвитку ССЗ Inmarsat, починаючи з 1991 р. після виведення другого покоління геостаціонарних КА «Inmarsat-2», використовуються СР, що має більший енергетичний потенціал, також розширено перелік надаваних послуг зв'язку за рахунок введення таких стандартів системи, як «В», «С», «Аеро», «М».

Бурхливий ріст категорій і числа абонентів, що потребують послуг систем зв'язку з рухомими об'єктами, потребував подальшої перебудови ССЗ Inmarsat з метою підвищення її пропускної здатності й широкого використання малогабаритних мобільних терміналів. Ці тенденції були реалізовані в рамках третього етапу розвитку ССЗ Inmarsat, коли після запуску в 1994-1995 рр. чотирьох геостаціонарних КА «Inmarsat-3», у СР були додатково збільшені енергетичний потенціал і пропускна здатність системи.

6.7.1 Основні параметри та характеристики системи Inmarsat

У систематизованому вигляді основні характеристики ССЗ Inmarsat-A та Inmarsat-B наведені в табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Основні характеристики ССЗ Inmarsat-A та Inmarsat-B

Стандарти ССЗ Inmarsat	Inmarsat-A	Inmarsat-B
1	2	3
Зона обслуговування	глобальна (75° півд. ш.- 75° півн. ш.)	глобальна (75° півд. ш.— 75° півн. ш.)

Об'єкти розміщення СС (НС)	судна	судна
Продовження таблиці 6.4		
1	2	3
Послуги зв'язку	мова, факс, телекс, передача даних	мова, факс, телекс, передача даних
Частотний діапазон СС - на прийом, МГц - на передачу, МГц	1535...1543,5 1636... 1645	1530...1548 1626... 1647,5
Тип антени НС і її розміри	дзеркало, діаметр (0,8...1,2) м	дзеркало, діаметр 0,8 м
Ефективно-випромінювана потужність НС, дБВт	36	33
Добротність НС, дБ/К	-4	-4
Частотне рознесення каналів, кГц	50	20
Швидкість передачі інформації при - телефонному зв'язку, біт/с - факсимільному зв'язку, біт/с - передачі даних, біт/с	— 24000...96000 9600, 54000...64000	16000 2400...9600 16000, 54000...64000
Кодування	БЧХ у каналі сиг- налізації	згортковий код з відносною швидкіс- тю 1/2 і 3/4
Вид модуляції в каналі передачі мови/даних	ЧМ/ФМ-2	ОФМ
Метод доступу	FDMA/ОКН	FDMA /ОКН
Загальна маса комплекту СС (НС) - морський варіант, кг - портативний варіант, кг	81...121 32...48	110 30...75
Споживана СС (НС) потужність при - передачі, Вт - прийманні, Вт	450 110	105 28
Напруга живлення СС (НС) - від мережі змінного струму, В - від мережі постійного струму, В	220±10% —	220±10% 10...34
Габарити СС (НС),	161×1430×1430 (морський варіант)	70×60×30 (морський варіант)

Продовження таблиці 6.4

1	2	3
Кліматичні умови функціонування СС (НС) - температура навколишнього середовища, - вологість	від -40°C до $+55^{\circ}\text{C}$ 95% при 40°C	від -25°C до $+55^{\circ}\text{C}$ 95% при 40°C
Вартість за послуги зв'язку - телефон, - телекс, - факс, - передача даних	(6...10,2) дол/хв (3,2...3,6) дол/хв (6...10,2) дол/хв (6.. .10,2) дол/хв	(5...8) дол/хв (3,2...3,6) дол/хв (5...8) дол/хв (5...8) дол/хв

6.7.2 Склад системи Inmarsat

Система Inmarsat обслуговує три великі області – Атлантичний океанський район (AOP), Індійський океанський район (IOP) і Тихоокеанський район (TOP), над якими перебуває по одному діючому і по два запасних КА. У кожному океанському районі може перебувати будь-яке число СС і декілька БС, що утворюють мережу, причому одна із БС виконує функції координуючої станції мережі (КСС). Структурна схема однієї з мереж Inmarsat показана на рис. 6.7.

У системі Inmarsat для автоматизації процесів зв'язку по телефонних і телеграфних каналах трьом районам (мережам), всім БС і СС присвоєні номери-ідентифікатори.

У ССЗ « Inmarsat-A» на першому етапі використовувалися супутники трьох типів: Марі-Сат, Марекс та Інтелсат MCS.

Кожен КА має по два СР, один із яких приймає сигнали від СС у діапазоні 1,6 ГГц і передає БС у діапазоні 4 ГГц, інший приймає сигнали від БС у діапазоні 6 ГГц і передає СС у діапазоні 1,5 ГГц,

Керування КА здійснюється із центрів, обладнаних командно-вимірювальними комплексами (КВК), які регулюють роботу всіх підсистем супутників, коректують при необхідності місцезнаходження супутників на орбіті, їхню орієнтацію в просторі.

СС розраховані на цілодобову роботу. Антена кожної СС у період роботи автоматично утримується в напрямку на один із супутників СС Inmarsat, і станції безупинно ведуть автоматичний почерговий прийом. У випадку надходження від кожної із БС мережі виклику СС автоматично настроюється на зазначений у виклику канал і виробляє сигнал судовому операторові. Передане з берега повідомлення може бути прийнято і без участі оператора. Працююча СС завжди готова до передачі запиту на встановлення із берегом двостороннього зв'язку.

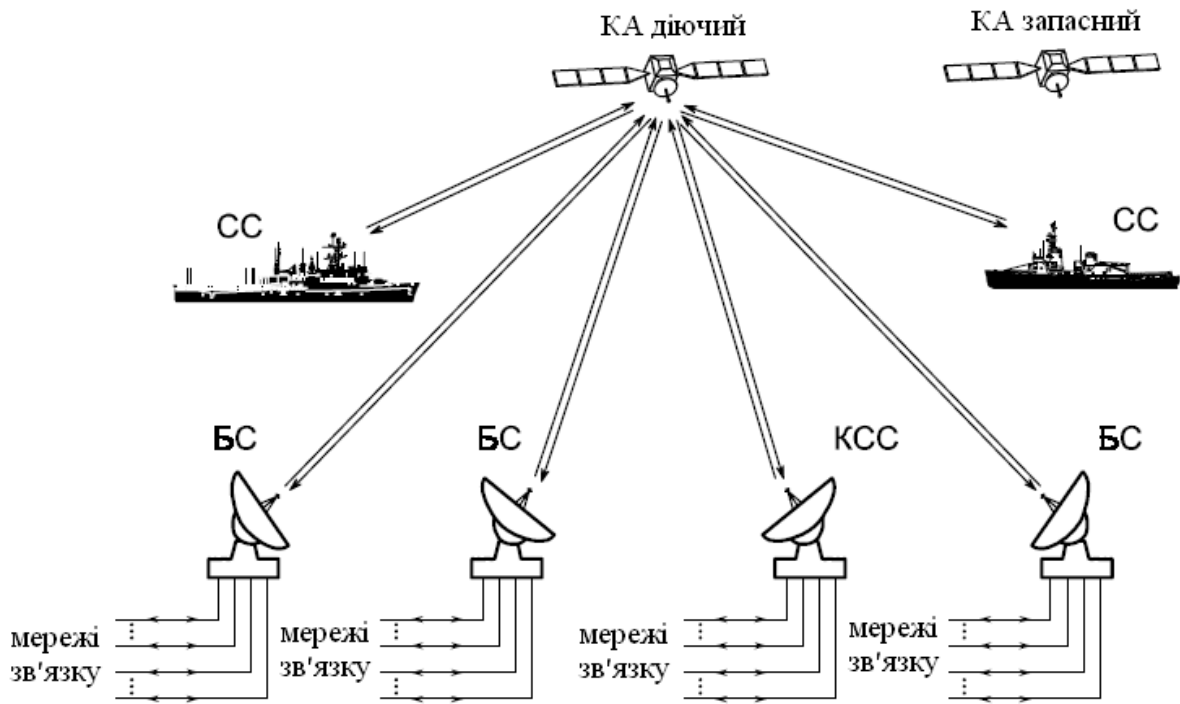


Рисунок 6.7 – Склад системи Inmarsat

БС слугують проміжною ланкою між КА ССЗ Inmarsat і береговими абонентами, з якими вони можуть з'єднуватися по міжнародним і національним телефонним і телеграфним мережам, а також мережам передачі даних і інтегрального обслуговування. БС повинні задовольняти спеціальні вимоги ССЗ Inmarsat, згідно з якими їхніми функціями є:

- прийом і обробка повідомлень сигналізації, переданих СС при встановленні зв'язку (запитів);
- формування та передача повідомлень сигналізації СС (викликів);
- комутація підключених до БС телефонних і телеграфних каналів;
- ретрансляція телефонних і телеграфних повідомлень у напрямку судно-берег і назад;
- ведення списку СС, допущених до системи Inmarsat;
- облік часу заняття каналів і оформлення рахунків на оплату за надані послуги судовим і береговим абонентам.

Зв'язок між СС, що перебуває в одному з океанських районів, і будь-яким береговим абонентом, може бути організований через кожен БС даної мережі.

Якщо БС є координуючою, то вона виконує ряд додаткових функцій, до яких відносяться: ретрансляція повідомлень сигналізації, якими обмінюються СС і БС при встановленні зв'язку; спостереження за зайнятістю телефонних каналів мережі та їх оперативний розподіл за запитами судових і берегових абонентів; облік СС, що ведуть зв'язок у поточний час; вимірювання частот, рівнів та інших параметрів сигналів, випромінюваних КА; запис переданих повідомлень сигналізації для подальшого їх ана-

лізу; регулювання потужності випромінювання КА.

Експлуатаційний контрольний центр (ЕКЦ) виконує такі функції: контроль характеристик космічного сегмента; реалізацію планів введення в експлуатацію нових технічних засобів і планів розвитку системи; випробування СС і БС, що вводяться у експлуатацію; передачу всім СС, БС і КСС інформації про стан системи.

6.7.3 Канали і радіолінії системи Inmarsat

У ССЗ Inmarsat-A є чотири типи радіоліній: фідерні лінії: БС-КА; КА-БС; користувацькі (абонентські) канали СС-КА; КА-СС.

Доступ СС до СР здійснюється в режимі частотного розділення (FDMA) з виділенням каналу на одну несучу (ОКН) за запитом через берегову станцію (БС) у центрі керування (координації) мережею.

У системі передбачено чотири зони обслуговування, які утворені з врахуванням реального трафіка регіонів планети. Це атлантична (західна та східна), тихоокеанська зони та зона Індійського океану. У кожній зоні перебуває по одній КСС, а загальна кількість БС становить більше 20.

У системі Inmarsat є канали таких типів: двосторонні канали сигналізації, телеграфні канали, телефонні канали, службові телеграфні та телефонні канали, канали для передачі пілот-сигналів.

