

**Українська державна академія залізничного транспорту**

**ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ ТА ЗВ'ЯЗКУ**

Кафедра «Транспортний зв'язок»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до практичних занять з дисципліни

*«РАДІОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ»*

на тему

*«Вивчення принципів побудови систем безпроводового зв'язку на основі технології LTE»*

Харків  
2014

Методичні вказівки розглянуті і схвалені на засіданні кафедри «Транспортний зв'язок», протокол № XX від XX XXXXXXXX 2014 р.

У методичних вказівках викладені основні питання, які необхідно вирішити при вивченні мережі безпроводового зв'язку на основі технології LTE.

Укладачі

В.П. Лисечко, І.І Сопронюк, О.С. Жученко, О.С. Волков

# ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| <b>Вступ</b> .....  | 6  |
| <b>1 Етапи розвитку та принципи функціонування технології LTE</b> ..... | 10 |
| <b>2 Принципи організації нисхідного радіоканалу</b> .....              | 12 |
| 2.1 Формування OFDM .....   | 12 |
| 2.2 Структура кадру Downlink.....                                       | 16 |
| 2.3 Фізичні канали Downlink .....                                       | 19 |
| 2.4 Фізичні сигнали .....   | 20 |
| 2.4.1 Опорні сигнали.....   | 20 |
| 2.4.2 Сигнали синхронізації .....                                       | 21 |
| <b>3 Принципи організації висхідного радіоканалу</b> .....              | 22 |
| 3.1 Фізичні канали Uplink .....   | 25 |
| <b>4 MAC рівень</b> .....   | 26 |
| 4.1 Функції MAC рівня.....  | 27 |
| 4.2 Логічні канали.....   | 27 |
| 4.3 Мапінг логічних каналів .....                                       | 28 |
| 4.3.1 Uplink .....  | 28 |
| 4.3.2 Downlink.....   | 29 |
| 4.4 MAC Процедури .....   | 29 |
| 4.4.1 Процедура пошуку.....   | 29 |
| 4.4.2 Процедура пошуку стільників .....                                 | 30 |
| 4.4.3 Процедури випадкового доступу.....                                | 30 |
| 4.5 Протоколи HARQ/ARQ.....   | 31 |
| <b>5 Багатоантенні рішення</b> .....                                    | 32 |
| <b>6 Мережева архітектура SAE</b> .....                                 | 34 |
| 6.1 Продуктивність .....  | 39 |
| <b>7 Механізм диспетчеризації</b> .....                                 | 40 |
| <b>8 Регулювання потужності у висхідному каналі</b> .....               | 41 |
| <b>9 LTE ADVANCED</b> .....   | 41 |
| <b>Список рекомендованої літератури</b> .....                           | 42 |

## ВСТУП

Спостерігаючи еволюцію розвитку технологій мереж радіодоступу, дивуєшся генієві людського розуму. Кожне наступне покоління мереж мобільного зв'язку приносить принципово нові технологічні можливості, значно розширювальний спектр послуг кінцевим користувачам. Знаючи минулий і поточний рівень розвитку цифрових мереж мобільного зв'язку й потреби абонентів цікаво заглянути в найближче майбутнє й зрозуміти, що нас очікує.

Опис різних технологій широкосмугового безпроводового зв'язку знайшло відбиття в численних вітчизняних і закордонних роботах. Однак в існуючих публікаціях практично відсутній опис новітньої технології Long-Term Evolution (LTE), широке впровадження якої почалося в багатьох країнах світу.

Перш ніж переходити до розгляду принципів побудови й реалізації безпроводових мереж на базі технології LTE розглянемо місце цієї технології серед інших сучасних технологій безпроводового зв'язку.

У цей час триває бурхливий розвиток безпроводових цифрових комунікацій. Безпроводові широкосмугові мережі практично перебувають поза конкуренцією по оперативності розгортання, мобільності, ціні й широті можливих застосунків, у багатьох випадках являючи собою єдине економічно виправдане рішення.