Канали сигналізації призначені для передачі коротких формалізованих повідомлень – запитувальних, що посиляються СС і викличних, що посиляються БС і КСС. За кожною БС і КСС закріплено по одному каналу сигналізації, причому канал, закріплений за КСС, є загальним для всієї системи і на ньому безупинно ведуть черговий прийом всі БС і СС.

За кожною БС закріплено по 22 телеграфних канали, які розподіляються нею за запитами СС або берегових абонентів. Телеграфні канали можуть використовуватися як у дуплексному, так і в симплексному режимах у напрямку берег – судно.

Телефонні канали, число яких залежить від типу КА, що працює в даній мережі, розподіляються КСС за запитами БС або СС. Телефонні канали також можуть використовуватися як у дуплексному, так і в симплексному режимах у напрямку берег–судно.

Службові телеграфні та телефонні канали слугують для обміну службовою інформацією між БС, КСС і ЕКЦ. У кожній мережі є по одному двосторонньому каналі для передачі пілот-сигналів, що слугують для визначення дрейфу частот обох СР КА. За вимірною частотою прийнятих пілот-сигналів БС зміщують частоти своїх передавачів і приймачів таким чином, щоб компенсувати дрейфи частот в КА.

Для встановлення зв'язку з ініціативи судна СС посиляє по каналу сигналізації на БС запит, що містить тип необхідного каналу та інші дані, необхідні для встановлення зв'язку. Ці дані вводяться оператором у СС безпосередньо перед встановленням зв'язку або завчасно.

Якщо запитується телексивний канал, то викликувана БС знаходить ві-

льний канал і посилає КСС повідомлення сигналізації із вказуванням номера виділеного каналу. Це повідомлення КСС ретранслює по загальному каналу сигналізації викличної СС. Приймавши його, СС налаштовує передавач і приймач на виділений канал і встановлює із запитуваною БС з'єднання. Далі БС з'єднує СС із мережею «Телекс», через яку СС викликає потрібного їй берегового абонента й веде з ним зв'язок за діючими у даній мережі правилами. Всі описані вище процеси відбуваються автоматично.

Якщо судно запитує телефонний канал, то запит надходить у КСС, що виділяє вільний телефонний канал і транслює його номер по загальному каналу сигналізації запитувальної СС і запитуваної БС. Обидві станції, одержавши це повідомлення сигналізації, автоматично налаштовують свої передавачі й приймачі на виділений телефонний канал і встановлюють по ньому з'єднання. Після цього СС підключається до телефонної мережі, через яку викликає берегового абонента й веде з ним зв'язок за діючими у даній мережі правилами.

Аналогічним образом здійснюється з'єднання із СС із ініціативи берегового абонента. Виклик судна на вимогу БС виробляється по загальному каналу сигналізації, на якому всі СС ведуть автоматичний черговий прийом. Симплексні телефонні та телеграфні повідомлення можуть бути передані на судна, яким вони адресовані, під час відсутності суднового оператора. Кожна СС системи Inmarsat може бути з'єднана з будь-яким береговим абонентом мережі «Телекс» або міжнародної телефонної мережі через будь-яку БС даного океанського району. Передбачена також можливість зв'язку між двома судами.

Для роботи кожної із трьох мереж Inmarsat-A виділені певні діапазони частот.

Напрямок передачі	Частота, МГц
СС–КА	1636,5...1645
КА–СС	1535...1543,5
БС–КА	6417,5...6425
КА–БС	4192,5...4200,5

У межах цих діапазонів для організації каналів всіх типів на кожній ділянці радіоліній БС–КА, КА–СС, СС–КА і КА–БС можуть використовуватися 339 частот, номінальні значення яких кратні 25 кГц. Кожному номінальному значенню f у системі Inmarsat присвоєний номер N . Між ними встановлене таке співвідношення:

$$f = a + 0,025N, N = 1, \dots, 339,$$

де число a залежить від ділянки каналу, для якого визначається частота. Для ділянок СС–СР і СР–СС воно має відповідно значення $a_1 = 1636,5$ і $a_2 = 1535,0$. Для ділянок БС–СР і СР–БС a залежить від типу використовуваного супутника.

Частина частот, використовуваних системою Inmarsat, постійно закріплена за БС. Для каналів сигналізації й телеграфних каналів напрямку

БС–СС всім КСС постійно виділена загальна пара частот з номером 110, позначувана TDM0, а кожній БС – своя пара частот, позначувана TDM1, TDM2, ..., TDM7. Організація багатостанційного доступу до цих каналів основана на використанні методу часового ущільнення (TDMA) сигналів.

Для каналів сигналізації напрямку СС–БС використовуються загальні для всієї системи дві пари частот з номерами 84 і 258, позначувані RA-1 і RA-2. Доступ до цих каналів вільний, тобто повідомлення сигналізації можуть передаватися по них у довільні моменти часу. Частота з номером 258 слугує для дублювання передач з метою підвищення надійності сигналізації.

Для телеграфних каналів напрямку СС–БС за кожною БС закріплена одна пара частот – TDMA1, TDMA2, ..., TDMA7. Метод багатостанційного доступу до каналів – паралельний з часовим розділенням сигналів.

Постійно закріпленими є також частоти для передачі пілот-сигналу та службового зв'язку між БС, що мають відповідно номери 101 і 108 і позначення AFC і OW.

Телефонні канали та канали для високошвидкісної передачі даних організовані за принципом «один канал - на одну несучу частоту» (ОКН). Номінали частот для їхньої роботи призначаються оперативно КСС при кожному надходженні запиту на встановлення зв'язку. Номери призначуваних частот беруться з таким розрахунком, щоб рознесення між частотами було не менш 50 кГц для телефонного зв'язку і не менш 150 кГц для високошвидкісної передачі даних, що необхідно для виключення взаємних завад.

У загальних каналах зв'язку типу КСС–СС, КСС–БС, БС–СС передача інформації здійснюється на фіксованих частотах двопозиційною фазовою маніпуляцією ФМ-2 з каналною швидкістю $R = 1200 \text{ а}^3\text{д} / \tilde{n}$ із використанням часового ущільнення і кодування на основі використання блокового коду БЧХ (63, 57).

Запитання для самоперевірки

1. Послуги, які надають системи супутникового зв'язку.
2. Класифікація орбіт космічних апаратів.
3. Структура систем супутникового зв'язку.
4. Основні параметри системи Iridium.
5. Діапазони і смуги частот радіоліній системи Iridium.
6. Склад системи Globalstar.
7. Сигнали системи Globalstar.
8. Абонентські супутникові термінали системи Globalstar.
9. Склад системи Inmarsat.
10. Канали системи Inmarsat.

7 ТРАНКІНГОВІ СИСТЕМИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

7.1 Основні положення

Під терміном "транкінг" розуміється метод рівного доступу абонентів до виділених каналів з автоматичним їх розподілом між абонентами. Цей принцип використовується в телефонних мережах, звідкіля в радіозв'язок і прийшло слово "trunk" (пучок, тобто пучок рівнодоступних каналів).

Транкінг – це одна з концепцій розподілу каналів у системах мобільного радіозв'язку. Цей метод керування розподілом каналів забезпечує автоматичне виділення користувачеві вільного каналу, що скорочує час чекання і забезпечує велику пропускну здатність системи зв'язку при одній і тій же кількості радіоканалів. Концепція транкінга основана на припущенні, що кожен користувач системи використовує радіоканал протягом невеликих періодів часу, і більшість користувачів не використовують систему одночасно.

В усьому світі основними клієнтами даної послуги виступають державні муніципальні структури, зацікавлені в оперативному керуванні тими чи іншими об'єктами в реальному масштабі часу з метою координації дій щодо усунення критичних ситуацій.

На ринку мобільного радіозв'язку транкінгові системи займають нішу між "звичайними" радіостанціями і стільниковими телефонами. З технічної точки зору сучасні транкінгові системи близькі до стільникових, а основні відмінності полягають у їхніх функціональних призначеннях.

У залежності від призначення транкінгові системи можна розділити на дві категорії:

1. Комерційні (загального користування) – PAMR;
2. Спеціального застосування (професійні) – PMR.

Комерційні системи PAMR відрізняються постійною високою пропускну здатністю на територіях, де є платоспроможний попит на послуги рухомого радіозв'язку.

Професійні системи PMR повинні задовольняти вимоги щодо забезпечення в особливі періоди (аварійна ситуація, заходи сил громадської безпеки, велика технологічна операція і т. д.) одночасної роботи великої кількості абонентів.

Сучасні транкінгові системи забезпечують груповий, індивідуальний радіозв'язок з різними пріоритетами, аварійний і циркулярний виклик як для всієї системи, так і для окремих її частин, криптографічне перетворення голосових повідомлень і передачу даних. Час встановлення зв'язку в транкінгових мережах зв'язку складає менше 0,3 с, що на порядок менше, ніж у стільникових. Це особливо важливо для аварійних служб і силових структур.

Незважаючи на розмаїтість стандартів транкінгового зв'язку, алгорит-

ми їх функціонування в основному подібні. Для абонента практично немає ніякої різниці, у якому стандарті здійснюється зв'язок. Якщо йому потрібно подзвонити, то він просто натискає клавішу на своїй радіостанції, що відповідає зняттю трубки звичайного телефону. Коли ж радіостанція знаходиться в режимі чекання, його приймальний пристрій постійний сканує (переглядає) або всі канали системи, або тільки керуючі. Для виклику відповідного абонента усіма базовими станціями транкінгової системи зв'язку по керуючих каналах передається сигнал виклику. Радіостанція викликуваного абонента при одержанні цього сигналу відповідає по одному з вільних каналів керування. Базові станції, що прийняли відповідний сигнал, передають інформацію про його параметри в центр комутації, що, у свою чергу, переключує розмову на ту базову станцію, де зафіксований максимальний рівень сигналу радіостанції викликуваного абонента.

Під час набору номера радіостанція займає один з вільних каналів, рівень сигналу базової станції в якому в даний момент максимальний. В міру видалення абонента від базової станції або в зв'язку з погіршенням умов поширення радіохвиль рівень сигналу зменшується, що веде до погіршення якості зв'язку. Поліпшення якості зв'язку досягається шляхом автоматичного переключення абонента на інший канал. Це відбувається в такий спосіб. Спеціальна процедура, називана передачею керування викликом або естафетною передачею (handover або handoff), дозволяє переключити розмову на вільний канал іншої базової станції, у зоні дії якої виявився в цей час абонент. Аналогічні дії починаються при зниженні якості зв'язку через вплив завад або при виникненні несправностей комутаційного устаткування. Для контролю таких ситуацій базова станція оснащена спеціальним приймачем, що періодично вимірює рівень сигналу радіостанції абонента, що розмовляє, і порівнює його з припустимою межею. Якщо рівень сигналу менший цієї межі, то інформація про це автоматично передається в центр комутації по службовому каналі зв'язку. Центр комутації видає на найближчі до нього базові станції команду виміряти рівень сигналу радіостанції абонента. Після одержання інформації від базових станцій про рівень цього сигналу центр комутації переключує радіостанцію на ту з них, де рівень сигналу виявився найбільшим. Це відбувається так швидко, що абонент зовсім не помічає цих переключень.

Іноді виникає ситуація, коли потік заявок на обслуговування, що надходить від абонентів транкінгової мережі, перевищує кількість каналів, які є на всіх близько розташованих базових станціях. Це відбувається тоді, коли всі канали станцій зайняті обслуговуванням абонентів (немає жодного вільного) і надходить чергова заявка на обслуговування від рухомого абонента. У цьому випадку як тимчасова міра (до звільнення одного з каналів) використовується принцип естафетної передачі усередині осередку. При цьому відбувається почергове переключення каналів у межах однієї і тієї ж базової станції для забезпечення зв'язком всіх абонентів.

7.2 Класифікація транкінгових систем радіозв'язку

Транкінгові системи зв'язку можна поділити за такими параметрами:

1. Спосіб передачі голосових повідомлень;
2. Організація доступу до системи;
3. Спосіб надання (утримання) каналу;
4. Конфігурація радіомережі;
5. Спосіб організації радіоканалу;
6. Призначення;
7. Кількість абонентів;
8. Застосовувані протоколи.

За способом передачі голосових повідомлень системи транкінгового зв'язку поділяються на:

1. Аналогові;
2. Цифрові.

В аналогових системах мовні повідомлення передаються в аналогово-му режимі (подібно до звичайного телефонного зв'язку), а службова інформація – у цифровому. У цифрових системах і мовна, і службова інформація передаються в цифровому вигляді.

За організацією доступу транкінгові системи зв'язку підрозділяються на:

1. Системи без каналу керування (SmarTrunk II, AI-Trunk, Z-Trunk);
2. Системи з розподіленим каналом керування (LTR, MultiNet);
3. Системи з виділеним каналом керування (SmartNet, EDACS, MPT 1327, iDEN, ASTRO, TETRA, APCO 25).

Транкінгові системи без каналу керування – це найбільш прості транкінгові системи. У таких системах радіостанція при виклику сама шукає незайнятий канал і займає його. У черговому режимі радіостанція безупинно перебирає (сканує) усі канали системи, перевіряючи, чи не викликають її на одному з них. У цих системах забезпечується повна незалежність каналів базових станцій один від одного, оскільки їхнє об'єднання в загальну мережу відбувається на рівні абонентської радіостанції. Це обумовлює високу надійність транкінгових систем без каналу керування.

Система працює в такий спосіб. При виклику абонента радіостанція послідовно сканує всі ретранслятори системи і, знайшовши вільний, передає сигнал заняття каналу. Даний сигнал містить індивідуальні номери викликувальної і викликуваної радіостанції. Ретранслятор перевіряє права викликувальної радіостанції і виконує з'єднання з кореспондентом або ігнорує виклик. Якщо викликувана радіостанція відгукується, ретранслятор організовує сеанс зв'язку. Середній час з'єднання складає кілька секунд і визначається кількістю каналів у системі і швидкістю їхнього сканування.

Скануючим транкінговим системам властивий ряд принципів недоліків. Так, з ростом кількості каналів у такій системі швидко зростає тривалість встановлення з'єднання, що не може бути менше тривалості по-

вного циклу сканування. Реально до цього додається ще й тривалість пошуку вільного каналу викликувальною радіостанцією. Крім того, у цих системах ускладнена реалізація багатьох сучасних вимог, у тому числі багатозоновість, гнучка і надійна система пріоритетів, постановлення на чергу при зайнятості системи або викликуваного абонента і т. д.

Ці системи ідеально підходять як невелика (1-8 каналів, до 200 абонентів) однозонава система зв'язку з радіусом дії 30-50 км, до якої висуваються мінімальні вимоги. Кількість абонентів у транкінгових системах без каналу керування може досягати до 1000. Середній час з'єднання складає кілька секунд. Основними характеристиками таких систем є простота, надійність і невисока вартість базового устаткування.

У транкінгових системах з розподіленим каналом керування керуюча інформація передається безупинно по всіх каналах, у тому числі і по зайнятих. Це досягається використанням для її передачі частот нижче 300 Гц. Кожен канал є керуючим для радіостанцій, закріплених за ним. У черговому режимі радіостанція прослуховує свій керуючий канал.

Службова інформація про стан системи, у тому числі і про вільні канали, постійно передається ретрансляторами (у тому числі і зайнятими для переговорів) за допомогою низькошвидкісного сигналу в підтональній частині спектра. Базова станція безупинно передає номер вільного каналу, який радіостанція може використовувати для передачі. Якщо ж на будь-якому каналі починається передача, адресована одній з радіостанцій, то інформація про це передається на її керуючому каналі, у результаті чого ця радіостанція переключасться на канал, де відбувається виклик. Встановлення з'єднання відбувається настільки швидко, що воно здійснюється щораз при включенні передавача станції, тобто, в паузах розмови канал не зайнятий.

Якщо канал вільний, то базова станція передає дані про стан системи через кожні 10–15 с, щоб всі закріплені за цим каналом радіостанції мали обновлену інформацію. Канал утримується тільки на час однієї передачі, що дозволяє використовувати паузи в розмові іншими абонентами. При такій організації керування радіостанціями відпадає необхідність у спеціальному каналі, і всі ретранслятори обслуговують мовний трафік. Якщо зайняті всі канали, то абонентська радіостанція сповіщає про це при спробі почати сеанс зв'язку.

При виході з ладу будь-якого каналу в системі відбувається відмовлення всіх радіостанцій, для яких він є керуючим. Крім того, у таких системах зв'язку швидкість передачі керуючої інформації невисока. Передача інформації на частотах нижче 300 Гц одночасно з мовою робить такі системи досить критичними до точності регулювання.

До даного класу систем відносяться аналогові системи стандарту LTR, що працюють у діапазоні частот 450 і 800/900 МГц, із кроком 25 кГц.

Транкінгові системи з виділеним каналом керування є найбільш досконалими. У системах такого типу передбачений спеціальний керуючий

канал, що здійснює обробку усіх викликів, які надходять від абонентських радіостанцій. Для аналогових систем мова йде про виділений частотний канал, для цифрових з часовим розділенням каналів – про виділений часовий слот.

У таких системах радіостанція безупинно прослуховує керуючий канал найближчої до неї базової станції. При включенні живлення радіостанція передає через керуючий канал інформацію про реєстрації в системі. З даного моменту центральний контролер визначає права даної радіостанції і знає про її місцезнаходження в системі. При виклику інформація від радіостанції передається через керуючий канал у центральний контролер, який, знаючи про місцезнаходження необхідного абонента, виділяє голосові канали для переговорів і здійснює з'єднання. Відбувається це в такий спосіб. Базова станція передає інформацію про це по керуючому каналі, викликувана радіостанція підтверджує прийом виклику, після чого вона виділяє один з розмовних каналів для з'єднання та інформує про це по керуючому каналі всі радіостанції, що беруть участь у з'єднанні. Після цього останні переключаються на зазначений канал і залишаються на ньому до закінчення з'єднання.

У той час, коли керуючий канал вільний, радіостанції можуть передавати туди свої запити на встановлення з'єднання. Деякі типи викликів (наприклад, передача коротких пакетів даних між радіостанціями) можуть здійснюватися взагалі без заняття розмовного каналу. У залежності від режиму роботи системи розмовний канал надається або на час сеансу зв'язку, або на час однієї передачі.

При призначенні на певний час сеансу зв'язку канал звільняється за сигналом "відбій", але також у будь-якому випадку, після закінчення чітко встановленої тривалості сеансу зв'язку, що змінюється системою в залежності від часу доби, завантаження й інших критеріїв.

У деяких системах при завантаженні, близькому до граничного, канал керування переключається на обслуговування мовного трафіка і блокує чергу викликів.

Наявність центрального контролера дозволяє централізовано керувати системою (з одного операторського місця) та полегшує збір інформації і багато чого іншого.

До систем з виділеним цифровим каналом керування відноситься відкрита багатозонава система стандарту EDACS (Enhanced Digital Access Communications).

За способом утримання каналу зв'язку транкінгові системи підрозділяються на системи:

1. З утриманням каналу на весь сеанс переговорів (Message Trunking);
2. З утриманням каналу на час однієї передачі (Transmission Trunking).

У першому випадку в мережі забезпечується постійний канал зв'язку з абонентом протягом усього сеансу (устаткування стандартів SmartTrunk II і MPT1327). Такий спосіб називається *транкінгом повідомлень* (message

trunking).

В другому випадку в мережі канал зв'язку перепризначається під час сеансу (EDACS, TETRA). Такий спосіб називається *транкінг передачі* (transmission trunking) і реалізується тільки в напівдуплексному режимі. При його використанні канал звільняється майже відразу ж після закінчення роботи передавача абонента; під час наступного включення займається будь-який інший вільний канал, виділюваний базовою станцією. Плата за високу ефективність даного способу – збільшення затримки при високому завантаженні мережі, і як наслідок фрагментарність і роздробленість розмови.

За конфігурацією радіомережі транкінгові системи поділяються на:

1. Однозонові (односайтові) системи;
2. Багатозонові (багатосайтові) системи.

Однозонова система (рис. 7.1) призначена для забезпечення зв'язку в необхідній зоні. Така система має одну базову станцію, до складу якої входять ретранслятор, пристрій об'єднання радіосигналів, антени, комутатор, пристрій керування вузлами станції і обробки викликів, інтерфейсна апаратура для зв'язку із зовнішніми мережами. Невід'ємними частинами системи є термінал технічного обслуговування і експлуатації, диспетчерський пульт і абонентське устаткування. Радіус зони обслуговування залежить головним чином від висоти розміщення антен базової станції.

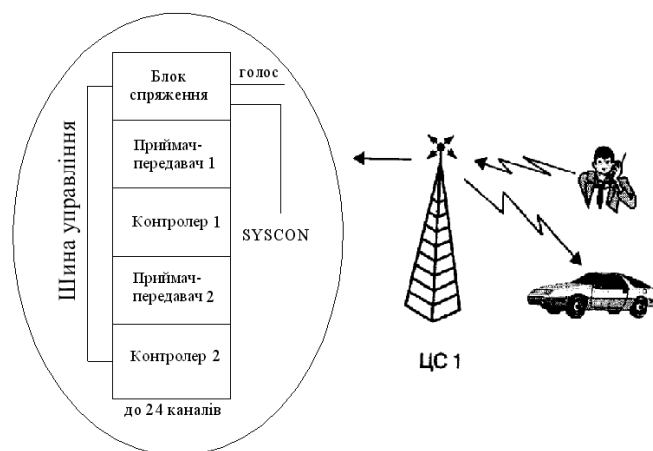


Рисунок 7.1 – Однозонова транкінгова система

Коли абоненти знаходяться в межах зони дії ретранслятора, вони можуть зв'язатися один з одним. Чим вище над землею встановлена антена ретранслятора, тим більша зона дії радіозв'язку. У залежності від висоти підйому центральної антени (і від рельєфу місцевості) радіус зони дії системи може досягати 10 км і більше. Невеликі однозонові системи можуть забезпечити хорошу якість радіозв'язку на обмеженій географічній площі, такій як фабрика, завод, малий населений пункт або невелика виробнича площадка. Як додатковий сервіс системи даного типу можуть бути укомплектовані телефонним інтерфейсом, що дозволить абонентам виходити в

телефонну мережу.