Рівень розвитку мікроелектроніки дозволив випускати масові дешеві засоби безпроводового зв'язку – радіомаршрутизатори й стільникові телефони. Бум стільникового зв'язку, порівнянний лише зі зростанням виробництва персональних комп'ютерів і розвитком Інтернету, не вповільнюється вже чверть століття. Мобільних телефонів в усьому світі вже значно більше, ніж звичайних провідних телефонних апаратів. Швидкими темпами розвиваються персональні й локальні мережі, широко впроваджуються безпроводові мережі регіонального масштабу. Низька вартість, швидкість розгортання, широкі функціональні можливості по передачі даних, телефонії, відеопотоків робить безпроводові мережі одним з основних напрямків розвитку телекомунікаційної індустрії.

Бурхливий розвиток безпроводового зв'язку супроводжується безперервною зміною технологій, в основі яких лежать стандарти GSM, CDMA і IEEE 802. До них належать технології Wi-Fi і WiMAX, еволюційні ланцюги розвитку яких мають такий вигляд:

1. IEEE 802.-802.11a,b,g,n ( Wi-Fi) - 802.11s (MESH);

2. IEEE 802.-802.16a-802.16d («фіксований»WiMAX)-802.16e («мобільний» WiMAX), і технології стільникового зв'язку 3G-UMTS і CDMA-2000, еволюція розвитку яких може бути описана наступними послідовними подіями:

1. HSDPA-HSUPA-LTE

## 2. CDMA-CDMA1x-EVDORevA-EVDORev.B-EVDORev.C.

Основні напрямки розвитку технології широкосмугового зв'язку наведені на рисунку 1. Коротко характеризуючи ці технології відзначимо, що мережі Wi-Fi завоювали визнання й широко застосовуються при побудові локальних і регіональних мереж і рішенні проблеми «останньої милі».

Технологія фіксованого WiMAX (IEEE 802.16d) поки не виправдала надій, що покладали на неї, по швидкодії, об'єму зони покриття й цінових характеристик.

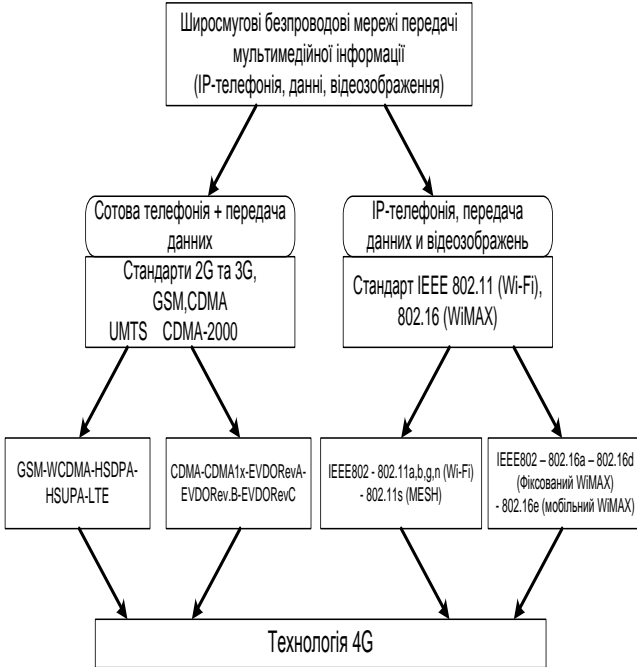


Рисунок 1 – Основні напрямки розвитку технології широкосмугового зв'язку

Надії операторів покладають на технологію мобільного WiMAX (IEEE 802.16e), що починає активно впроваджуватися у всіх країнах світу. Технологія 3G широко використовується операторами стільникового зв'язку.

Порівнюючи два напрямки розвитку 3G і IEEE 802, слід зазначити, що кожна із цих технологій займає свою нішу на великому ринку безпроводового зв'язку. Компанія Intel і цілий ряд інших великих компаній здійснюють розвиток і комерціалізацію технологій WiMAX. Інтенсивний розвиток і впровадження технології LTE реалізується компанією Alcatel-Lucent разом з фірмами NEC Corporation і LG Electronics.

На сьогоднішній день вимоги кінцевих користувачів до надаваних послуг (рисунок 2) постійно підвищуються. Мобільні мережі будуть використовуватися не тільки для стільникового зв'язку, але й для передачі відео, мобільного ТВ, музики й роботи з Інтернет на високих швидкостях і з високою якістю передачі. Саме із цією метою в рамках проекту співробітництва в створенні мереж третього покоління 3GPP (3G Partnership Project) була почата розробка LTE.



Рисунок 2 – Широкосмугові послуги , що стимулюють еволюцію систем 3G

Дана технологія дозволить досягти значних швидкостей передачі даних— до 50 Мбіт/с для висхідного каналу й до 100 Мбіт/с для нисхідного каналу. У порівнянні з раніше розробленими системами 3G радіоінтерфейс LTE забезпечить поліпшені технічні характеристики. Зокрема, в LTE ширина смуги пропускання може варіюватися від 1.25 МГц до 20 МГц, що дозволить задовольнити потребам різних операторів зв'язку, що мають різні смуги пропускання, при цьому LTE повинен буде одночасно підтримувати не менш 200 активних з'єднань (тобто 200 телефонних дзвінків) на кожні 5 МГц.

Так само очікується, що LTE поліпшить ефективність використання спектру частот, що призведе до збільшення кількості даних, переданих у заданому діапазоні частот. Радіоінтерфейс LTE позиціонується як рішення, на яке оператори будуть поступово переходити з нинішніх систем стандартів 3GPP і 3 GPP2 , а його розробка є важливим етапом у процесі переходу до мереж четвертого покоління 4G.

Таблиця 1 – Порівняння LTE з технологіями Wi-Fi і WiMAX

| Параметр                           | LTE                    | Wi-Fi  | Фікс. WiMAX   | Моб. WiMAX   |
|------------------------------------|------------------------|--|---|--|
| Стандарт                           | 3GPP Release 8         | IEEE 802.11  | IEEE802.16-2004   | IEEE 802.16e-2005                                      |
| Швидкість у нисхідному радіоканалі | 100Мбіт/с на 20 МГц    | Загальна швидкість 54Мбіт/с для 802.11 a/g<br>Більше 100Мбіт/с для 802.11n | 9,4Мбіт/с DL/<br>UL=3.<br>6,14Мбіт/с DL/UL=1 на 3.5 МГц     | 46Мбіт/с DL/<br>UL=3.<br>32Мбіт/с DL/UL=1 на 10 МГц    |
| Швидкість висхідного радіоканалу   | 50Мбіт/с на 20 МГц     | Загальна швидкість 54Мбіт/с для 802.11 a/g<br>Більше 100Мбіт/с для 802.11n | 6,5Мбіт/с DL/<br>UL=1.<br>3,3Мбіт/с DL/<br>UL=3. на 3.5 МГц | 7Мбіт/с DL/<br>UL=1.<br>4Мбіт/с DL/<br>UL=3. на 10 МГц |
| Смуга пропускання                  | Від 1.25 до 20МГц      | 20 МГц для 802.11 a/g<br>20/40 для 802.11n                                 | 3.5 і 7 МГц у смузі 3.5 ГГц<br>10МГц у смузі 5.8 ГГц        | 3.5,7,10 і 8,75 МГц                                    |
| Модуляція                          | BPSK,QPSK,16 QAM,64QAM | BPSK,QPSK,16 QAM,64QAM   | QPSK,16 QAM,64QAM   | QPSK,16 QAM,64QAM                                      |
| Мультиплексування                  | OFDMA/SC-FDMA          | CSMA   | TDM   | TDM/OFDMA  |
| Розподіл каналу                    | TDD/FDD                | TDD  | TDD/FDD   | TDD  |
| Частоти                            | 1.9-2.3ГГц             | 2.4 і 5 ГГц  | 3.5,5.8 і 11 ГГц  | 2.3,2.5 і 3.5 ГГц                                      |
| Покриття                           | До 5 км                | до 300 м   | 5-7 км  | До 3 км  |
| Мобільність                        | Висока                 | Низька   | Нема  | Середня  |