Незважаючи на значну вартість устаткування, однозонова транкінгова мережа має дуже просту конфігурацію, оскільки пристрій прийому і передачі лише один. Для створення такої мережі, крім основного устаткування, потрібно лише невелике приміщення для операторів мережі, відповідне устаткування і декілька міських телефонних ліній.

Типовим прикладом однозонової системи є система SmarTrunk.

Для розширення зони охоплення однозонової системи дуже часто застосовують рознесений прийом, коли крім основного потужного ретранслятора, що утворює зону обслуговування, до системи підключають декілька додаткових приймачів, рознесених по території. Даний метод застосовується при використанні малопотужних портативних радіостанцій для одержання хорошої якості радіозв'язку по всій території. Приймачі можуть бути встановлені у віддалених районах або будинках, що знаходяться поза певною зоною прийому системи. Також у систему додається компаратор сигналу, що вибирає найкращий сигнал від усіх приймачів і направляє його на ретранслятор.

Система будується за модульним принципом – до ретранслятора кожного каналу підключається один контролер. На одній базовій станції може бути до 24 каналів. Керуючим може бути або один з каналів, або всі канали по черзі через певний інтервал часу (визначається первинними установками).

При створенні багатозонової транкінгової мережі (рис. 7.2) використовують той же принцип побудови, що і у радіотелефонній стільниковій мережі. Стільниковий принцип побудови систем зв'язку забезпечує високу надійність прийому сигналів на території, що обслуговується, і дозволяє розширювати зону обслуговування за рахунок раціонального розміщення нових пристроїв прийому і передачі.

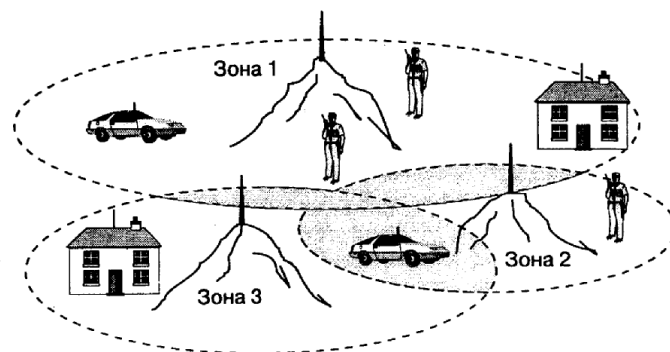


Рисунок 7.2 – Багатозонова транкінгова система

Розділити територію, що обслуговується, на комірки (стільники) можна двома способами: або основаним на вимірюванні статистичних характеристик поширення сигналів у системах зв'язку, або основаним на вимірюванні або розрахунку параметрів поширення сигналу для конкретного району.

При реалізації першого способу вся територія, що обслуговується, розділяється на комірки і за допомогою закону статистичної радіофізики визначаються їхні припустимі розміри і відстані до інших комірок, у межах яких виконуються умови припустимого взаємного впливу.

Для оптимального, тобто без перекриття або пропусків ділянок, поділу території на стільники підходять тільки три геометричні фігури: трикутник, квадрат і шестикутник. Кращим є шестикутник, тому що якщо антену з круговою діаграмою спрямованості установити в його центрі, то буде забезпечений доступ майже до всіх ділянок комірки.

При реалізації другого способу ретельно вимірюють або розраховують параметри системи для визначення мінімального числа базових станцій, що забезпечують задовільне обслуговування абонентів по всій території, визначають оптимальне місце розташування базової станції з урахуванням рельєфу місцевості, розглядають можливість використання спрямованих антен, пасивних ретрансляторів і суміжних центральних станцій у момент пікового навантаження і т. д.

Основною проблемою при побудові багатозонової мережі є взаємний вплив (інтерференція) сигналів сусідніх радіопередавальних пристроїв. Щоб усунути цей ефект, для передачі повідомлень застосовується синхронне мовлення або повторне використання частот.

Системи синхронного мовлення забезпечують велику зону охоплення радіозв'язком за рахунок декількох приймально-передавальних ретрансляторів, що працюють на одній частоті. Зони дії ретрансляторів системи синхронного мовлення звичайно перекриваються, утворюючи одну велику зону, де користувачі мають стійкий радіозв'язок незалежно від того, де вони не знаходилися. Системи даного типу можуть забезпечити радіозв'язком велике місто, область або невелику державу. Основні переваги цих систем – використання однієї частоти для всієї системи і відсутність необхідності переключення каналів на радіостанціях при переміщенні між комірками. Однак є й один великий недолік – необхідність синхронізації частот передавачів для виключення інтерференційних спотворень у зонах перекриття ретрансляторів, а це досить дорога задача.

За методикою багатозонової транкінгової системи будуються міські і регіональні мережі. У даних мережах присутнє поняття умовного "роумінгу", тобто автоматичного супроводу абонента при його пересуванні з однієї зони в іншу із забезпеченням безперервного зв'язку.

Структура мережі і місця розташування базових станцій найчастіше визначаються наявністю ліній зв'язку між зонами. Лінія зв'язку, як правило, орендована, може бути обладнана мідним або оптичним кабелем, радіорелейною лінією або просто пучком каналів у мережі іншого оператора. Лінія зв'язку однієї базової станції повинна підключатися до телефонної лінії, а інші базові станції повинні мати телефонний комутатор. З таких систем широко поширені системи на основі протоколів MPT1327, LTR, EDACS, DIMETRA, TETRA.

У транкінгових системах канали радіозв'язку можуть бути організовані за одним з трьох способів:

1. Симплексний;
2. Напівдуплексний (двочастотний симплекс);
3. Дуплексний.

Режим зв'язку при симплексному радіоканалі є найбільш простим – радіостанції всіх абонентів працюють на одній частоті. Абоненти чують один одного і можуть відповісти практично миттєво. Основними перевагами даного методу є простота організації зв'язку і низька вартість абонентської радіостанції. Недоліком є необхідність роботи в якомусь одному режимі ("прийом" або "передача").

Дальність дії такого режиму зв'язку:

- в умовах міста до 5 км із портативної радіостанцією;
- в умовах міста до 12 км із мобільної (автомобільної) радіостанції.

Для збільшення дальності такого зв'язку необхідно використовувати симплексний ретранслятор, що працює на даній частоті. У цьому випадку до базової станції підключається симплексор – пристрій, що дозволяє в цифровому вигляді запам'ятовувати мовну інформацію.

Півдуплексний (двочастотний симплексний) режим зв'язку застосовується для організації мереж радіозв'язку на великих площах. Суть даного режиму полягає в тому, що радіостанція передає на одній частоті, а приймає на іншій частоті. Таке рознесення частот дозволяє використовувати ретранслятори для прийому сигналу від радіостанції, його підсилення і передачу на іншій частоті. В абонентських радіостанціях програмуються дві частоти: F1 (передавальна) і F2 (приймальна), ці ж частоти встановлюються в ретрансляторі, тільки F2 – передавальна, а F1 – приймальна.

У дуплексному режимі зв'язку також рознесені приймальна і передавальна частоти, але в цьому випадку прийом і передача здійснюються одночасно. Дуплексний режим висуває більш високі вимоги до абонентського устаткування, оскільки радіостанція одночасно працює на прийом і передачу. У даному випадку більш тверді вимоги висуваються до акумулятора, тому що під час сеансу зв'язку передавач радіостанції постійно працює. Цей режим зручний у системах радіозв'язку з виходом у телефонну лінію, оскільки співрозмовник буде позбавлений будь-яких незручностей при розмові по телефону.

За призначенням системи транкінгового зв'язку підрозділяються на:

1. Відомчі (виробничі);
2. Загального користування (міські, регіональні, міжрегіональні);
3. Змішані (частина ресурсу надається на комерційній основі для загального користування).

За протоколами системи транкінгового зв'язку поділяються на:

1. Відкриті;
2. Закриті (корпоративні).

Відкриті протоколи доступні для будь-якого виробника і рекомендо-

вані для застосування в багатьох країнах. Системи, що базуються на таких протоколах, виробляються багатьма фірмами, тому в них застосовується серійне обладнання, що, як правило, дешевше виробленого на замовлення для спеціалізованих систем.

Закриті протоколи використовуються, як правило, тільки розроблювачами, що є одночасно і виробниками обладнання для реалізації цих протоколів. Це устаткування звичайно більш дороге, тому що відсутня будь-яка конкуренція.

За кількістю абонентів, що обслуговуються, транкінгові системи поділяються на три групи:

1. Малі;
2. Середні;
3. Великі.

До малих систем відносяться однозонові системи з кількістю абонентів до 300. До середніх відносяться системи з кількістю абонентів, що обслуговуються, до 3000. Великі системи – це багатозонові транкінгові системи зв'язку з кількістю абонентів більше 3000.

7.3 Принципи побудови системи транкінгового радіозв'язку

7.3.1 Способи формування робочої зони

Існують два способи організації мережі: однозоновий (радіальний) і багатозоновий (стільниковий).

Радіальний спосіб застосовують, як правило, у відомчих (локальних) або невеликих міських мережах, у яких передача повідомлень здійснюється одним передавачем. У цьому випадку через особливості поширення радіохвиль, використовуваних для транкінгового зв'язку, дальність дії визначається, в основному, висотою установлення передавальної антени. Передавачі таких систем для забезпечення максимальної дальності зв'язку мають досить велику потужність. Кількість передавачів, що працюють у відведеній смузі частот, обмежена, тому що рознесення частот між сусідніми каналами повинно складати не менш 12,5 кГц (для передачі повідомлень одного абонента потрібен один частотний канал).

Стільникова організація зв'язку застосовується, як правило, у великих містах, а також при організації регіональних і федеральних мереж.

7.3.2 Повторне використання частот

Кожна з комірок обслуговується своїм передавачем з невисокою вихідною потужністю і обмеженим числом каналів зв'язку. Це дозволяє без перешкод використовувати повторно частоти каналів цього передавача в іншій комірці, що знаходиться на великій відстані. При цьому спрощується базове устаткування і знижується його вартість, але доводиться переключати канали радіостанції при переміщенні в іншу комірку.

Група комірок з різними наборами частот називається кластером. Йо-

го визначальний параметр – кількість частот, використовуваних у сусідніх комірках.

Базові станції, на яких допускається повторне використання виділеного набору частот, знаходяться одна від одної на відстані D , яка називається захисним інтервалом.