# 1 ЕТАПИ РОЗВИТКУ ТА ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LTE

Початком роботи 3GPP – Партнерські проекти по мережах третього покоління над подальшим розвитком цих мереж вважається семінар по еволюції RAN, проведений 2 - 3 листопада 2004 року в Торонто, Канада. Основними цілями й завданнями робіт з подальшого розвитку UMTS стали:

- 1) зниження собівартості на біт інформації;
- 2) збільшення кількості послуг з орієнтацією на вимоги абонентів;
- 3) підвищення гнучкості використання наявних і нових частотних діапазонів;
- 4) спрощення архітектури, відкритості інтерфейсів;
- 5) поліпшення раціонального споживання енергії абонентськими терміналами.
- 6) забезпечення єдиних параметрів стандартизації й виключення зайвих опцій.

Таким чином, головними цілями еволюції систем є подальше поліпшення якості надання послуг і зменшення витрат користувачів, а також і експлуатаційних витрат операторів.

Основні етапи розвитку технології LTE представлені на рисунку 1.1:

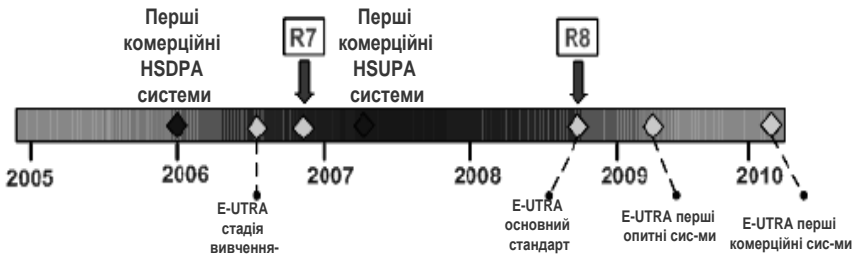


Рисунок 1.1 – Основні етапи розвитку технології LTE

Розробка технології LTE почалася наприкінці 2004 року. Основною метою досліджень на даному етапі був вибір технології фізичного рівня, що змогла б забезпечити високу швидкість передачі даних. У якості основних були запропоновані два варіанти: розвиток існуючого радіоінтерфейсу – WCDMA (використовуваного в HSPA) і створення нового на основі технології OFDM. У результаті проведених досліджень єдиною технологією, що задовольняє вимогам, поставленими перед LTE, виявилася технологія OFDM, і в травні 2006 року в 3GPP був прийнятий перший стандарт на радіоінтерфейсі Evolved UMTS Terrestrial Radio Access ( E-UTRA). Подальший розвиток технології LTE триває й донині.



Стандарт LTE спроектований, щоб задовольнити наступним вимогам:

1. Підтримувати смуги пропускання 1.25, 2.5, 5.0, 10.0 і 20.0 МГц.
2. Забезпечити максимальну швидкість передачі:
  - а) нисхідного трафіку до 100 Мбіт/з на канал в 20 МГц;
  - б) висхідного трафіку до 50 Мбіт/з на канал в 20 МГц;
3. Підтримувати антенні конфігурації:
  - а) для нисхідної лінії зв'язку 4x2, 2x2, 1x2, 1x1;
  - б) для висхідної лінії зв'язку 1x2, 1x1;
4. Мобільність:
  - а) оптимальна робота на низьких швидкостях руху (<15 км/ч);
  - б) висока ефективність на швидкостях руху до 120 км/год;
  - в) підтримувати сполука на швидкостях до 350 км/год;
5. Зона покриття:
  - а) відмінна чутність на відстані до 5 км;
  - б) слабке зниження сигналу на відстанях від 5 до 30 км;
  - в) робота на відстанях до 100 км не заборонена стандартом;
6. Можливість роботи в режимах FDD і TDD.

При розробці стандарту LTE були використані наступні основні технології:

1. Схеми мультиплексування на основі OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing):
  - а) OFDMA - для нисхідного каналу;
  - б) SC-FDMA - для висхідного каналу;
2. Багатоантенні рішення (MIMO) (Multiple Input - Multiple Output).
3. Нова архітектура системи (SAE) (System Architecture Evolution).

## 2 ПРИНЦИПИ ОРГАНІЗАЦІЇ НИСХІДНОГО РАДІОКАНАЛУ

### 2.1 Формування OFDM

В основу організації нисхідного (downlink) радіоканалу LTE покладена технологія OFDM з передачею даних по ряду вузькосмугових піднесучих. На сьогоднішній день дана технологія знайшла широке застосування в таких технологіях як Wi-Fi, WiMAX і DVB, за рахунок її стійкості до багатопроменевої інтерференції, і високої ефективності використання радіочастотного спектру. На рисунку 2.1 показано частотно-часове представлення OFDM сигналу. Вхідний потік даних залежно від стану радіоканалу перетворюється в QPSK, 16QAM, або 64QAM символи, які паралельно передаються по ряду вузьких ортогональних піднесучих. Відстань між сусідніми піднесучими 15 кГц. У часовій області, перед кожним символом додається циклічний префікс CP (Cyclic Prefix). Циклічний префікс являє собою кінець переданого символу, і використовується на прийомній стороні для виявлення й згладжування збурювань, що виникають через багатопроменеву інтерференцію.

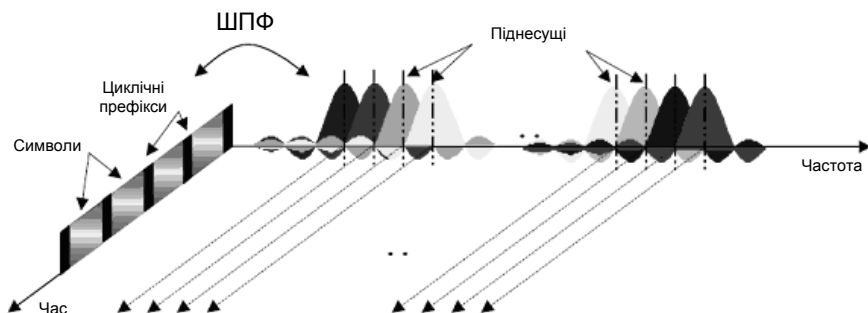


Рисунок 2.1 – OFDM-послідовність

Технологія ортогонального частотного мультиплексування OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) заснована на формуванні багаточастотного сигналу, що складається з піднесучих частот, що відрізняються на величину  $\Delta f = \frac{|\omega_n - \omega_{n-1}|}{2\pi}$ , обрану з умови ортогональності сигналів на сусідніх піднесучих ( $\omega_n$  – радіальна частота n-го піднесучого коливання).

При формуванні OFDM сигналу потік послідовних інформаційних символів тривалістю  $T_u/N$  розбивається на блоки, що містять  $N$  символів. Далі блок послідовних інформаційних символів перетворюється в

паралельний, у якому кожний із символів відповідає певній піднесучій багаточастотного сигналу. При цьому тривалість символів збільшується в  $N$  раз. Таким чином, сумарна ширина спектру багаточастотного сигналу відповідає ширині спектру вихідного послідовного сигналу.

Метою такого перетворення є захист від вузькосмугових завад (або від часткових перекручувань спектру в результаті перевідбиттів і багатопроменевого поширення). Це досягається тим, що паралельні символи багаточастотного сигналу являють собою кодове слово завадостійкого коду (наприклад, коду Ріда-Соломона), що дозволяє їх відновити у випадку помилкового прийому за рахунок перекручувань спектра. Перетворення сигналу з часової в частотну область забезпечується дискретним перетворенням Фур'є (DFT - Discrete Fourier Transform).