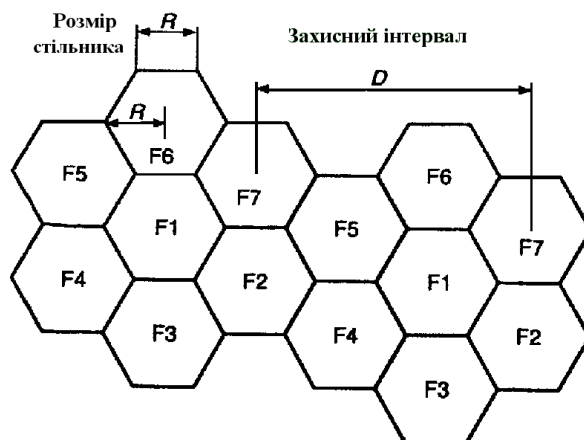


Рисунок 7.3 – Повторне використання частот в несуміжних стільниках

7.3.3 Кількість каналів

Важливим питанням при розгортанні транкінгової системи є правильний вибір числа ретрансляторів і числа радіоканалів у системі в залежності від числа абонентів.

Транкінгових системах застосовується принцип динамічного виділення радіоканалу на кожен виклик, що надходить. Такий же принцип використовується при міжміських телефонних дзвониках, коли абонентові виділяється один з вільних каналів у міжміському телефонному кабелі, що звільняється по завершенні розмови.

Розрахунок кількості ретрансляторів у залежності від числа абонентів виконується методами математичної статистики і дає приблизно такий результат:

- 1 ретранслятор – до 5 абонентів;
- 2 ретранслятори – до 16 абонентів;
- 3 ретранслятори – до 45 абонентів;
- 4 ретранслятори – до 100 абонентів;
- 5 ретрансляторів – до 170 абонентів.

Такий розрахунок припускає, що кожному абонентові виділяється на один виклик 3-5 хвилин, а імовірність успішного доступу в систему дорівнює приблизно 0,95. Системи з великим числом ретрансляторів застосовуються у великих комерційних проектах.

Кількість радіоканалів визначається числом абонентів і припустимою імовірністю відмовлення в з'єднанні через зайнятість усіх каналів.

Суміжні базові станції, що використовують різні набори частотних каналів, утворюють групу з S станцій. Якщо кожній базовій станції виділяється набір з m каналів із шириною смуги кожного F_k , та загальна ширина

смуги, займана системою транкінгового зв'язку, складе $F_c = F_k m C$.

Таким чином, величина C визначає мінімально можливе число каналів у системі, тому її часто називають частотним параметром системи, або коефіцієнтом повторення частот. Коефіцієнт C не залежить від числа каналів у наборі і збільшується в міру зменшення радіуса зони. Таким чином при використанні зон менших радіусів є можливість збільшення повторюваності частот.

7.3.4 Вибір розміру комірки

Застосування шестикутників дозволяє мінімізувати ширину необхідного частотного діапазону, оскільки така форма забезпечує оптимальне співвідношення між величинами C і D . Крім того, шестикутна форма щонайкраще вписується в кругову діаграму спрямованості антени базової станції, встановленої в центрі комірки.

Розміри комірки R визначає захисний інтервал D (див. рис. 7.3) між комірками, у яких ті самі частоти можуть бути використані повторно. Величина захисного інтервалу D залежить також від припустимого рівня завад і умов поширення радіохвиль. У припущенні, що інтенсивність викликів у межах усієї зони однакова, розмір комірок вибирається однаковим. Розмір зони обслуговування базової станції, що виражається через радіус комірки R , визначає також число абонентів N , здатних одночасно вести переговори на всій території обслуговування. Отже, зменшення радіуса комірки дозволяє не тільки підвищити ефективність використання виділеної смуги частот і збільшити абонентську ємність системи, але і зменшити потужність передавачів і чутливість приймачів базових і рухомих станцій. Це, у свою чергу, покращує умови електромагнітної сумісності засобів транкінгового зв'язку з іншими радіоелектронними засобами і системами.

7.4 Склад і устаткування системи транкінгового зв'язку

Основними елементами системи є:

1. Одна або кілька базових станцій з антенно-фідерним пристроєм, що забезпечує радіоканал зв'язку з абонентськими станціями;
2. Комутатор (рідше декілька), що забезпечує: радіопротокол обміну з абонентськими станціями, протоколи обміну з телефонною мережею загального користування, встановлення з'єднань радіоабонентів між собою і з телефонною мережею, додаткові види обслуговування, керування системою, тарифікацію і т. д. ;
3. Лінії зв'язку комутаторів між собою і з базовими станціями;
4. Абонентські станції.

Кожна з комірок зони обслуговується багатоканальним приймачем-передавачем, що називається базовою станцією. Вона служить своєрідним інтерфейсом між радіостанцією і центром комутації рухомого зв'язку, де роль проводів звичайної телефонної мережі виконують радіохвилі. Число

каналів базової станції звичайно кратно 4 або 8, наприклад, 8, 16, 32. Один з каналів є керуючим (control channel). У деяких ситуаціях він може називатися також каналом виклику (calling channel). На цьому каналі відбувається безпосереднє встановлення з'єднання при виклику рухомого абонента мережі, а сама розмова починається тільки після того, як буде знайдений вільний у даний момент частотний канал і відбудеться переключення на нього. Усі ці процеси відбуваються дуже швидко і тому непомітно для абонента.

Будь-який з каналів транкінгового зв'язку являє собою пару частот для дуплексного зв'язку, тобто частоти базової і рухомої радіостанції рознесені. Це робиться для того, щоб поліпшити фільтрацію сигналів і виключити взаємний вплив передавача на приймач того самого пристрою при їхній одночасній роботі.

Усі базові станції з'єднані з центром комутації рухомого зв'язку (комутатором) по виділених провідних або радіорелейних каналах зв'язку (рис. 7.4). Даний центр здійснює постійне спостереження за рухомими радіостанціями, організовує їхню естафетну передачу, у процесі якої досягається безперервність зв'язку при переміщенні рухомої станції з комірки в комірку і переключення робочих каналів з появою завад або несправностей, виконує з'єднання зі звичайною телефонною міською мережею та ін.

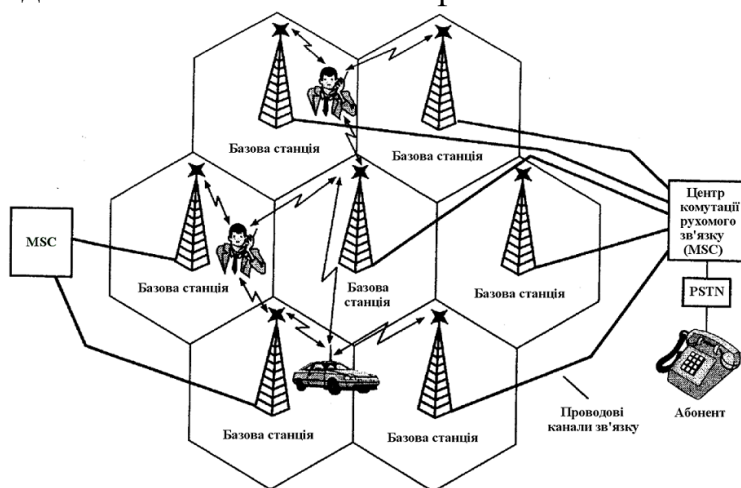


Рисунок 7.4 – Основні складові систем транкінгового зв'язку

Базові станції звичайно випускаються на 4 або 8 каналів. У кожному каналі є передавач і приймач, що часто називають репітером. Склад інших блоків базової станції залежить від типу антенно-фідерного пристрою (АФП).

7.4.1 Структура одноканальної транкінгової системи

Як приклад розглянемо структуру одноканальної транкінгової системи SmartTrunk II. До складу устаткування одного транкінгового радіоканалу системи (рис. 7.5) входять:

1. Контролер транкінгового радіоканалу Selectone ST-852;
2. Ретранслятор системи STANDARD RP-80;
3. Дуплексний фільтр (дуплексер);
4. Джерело живлення постійного струму 13,8 В на 15 А;
5. Дві антени.



Рисунок 7.5 – Структура одноканальної транкінгової системи

Ретранслятор радіоканалу призначений для прийому і підсилення сигналів абонентських радіостанцій (прийнятих на частоті F_{in}) і для перевипромінювання даного сигналу на частоті F_{out} . Цим досягається збільшення зони дії транкінгової радіосистеми.

Ретранслятор зв'язаний шиною керування і звуковим сигналом із транкінговим контролером. Контролер транкінгового каналу декодує цифрові послання абонентських радіостанцій і перевіряє ідентифікаційні номери абонентів і груп. У пам'яті контролера зберігається інформація про всіх абонентів системи: належність до групи, максимальна тривалість розмови, можливість вести міжміські переговори і т. д. Відповідно до цих даних і встановлюється сеанс зв'язку. До контролера транкінгового радіоканалу Selectone ST-852 можуть підключатися дві телефонні лінії, з яких одна має більш високий пріоритет. Контролер має вбудований модем Bell 212/A на 1200 бод для дистанційного керування радіосистемою і зчитування інформації про проведені сеанси зв'язку.

Джерело живлення постійного струму необхідне для безперебійного живлення ретранслятора і контролера транкінгового радіоканалу.

Антенно-фідерний пристрій радіоканалу складається з двох базових антен настроєних на частоти F_{in} і F_{out} , відповідно, які досить рознесені в частотному діапазоні. У принципі можна використовувати одну широкопasmову антену, але в цьому випадку необхідно підключити дуплексний фільтр, що дозволяє розділити прийнятну і передавальну частоти.

Наведений транкінговий радіоканал є однією ланкою для побудови багатоканальних систем.

7.4.2 Структура багатоканальної транкінгової системи

Як приклад розглянемо структуру чотириканальної транкінгової системи SmarTrunk II. Як видно з рис. 7.6, система містить чотири незалежних радіоканали, побудованих за принципом одноканальної транкінгової системи.

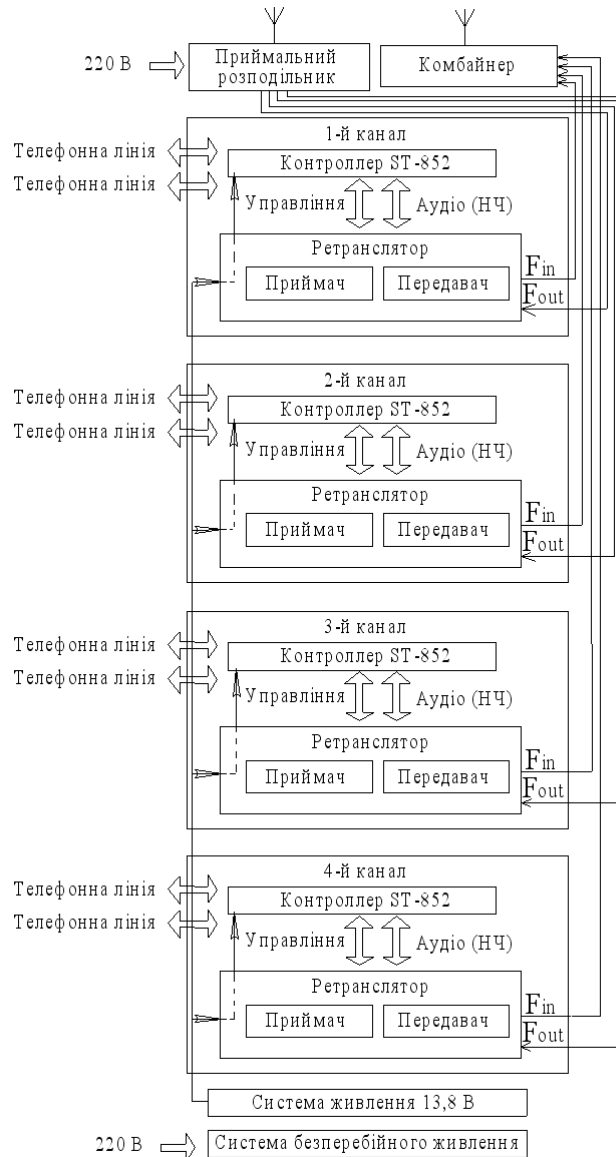


Рисунок 7.6 – Структура чотириканальної транкінгової системи

У багатоканальних транкінгових системах більш складний антенно-фідерний тракт. Для передачі сигналів можна використовувати одну базову антену і комбайнер, що дозволяє передавати сигнали від усіх ретрансляторів системи одночасно. Антенно-фідерний тракт приймальної антени повинен мати розподільник, що розподіляє прийняті сигнали по приймачах ретрансляторів. З передавачів ретрансляторів посилені сигнали надходять на комбайнер, а потім випромінюються передавальною антенною.

7.5 Стандарт TETRA

Стандарт цифрового транкінгового зв'язку TETRA - TErrestrial Trunked Radio (до 1997 року аббревіатура розшифровувалася як Trans-European Trunked Radio) розроблений Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів ETSI (European Telecommunication Standards Institute) і покликаний замінити існуючі аналогові системи PMR (Professional Mobile Radio) і PAMR (Public Access Mobile Radio) в системах радіозв'язку середнього і великого масштабу.

На відміну від телефонів GSM, абонентні термінали TETRA можуть працювати і як радіотелефон, і як радіостанція. Дві станції TETRA можуть безпосередньо зв'язатися між собою, минувши базову станцію. Більш того, якщо людина знаходиться дуже далеко від базової станції, то замість неї буде використана найближча радіостанція. Таким чином, зона радіопокриття мережі TETRA не обмежується зонами обслуговування базових станцій, як в будь-якій стільниковій мережі, а розширюється вслід за переміщенням своїх абонентів.

Переваги TETRA, які не має жодна стільникова мережа, у тому числі і GSM, полягають в гнучкості послуг, що надаються. Крім індивідуального виклику, конференц-зв'язку, передачі коротких текстових повідомлень в ній є унікальні послуги, такі як груповий виклик, підтверджений груповий виклик та циркулярний виклик.

Окрім основних послуг стандарт TETRA забезпечує додатковий сервіс (табл. 7.1), що дозволяє реалізувати високу гнучкість функціонування транкінгових систем.

Таблиця 7.1 – Додаткові послуги стандарту TETRA

1	2
Виклик, дозволений диспетчером	Диспетчер підтверджує запит на виклик, перед тим, як дозволити виклику продовжитися
Вибір зони	Встановлені зони робіт для користувачів. Можуть бути переустановлені за принципом "виклик за викликом"
Пріоритет доступу	Доступ до лінії пристрою з пріоритетом в періоди переповнювання
Пріоритетний виклик	Може бути встановлений пріоритет доступу до мережевих ресурсів
Пізнє підключення	Користувачі можуть приєднуватися до прохідного виклику

Продовження таблиці 7.1.

1	2
Скидальний пріоритетний виклик	Цей виклик має щонайвищий пріоритет лінії і щонайвищий пріоритет доступу до мережевих ресурсів. Якщо система буде зайнята, то зв'язок з нижчим пріоритетом буде скинутий, що дозволить продовжитися цьому виклику.
Приховане прослуховування радіопереговорів	Уповноважені пристрої можуть контролювати зв'язок і при цьому їх не можна впізнати
Прослуховування навколишнього оточення	Диспетчер може включити передавач радіостанції без індикації на самій радіостанції. Функція може бути корисна в ситуації угону, для того, щоб прослуховувати, що відбувається в машині
Динамічне призначення номера групи	Дозволяє диспетчеру програмувати нові номери груп в радіостанціях через ефір. Може також використовуватися для групування учасників в прохідний виклик

Система стандарту TETRA може функціонувати в таких режимах:

- транкінговий зв'язок;
- з відкритим каналом;
- безпосередній зв'язок.

У режимі транкінгового зв'язку обслуговується територія перекривається зонами дії базових станцій. Стандарт TETRA дозволяє будувати як системи з виділеним частотним каналом управління, так і з розподіленням.

При роботі мережі зв'язку з виділеним каналом управління станції надають абонентам декілька частотних каналів, один з яких — канал управління — спеціально призначається для обміну службовою інформацією.

При роботі мережі з розподіленням каналом управління службова інформація передається або в спеціально виділеному часовому каналі (одному з 4-х каналів, організованих на одній частоті), або в контрольному кадрі мультикадра (одному з 18).

У режимі з відкритим каналом група користувачів має нагоду встановлювати з'єднання “один пункт — декілька пунктів” без якої-небудь настановної процедури. Будь-який абонент, приєднавшись до групи, може у будь-який момент використовувати цей канал. У режимі з відкритим каналом радіостанції працюють в двочастотному симплексі.

У режимі безпосереднього (прямого) зв'язку між терміналами встановлюються дво- і багатоточкові з'єднання по радіоканалах, не пов'язаних з каналом управління мережею, без передачі сигналів через базові станції.

У системах стандарту TETRA мобільні станції можуть працювати в так званому режимі “подвійного спостереження” (“Dual Watch”), при якому забезпечується прийом повідомлень від абонентів, що працюють як в режимі транкінгового, так і прямого зв'язку.

Основні функції мережевого обслуговування або мережеві процедури забезпечуються стандартизованими службами TETRA. Набір використовуваних мережевих процедур для конкретної мережі визначається оператором.

До основних мережевих процедур відносяться реєстрація мобільних абонентів і роумінг (процедура закріплення абонента за однією або декількома базовими станціями і забезпечення можливості переміщатися із зони в зону без втрати зв'язку), повторне встановлення зв'язку (забезпечення можливості заміни мережею базової станції, використовуваної абонентом, у разі погіршення умов зв'язку), аутентифікація абонентів (встановлення достовірності абонентів), відключення/підключення абонента (процедура відключення (підключення) абонента від (до) мережі за його ініціативою), відключення абонента оператором мережі (процедура блокування роботи абонентного терміналу оператором мережі), управління потоком даних (забезпечення можливості мережі перемикаєти на себе потік даних, направлений до певного абонента).

7.6 Стандарт SmartZone

Характерною особливістю стандарту SmartZone є ширина радіоканалу 2 МГц, відстань між несучими в стандарті – 1,26 МГц, тобто радіоканали розташовані впритул один до одного. Працює система у стандартних діапазонах частот 150 і 450 МГц, із кроком сітки 12,5 і 25 кГц і дуплексним рознесенням частот 5-40 МГц.

Реально в такій системі на кожній базовій або абонентській станції використовуються три типи псевдовипадкових послідовностей (кодів), кожен з яких виконує свою функцію: для синхронізації роботи крайових пристроїв радіотракту, для ідентифікації абонентських терміналів і безпосередньо для передачі корисної інформації.

Таким чином, псевдовипадкові послідовності – це три джерела і три складові частини технології SmartZone.

Як третій тип коду використовуються псевдовипадкові послідовності, формовані відповідно до взаємноортогональних функцій Уолша. Всього існує 64 таких функцій, які дозволяють реалізувати на одній базовій станції одночасну роботу 64 абонентів в одному радіоканалі. Зрозуміло, коли в мережі з'являються інші базові станції, то з'являються і додаткові завади, що зменшують динамічний діапазон і, відповідно, знижують кількість розмовних каналів. Реально для фіксованого зв'язку системи стандарту SmartZone реалізують до 40 – 45 розмовних каналів в одному радіоканалі, а для мобільного – 20 – 25. Остання обставина пов'язана з необхідністю резервування

каналів в сусідніх комірках для забезпечення функції так званого «м'якого» перемикавання («soft hand-off»)

У даній цифровій системі весь обмін мовними повідомленнями та даними здійснюється тільки в цифровому вигляді. Це дозволяє здійснювати передачу інформації в більше вузькому частотному каналі (12,5 і навіть 6,25 кГц) без зниження якості. Оскільки при передачі цифрових даних використовуються тільки дві частоти (для «1» і «0»), то в ідеалі можна створювати системи зв'язку із шириною каналу в декілька герц. На сьогоднішній день досягнута величина смуги радіоканалу 6,25 кГц. Причому в межах цієї смуги передається як оцифрована звукова інформація (мова), так і інформація, що постійно є цифровою (телеметрія, комп'ютерні дані, Інтернет).

Мережі стандарту SmartZone використовують доступ до каналу зв'язку з контролем несучої і попередженням колізій. Прилад не розпочне передачу даних, доки не буде підтверджено, що ефір вільний в діапазоні його частот. Передбачено можливість роботи в змішаному режимі. Інформація в мережах SmartZone передається кадрами. Кожен інформаційний кадр містить два поля: преамбулу із заголовком і інформаційне поле.

Розрізняють два підрівні керування каналом передачі даних DLC (data link control) – верхній, LLC (logical link control) – підрівень керування логічним каналом і нижній, MAC (medium access control) – підрівень керування доступом до середовища передачі даних. Фізичний рівень розділяється також на два підрівні PLCP (physical layer convergence protocol) – конвергентний протокол фізичного рівня і PMD (physical medium department) – протокол, що залежить від фізичного носія. Протокольна архітектура показана на рис. 7.7:

Рівень DLC	Рівень LLC	Керування MAC рівнем	Керування станцією
	Рівень MAC		
Фізичний рівень	Рівень PLCP	Керування фізичним рівнем	
	Рівень PMD		

Рисунок 7.7 – Протокольна архітектура і керування в SmartZone

Керування MAC рівнем важливий етап при керуванні процесами передачі інформації мережею. Передача на MAC рівні відбувається повідомленнями, які в свою чергу розбиті на пакети. На рис. 7.8 зображений пакет рівня MAC в стандарті SmartZone:

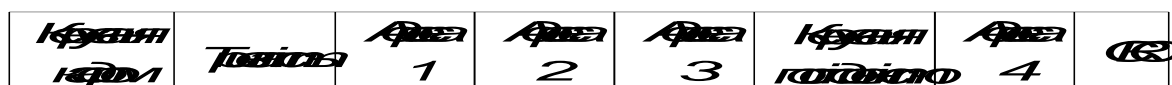


Рисунок 7.8 – Структура пакета SmartZone

Поле керування кадром довжиною 2 байти складається з декількох полів, які несуть інформацію про версію протоколу, тип кадру (керуючий, перевірний, дані), про фрагментацію пакета, що передається, інформацію про конфіденційність і двобітового поля системи розподілення (distribution system – DS), що вказує значення чотирьох адресних полів кадру.