Крім того, перевага OFDM полягає в зменшенні необхідної кількості часових захисних інтервалів. При послідовному сигналі захисні інтервали додаються між кожними символами, а при багаточастотному - між групами символів (OFDM-Символами). Особливості сигналів OFDM:

- 1) Мультиплексування несучих коливань, модульованих інформаційними символами за обраним законом (QPSK, 16QAM, 64QAM);
- 2) Піднесучі є ортогональними (взаємна кореляційна функція дорівнює нулю), або, принаймні, квазіортогональними (на практиці);
- 3) Кожний OFDM-Символ має захисний часовий інтервал для виключення межсимвольної інтерференції. Цей захисний інтервал вибирається з урахуванням імпульсної характеристики лінії зв'язку (фізичного середовища поширення радіосигналу).

Принцип формування OFDM-сигналу представлено на рисунку 2.2.

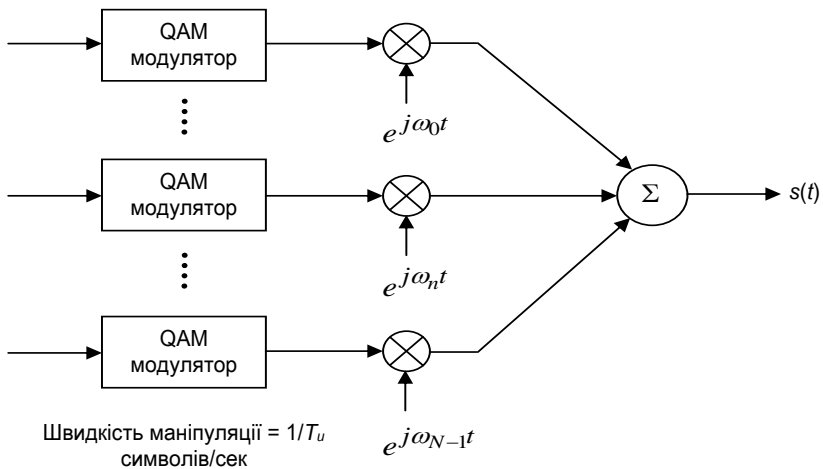


Рисунок 2.2 – Принцип формування OFDM-сигналу.

На практиці при формуванні OFDM-сигналу використовується зворотне дискретне швидке перетворення Фур'є (Inverse Fast Fourier Transform -IFFT) на  $N$  крапок (рисунок 2.3). Це значно спрощує практичну реалізацію прийомопередаючого пристрою OFDM.

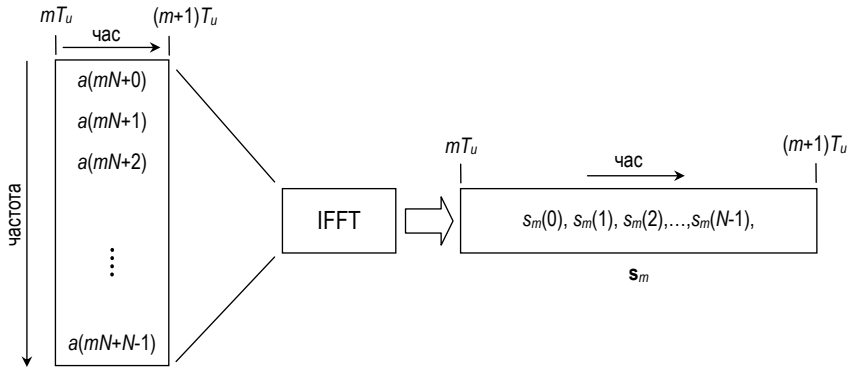


Рисунок 2.3 – Використання перетворення IFFT при формуванні OFDM-сигналу

На рисунку 2.4 під  $a(m+n)$  позначено модульований символ  $n$ -го частотного підканалу тривалістю  $T_u$  в інтервалі часу  $mT_u < t < (m+1)T_u$ . Вектор  $s_m$  на виході IFFT являє собою OFDM-Символ. Схема формування OFDM-Символу в передавачі базової станції мережі E-UTRAN показана на рисунку 2.4.

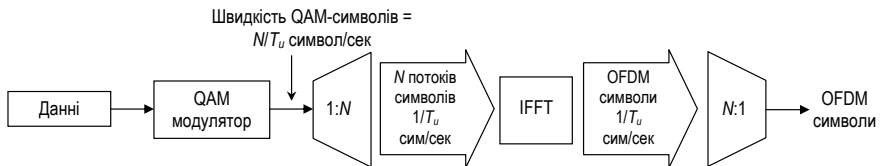


Рисунок 2.4 – Схема формування OFDM-Символу в передавачі базової станції мережі E-UTRAN.