Поле ідентифікатора тривалості використовується для схеми віртуального резервування каналу з використанням RTS/CTS і містить значення, що вказує період планованого зайняття середовища.

Адресні поля мають довжину по 48 біт кожне. Поле керування почерговою використовується для випадків, коли кадр буде продубльований (внаслідок використання механізму підтвердження приймання). Таким чином, дане поле призначене для виявлення і відсіювання дублюючих фрагментів. Поле даних може містити довільні дані (до 2312 байт), що передаються від відправника одержувачу (одержувачам). Поле контрольної суми містить 32-бітовий код CRC для перевірки безпомилкової передачі пакета.

При використанні стандарту SmartZone передача сигналів може здійснюватися *методом прямої послідовності* (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS), тому що метод FHSS не дозволяє отримати потрібне значення пропускної здатності. Для сумісності в даному методі обов'язковим є кодування за допомогою Complementary Code Keying, і мультиплексування частот за допомогою Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

Особливістю методу DSSS є стійкість до завад і нечутливість до багатопроменевого поширення. На рис. 7.9 зображено кадр фізичного рівня при використанні схеми DSSS.

128bit	16bit	8bit	8bit	16bit	16bit	змінний
Синхронізація	SFD	Сигнал	Служба	Довжина	HEC	Корисне навантаження

Рисунок 7.9 – Формат кадру фізичного рівня при використанні схеми DSSS

Перші 128 біт використовуються не тільки для синхронізації, а і для регулювання підсилення, детектування енергії і компенсації зсуву частоти. Стартовий роздільник кадру (SFD) використовується для синхронізації на початку кадру і включає фіксований код 1111001110100000. Поле сигнал вказує швидкість передачі корисного навантаження. Поле служби при комбінації 0x00 вказує, що передається пакет стандарту SmartZone. Довжина використовується для вказування розміру поля даних. HEC – перевірка наявності помилок в заголовку.

В стандарті SmartZone можуть бути застосовані такі основні механізми доступу: обов'язковий основний метод на основі різновидності; альтер-

нативний метод, що дозволяє уникнути проблеми ізольованого терміналу; безконфліктний метод опитування для термінових служб.

Перших два методи інколи об'єднують під загальною назвою *розподілена координаційна функція* DCF (Distributed Coordination Function), третій метод називається *точковою координаційною функцією* PCF (Point Coordination Function). Схема DCF пропонує тільки асинхронну службу, тоді як PCF пропонує і асинхронну, і термінову службу. Механізми MAC також називаються розподіленим безпроводним керуванням доступом до середовища.

На рис. 7.10 показані параметри, які визначають пріоритети доступу до середовища:

- *міжкадровий проміжок DCF* (DCF inter-frame spacing – DIFS). Має найбільший час очікування, а відповідно, найнижчий пріоритет для доступу до середовища. Цей час очікування використовується асинхронною службою протягом періоду змагання. Хоча такий метод надає найбільший час очікування, він досить часто використовується у мережах;

- *міжкадровий проміжок PCF* (PCF inter-frame spacing – PIFS). Час очікування між DIFS і SIFS (середній пріоритет) використовується для термінових служб, тобто точка доступу, що опитує інші вузли, повинна для доступу до середовища очікувати тільки протягом часу PIFS;

- *короткий міжкадровий проміжок* (Short inter-frame spacing – SIFS). Інтервал очікування доступу до середовища, визначений як для коротких керуючих повідомлень, таких як підтвердження приймання інформаційних пакетів або відгук на опит. Це найкоротший інтервал часу очікування, тому станції, що застосовують SIFS, мають найвищий пріоритет доступу.

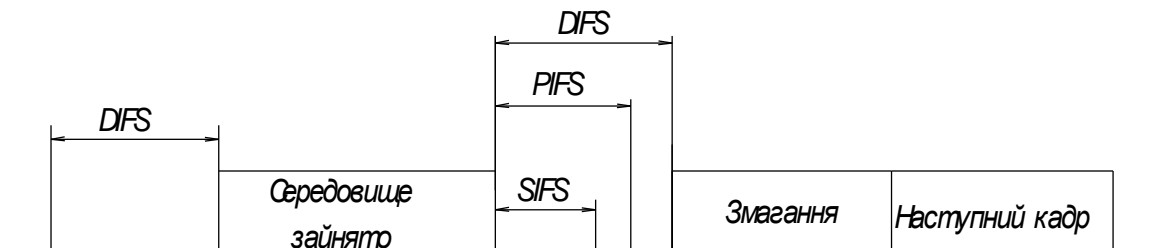


Рисунок 7.10 – Доступ до середовища і міжкадрові проміжки

7.7 Стандарт MPT 1327

В основу протоколу MPT 1327 покладений ряд принципів:

- виділений канал керування. Системи протоколу MPT 1327 будуються з виділеним каналом керування, як такий не використовується один із каналів базової станції. Решта виділяються каналами трафіку і призначені для обміну розмовних повідомлень і для передачі даних;

- почергове обслуговування. Якщо виклик надходить в момент, ко-

ли всі канали зайняті він буде поставлений в чергу і буде обслуговуватись відповідно до пріоритету абонента;

- довільний доступ. В момент запиту на з'єднання по каналу керування виникає небезпека зіткнення запитів від других станцій. Для вирішення подібних конфліктів використовується алгоритм довільного доступу;

- роумінг. Протокол передбачає можливість для абонентських станцій інформувати центральний контролер про своє місцезнаходження;

- відкритість стандарту. Це дозволяє різним виробникам випускати сумісне устаткування. В такому разі споживач не прив'язаний до якогось одного постачальника і може вибирати те або інше устаткування.

Сигнали керування між базовою й абонентськими станціями, а також між контролерами базових станцій передаються по каналу керування в цифровому вигляді зі швидкістю 1200 біт/с. При цьому йде практично неперервний обмін повідомленнями між базовою і абонентською станціями.

Для здійснення взаємодії існує ряд стандартних команд-повідомлень, позначених трьома або чотирма символами (ALH, RQS, ACK й т. д.).

На первинній стадії обробки викликів має місце такий обмін сигналами:

- базова станція посилає в канал повідомлення-запрошення ALH, що означає готовність приймати повідомлення від абонентських станцій протягом вказаного часу;

- деякий час базова станція знаходиться в режимі прийому, якщо протягом цього інтервалу ніхто не відповів, виклик повторюється;

- якщо за час, відведений на прийом, поступив виклик, то базова станція почне ту або іншу процедуру встановлення з'єднання відповідно до типу запиту.

Для рішення проблеми зіткнень запитів від абонентських станцій застосовується алгоритм довільного доступу (ALOHA), зміст якого полягає в тому, що запити від станції поступають не в строго визначені, а в випадкові моменти часу. Тим самим знижується вірогідність накладення запитів в часі.

Специфікації протоколу MPT 1327 дають можливість отримати такі максимальні значення параметрів транкінгової системи: 1 036800 абонентських адрес; 32768 ідентифікаційних кодів; 1024 керуючих каналів транкінга.

Відповідно до величин цих параметрів системи розділяються на регіональні (до 16 комірок в кожній системі) та національні (максимум 2 системи по 512 комірок кожна).

Слід зазначити, що специфікації протоколу MPT 1327 не накладають принципових обмежень на інфраструктуру самої мережі і можуть використовуватися як для створення простих однозонових, так і для створення великих мереж радіозв'язку з практично необмеженим числом абонентів. Конкретна система не реалізує всі функції, передбачені в ста-

ндарті MPT 1327, вона може надавати лише необхідний мінімальний набір, задовольняючи вимоги замовника. Це забезпечує можливість створення на базі специфікації даного протоколу широкого спектра прикладних систем.

Відмінності в устаткуванні різних фірм-виробників (серед яких Rohde & Schwartz, Fylde Microsystems, Tait Electronics, Nokia, Zetron та ін.) визначаються саме повнотою реалізації специфікації MPT 1327.

На закінчення можна відмітити, що даний протокол підтримує головним чином аналогові системи. Проте сам по собі протокол MPT 1327 не накладає обмежень на типи радіоканалу і види модуляцій. Сьогодні існують і повністю цифрові системи, реалізовані на базі протоколу MPT 1327, наприклад система ACCESSNET-D компанії Rohde & Schwartz.

Транкінгові системи стандарту MPT 1327 є системами з виділеним каналом керування, як такий використовується один із каналів базової станції. Керуюча інформація передається по каналу керування в цифровому вигляді, а обмін розмовними повідомленнями по робочих каналах здійснюється в аналоговому. Хоча існують і повністю цифрові системи, реалізовані на базі протоколу MPT 1327.

Стандарт MPT 1327 передбачає передачу сигналів зі швидкістю 1200 біт/с в стандарті FFSK (Fast Frequency Shift Keying – швидка частотна модуляція), який застосовується як для дуплексних базових станцій, так і півдуплексних абонентських радіостанцій. Використання сигналізації в дуплексних абонентських терміналах не є обов'язковою вимогою протоколу MPT 1327, але передбачене в багатьох реалізаціях систем. Всі команди, що передують початку зв'язку, передаються по каналу керування.

В системах MPT 1327 передбачено дві стратегії:

- з жорстко закріпленим каналом керування;
- з не жорстко закріпленим каналом керування.

У системах з жорстко закріпленим каналом керування, і цей канал використовується виключно для передачі команд керування, тоді як в системах з не жорстко закріпленим каналом керування, він може використовуватися також для передачі голосу і даних в ті моменти, коли всі робочі канали зайняті. Для сумісного використання каналу керування великою кількістю радіостанцій використовується протокол випадкового доступу, що виключає конфлікти при одночасних запитах.

Повідомлення, що передаються по керуючому каналу – це пакети, що складаються із слів даних довжиною 64 бітів (48 біт інформації і 16 біт керування). Кожен пакет містить:

- синхронізуючу послідовність — сигнали синхронізації обладнання базових станцій і абонентів;
- адресне слово — характер повідомлення і «адресат»;
- одне або більше слів даних — безпосередньо інформація (реєстрація, виклики, команди переходу і под.).

Справність каналу керування (вихідна потужність, наявність переш-

коди на частоті прийому) ретельно контролюється. При підозрі на несправність каналу керування, ним стає інший канал. Наявність в системі МРТ 1327 постійного каналу керування забезпечує малий час встановлення зв'язку — близько 400 мс.

Стандарт МРТ 1327 передбачає такі види зв'язку:

- голосовий зв'язок;
- передача даних;
- аварійний виклик;
- зв'язок з підключенням;
- передача статусних повідомлень;
- передача коротких блоків даних;
- передача розширених блоків даних;
- передача даних довільної довжини.

Голосовий зв'язок (Speech Call) надає радіоабонентові можливість вимагати індивідуальний або груповий зв'язок із звичайним або високим пріоритетом. При груповому виклику можливий режим загального радіообміну або режим оповіщення, коли говорить тільки викликний радіоабонент, а всі інші слухають.