Схема формування OFDM сигналів у режимі TDD використовує циклічні префікси CP (Cyclic-Prefix) для боротьби з межсимвольною інтерференцією із тривалістю TCP  $\approx 4.7/16.7$  мкс (при рознесенні піднесучих на 15 кГц). Часові відрізки (кадри тривалістю 10 мс) складаються з 20 підкадрів однакової тривалості  $T_{sub-frame} = 0.5$  мс. Параметри сигналів OFDM лінії «вниз» у режимі TDD наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри сигналу OFDM/OQAM нисхідного каналу

|  |          |   |  |  |   |   |  |
|--|----------|---|--|--|---|---|--|
| Смуга сигналу BW, МГц                              |          | 1.25                                    | 2.5                                      | 5  | 10                                      | 15  | 20   |
| Тривалість підкадру                                |          | 0.5 мс                                  |  |  |   |   |  |
| Частотне рознесення піднесучих                     |          | 15 кГц                                  |  |  |   |   |  |
| Частота дискретизації (тактова частота), МГц       |          | 1.92<br>(1/2 × 3.84)                    | 3.84                                     | 7.68<br>(2 × 3.84)                       | 15.36<br>(4 × 3.84)                     | 23.04<br>(6 × 3.84)                       | 30.72<br>(8 × 3.84)                        |
| Розмір перетворення FFT                            |          | 128                                     | 256                                      | 512                                      | 1024                                    | 1536                                      | 2048                                       |
| Кількість піднесучих                               |          | 76                                      | 151                                      | 301                                      | 601                                     | 901                                       | 1201                                       |
| Кількість OFDM символів у підкадрі (Short/Long CP) |          | 7/6                                     |  |  |   |   |  |
| Довж. CP, мкс/samples                              | Короткий | $(4.69/9) \times 6, (5.21/10) \times 1$ | $(4.69/18) \times 6, (5.21/20) \times 1$ | $(4.69/36) \times 6, (5.21/40) \times 1$ | $(4.69/72) \times 6, 5.21/80) \times 1$ | $(4.69/108) \times 6, 5.21/120) \times 1$ | $(4.69/144) \times 6, (5.21/160) \times 1$ |
|  | Довгий   | (16.67/32)                              | (16.67/64)                               | (16.67/128)                              | (16.67/256)                             | (16.67/384)                               | (16.67/512)                                |

## 2.2 Структура кадру Downlink

Для одночасної роботи в радіоканалі декількох передавальних пристроїв необхідно забезпечити поділ частотно-часового ресурсу. Наприклад, у стеці протоколів 802.11 доступ до каналу забезпечується на основі множинного доступу з виявленням несучої (CSMA). Кожний пристрій перед початком передачі сканує активність у каналі. Якщо середовище передачі не зайняте, то пристрій починає зменшувати довільно обраний лічильник відстроочки backoff (це зменшує ймовірність одночасної передачі двома пристроями). Лічильник продовжує зменшуватися доти, поки середовище залишається не зайнятим. Коли лічильник відстроочки досягає нуля, пристрій починає передачу кадру фізичного рівня (рисунок 2.5). Спочатку передається преамбула (PHY preamble), необхідна для синхронізації передавального й приймаючого пристроїв, далі, заголовок фізичного рівня (PHY header) і дані (Data), перетворені в OFDM символи. При цьому під час передачі вся смуга пропускання каналу використовується передавальною станцією. У випадку успішної передачі, приймаюча станція відповідає позитивно квитанцією ACK. У випадку ж виникнення колізії (коли в каналі одночасно передають дві або більше станції) спроба передачі повторюється.