Стандарт забезпечує передачу даних (*Data Call*) довільної довжини на робочому каналі. Радіоабонент може задати звичайний або високий пріоритет, а для групових викликів визначити чи можуть члени групи відповідати.

Аварійний виклик (Emergency Call) — це виклик з максимальним можливим пріоритетом наперед визначеного радіо- або телефонного абонента. Зв'язок встановлюється негайно шляхом переривання вже встановлених з'єднань (виклик з максимальним пріоритетом, голосовий зв'язок, передача даних, груповий виклик з можливістю відповіді).

Зв'язок з підключенням (*Include Call*) забезпечує підключення третього радіо абонента чи групи до розмови, що вже ведеться між двома абонентами. Цей вид зв'язку може застосовуватись для організації конференц-зв'язку і переадресації викликів.

У багатьох системах на базі стандарту МРТ 1327 реалізована можливість передачі по каналу керування *розширених блоків даних (Extended Data Messages)*, що дозволяє передавати до чотирьох коротких повідомлень в одному пакеті.

Передача *даних довільної довжини (Non-Prescribed Data)* в системах МРТ 1327 здійснюється на робочих каналах, які в даному випадку називаються каналами даних. Зв'язок здійснюється на голосовому каналі і не може бути перерваний іншими запитами. При цьому підтримуються можливості інтерактивного зв'язку двох і більше абонентів, передачі файлів з підтвердженням прийому, а також режим електронної пошти.

Зміст повідомлень, що передаються, може бути різним. Звичайно обмін даними довільної довжини необхідний в різних комп'ютерних додатках (передачі файлів, модемного зв'язку, електронної пошти, інтернету).

Для передачі даних радіостанція повинна бути обладнана спеціальним інтерфейсом, за допомогою якого можна підключити до радіостанції термінали даних (зазвичай комп'ютери).

Запитання для самоперевірки

1. Охарактеризуйте професійні системи рухомого зв'язку.
2. Наведіть класифікацію транкінгових систем радіозв'язку.
3. Організація доступу до транкінгової системи зв'язку.
4. Особливості однозонових транкінгових систем.
5. Особливості багатозонових транкінгових систем.
6. Поясніть структуру одноканальної транкінгової системи.
7. Наведіть основні характеристики стандарту TETRA.
8. Наведіть особливості стандарту MPT 1327.
9. Поясніть принципи функціонування стандарту SmartZone.

СЛОВНИК ТЕРМІНІВ

аварійний виклик – Emergency Call
амплітудна модуляція – Amplitude Modulation
антивизначник номера – Calling Line Identification Restriction
багатоімпульсне збудження – Multi-pulse Excitation, MPE
багатокористувацький – multiuser
базова станція – base station
бінарна фазова маніпуляція – Binary Phase Shift Keying, BPSK
блокове кодування – block coding
виділений канал – dedicated channel
визначення номера викликувальної лінії – Calling Line Identification Presentation
відкритий – open
внутрішньомодова – intra-mode
вокодер – vocoder
вторинний загальний фізичний канал керування – secondary common control physical channel, S-CCPCH
гаусова маніпуляція з мінімальним зсувом – Gaussian Minimum Shift Keying, GMSK
глобальний роумінг – globalroaming
голосовий зв'язок – Speech Call
гостьовий регістр місця розташування – Visitor Location Register, VLR
глобальна навігаційна система – Global Positioning System, GPS
гратчастий – lattice
груповий виклик – Multi party
двійковий – binary
декодер – decoder
диференціальна квадратурна фазова маніпуляція зі зсувом $\pi/4$ – $\pi/4$ Differential Quadrature Phase Shift Keying, $\pi/4$ DQPSK
довготривале передбачення – Long-term Prediction, LTP
довжина обмеження – constraint length
домашній регістр місця розташування – Home Location Register, HLR
естафетна передача – handover
заборона виклику – callbarring
загальний канал – common channel
закрита група – Closed User Group
збудження послідовністю бінарних імпульсів з перетворенням – Transformed Binary Pulse Excitation, TBPE
збудження регулярною послідовністю імпульсів – Regular-pulse Excitation, RPE
зворотний голосовий канал – REverse Voice Channel, REVC
зворотний службовий канал – REverse Control Channel, RECC
згортокове кодування – convolutional coding

зовнішній – outer
ідентифікатор – signature
ідентифікаційний номер стільникової мережі – System Identification Number
ідентифікаційний номер телефону – Mobile Identification Number
кадр збудження – excitation frame
канал виклику – calling channel
канал випадкового доступу – random access channel, RACH
канал індикаторів виклику – paging indicator channel, PICH
канал індикації захоплення – acquisition indication channel, AICH
канал пакетної передачі – common packet channel, CPCH
канал синхронізації – synchronisation channel
квадратурна фазова маніпуляція – Quadrature Phase Shift Keying, QPSK
квадратурна фазова маніпуляція зі зсувом – Offset Quadrature Phase Shift Keying, OQPSK
квадратурний – quadrature
кепстральна відстань – Cepstrum Distance, CD
канал керування – control channel
кодек – codec
кодер – encoder
кодування джерела сигналу – source coding
кодування з попереджувальною корекцією помилок – Forward Error Correcting coding
кодування форми сигналу – waveform coding
коефіцієнт розширення спектра – spreading factor, SF
коефіцієнт часткової кореляції – partial correlation coefficient
конвергентний протокол фізичного рівня – physical layer convergence protocol
короткочасне передбачення – Short-term Prediction, STP
лінійне передбачення – Linear Predictive Coding, LPC
лінійне передбачення з кодовим збудженням – Code-excited Linear Prediction, CELP
лінійне передбачення з різновидом збудження векторною сумою – Vector Sum Excited Linear Prediction, VSELP
логарифмічні відношення площ – Log-area Ratio, LAR
мережа – network
метод прямої послідовності – Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS
міжкадровий проміжок – inter-frame spacing
міжмодова – inter-mode
міжсистемна – inter-system
мінімальна маніпуляція – Minimum Shift Keying, MSK
множинний доступ – multiple access
множинний доступ з кодовим розділенням каналів – Code Division Multiple Access, CDMA

множинний доступ з часовим розділенням каналів – Time Division Multiple Access, TDMA
множинний доступ з частотним розділенням каналів – Frequency Division Multiple Access, FDMA
модуль для запису номера – Number Assignment Module
м'яка передача – soft handover
обслуговування додаткової лінії – Alternative Line Service
орбіта – orbit
пакетна передачі даних – General Packet Radio Service, GPRS
переадресація виклику – callforwarding
первинний загальний фізичний канал керування – primary common control physical channel, P-CCPCH
первинний синхронізуючий код – primary synchronization code, PSC
передача даних по комутованих каналах – High Speed Circuit Switched Data, HSCSD
перемежування – interleaving
перепрограмувальна частина – software
повідомлення – message
повільний сполучений логічний канал керування – Slow Associated Control Channel, SACCH
повношвидкісний кодек алгебри лінійного передбачення з кодовим збудженням – algebraic code-book excited linear prediction/enhanced full rate, ACELP-EFR
порада щодо оплати – Advice of Charge
прийом коротких текстових повідомлень – Short Message Service
прямий голосовий канал – FOrward Voice Channel, FOVC
прямий службовий канал – FOrward Control Channel, FOCC
проводовий – wireline
регістр ідентифікації апаратури – Equipment Identity Register
ретранслятор – retransmitter
розподілена координаційна функція – Distributed Coordination Function, DCF
розширений спектр – spread spectrum
розширені блоки даних – Extended Data Messages
рухома станція – mobile station
середня суб'єктивна оцінка – Mean Opinion Score, MOS
серійний номер – Electronic Serial Number, ESN
синфазний – inphase
система голосових повідомлень – Voice mail
стиснення – despreading
стілник – cell
супутниковий зв'язок – satellite communication
тимчасовий міжнародний ідентифікаційний номер користувача – Time Mobile Subscriber Identity, TMSI

транкінг передачі – transmission trunking
транкінг повідомлень – message trunking
універсальні служби мобільного зв'язку – Universal Mobile
Telecommunications Services, UMTS
управління доступом до середовища передачі даних – medium access
control
управління каналом передачі даних – data link control, DLC
управління логічним каналом – logical link control
утримання виклику – callholding
фазова модуляція – Phase Modulation
центр аутентифікації – Authentication Center
центр комутації – Mobile Switching Center, MSC
часове дуплексне розділення – Time Division Duplex, TDD
частотне дуплексне розділення – Frequency Division Duplex, FDD
частота бітової помилки – Bit Error Rate, BER
частотна модуляція – Frequency Modulation
чекання виклику – callwating
швидка частотна маніпуляція – Fast Frequency Shift Keying, FFSK
швидкий сполучений логічний канал керування – Fast Associated Control
Channel, FACCH
швидкість кодування – coding rate
широкомовний транспортний канал – broadcasting channel, BCH
широкосмуговий сигнал – spread spectrum signal

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абилов Альберт Винерович. Сети сотовой связи : учебно-методическое пособие по курсу «Сети связи» / Абилов А. В. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2000. – 20 с.: ил.
2. Андрианов В. И. Сотовые, пейджинговые и спутниковые средства связи / В. И. Андрианов, А. В. Соколов – СПб : БХВ-Петербург; Арлит 2001. – 400 с.
3. Весоловский Кшиштоф. Системы подвижной радиосвязи / Весоловский Кшиштоф; [пер. с польск. И. Д. Рудинского; под ред. А. И. Ледовского]. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 536с.
4. Дятлов Анатолий Павлович Системы спутниковой связи с подвижными объектами : Учебное пособие. Ч.1. / Дятлов А. П. – Таганрог. : ТРТУ. 1997. – 95с.
5. Карташевский Вячеслав Григорьевич. Сети подвижной связи / Карташевский В. Г., Семёнов С. Н, Фирстова Т. В. – М. : Эко-Трендз, 2001. – 299 с.
6. Ратынский Михаил Владимирович Основы сотовой связи / Ратынский М. В. [под ред. Д.Б. Зимины]. – М. : Радио и связь, 1998. – 248с.; ил.
7. Системы мобильной связи : [учебное пособие для вузов] / Ипатов В. П., Орлов В. К., Самойлов И. М., Смирнов В. Н. [под ред. В. П. Ипато-ва]. – М. : Горячая линия – Телеком, 2003. – 272с.

Навчальне видання

Олена Олександрівна Семенова
Андрій Олександрович Семенов
Володимир Сергійович Белов

Системи рухомого зв'язку

Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна
Коректор З. Поліщук
Оригінал-макет підготовлено О. Семеновою

Підписано до друку 30.06.2017р
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 10,64.
Наклад 50 (1-й запуск 1-20) пр. Зам. № 2017-253

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
Інформаційний редакційно-видавничий центр.
ВНТН, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 59-85-32, 59-87-38.
Press.vntu.edu.ua\$ e-mail: kivc.vntu@gmail.com
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.