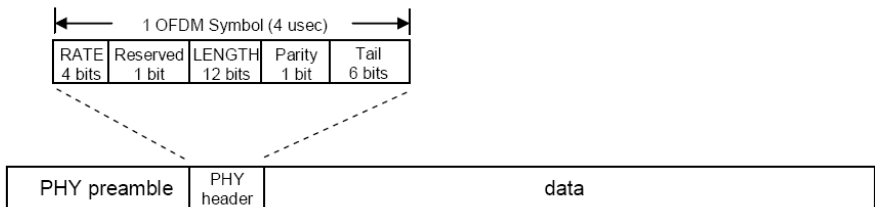


Рисунок 2.5 – Структура кадру протоколу 802.11.

Слід зазначити, що ефективність систем, побудованих на основі CSMA, становить близько 50 відсотків. Іншими словами при номінальній швидкості в 54 Мбіт/с – реальна швидкість передачі складає 25-30 Мбіт/с. Насамперед це пов'язано з неможливістю повністю усунути виникнення колізій. У випадку виникнення колізії канал простоює досить тривалий час і передача загубленого кадру повторюється, що досить різко знижує пропускну здатність і збільшує затримку при передачі даних. Наявність у кожному кадрі преамбули й випадкового часу відстроочки також зменшують ефективність використання радіоресурсу. У зв'язку із цим для організації нисхідного каналу LTE була запропонована нова схема мультиплексування Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA), побудована на основі технології OFDM.

Основна ідея OFDMA полягає в тому, що кожному абонентові виділяється деяка кількість піднесучих на певний проміжок часу. У специфікаціях LTE це називається фізичними ресурсними блоками (PRBs).

Таким чином, PRBs мають як часову розмірність, так і частотну. Виділення ресурсних блоків здійснюється функцією планування на базовій станції (eNode).

Щоб зрозуміти загальні принципи роботи OFDMA, розглянемо більш докладно структуру кадру нисхідного каналу LTE. На рисунку 2.6 показана структура кадру для випадку дуплексного зв'язку із частотним поділом каналів (FDD).

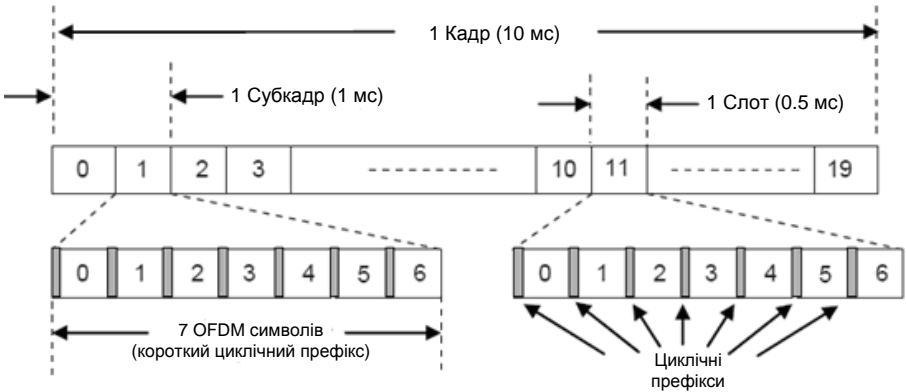


Рисунок 2.6 – Загальна структура кадру LTE.

Як видно з рисунку 2.6, тривалість кадру LTE – 10 мс. Кожний кадр ділиться на 10 субкадрів по 1 мс. У свою чергу кожен субкадр складається із двох слотів, тривалістю по 0.5 мс кожного. Слоти складаються з 6 або 7 OFDM символів, залежно від того якої використовується циклічний префікс (CP) – звичайний або розширений.

Загальна кількість доступних піднесучих залежить від ширини смуги пропускання каналу. У специфікаціях LTE ширина каналу може варіюватися від 1.25 до 20.0 МГц. Фізичний ресурсний блок (PRB) складається з 12 послідовних піднесучих тривалістю в один слот (0.5 мс). PRB є мінімальним ресурсним елементом виділюваним планувальником базової станції.

Переданий сигнал можна представити у вигляді частотно-часової ресурсної сітки (рисунок 2.7). Кожна чарунка сітки являє собою окрему піднесучу тривалістю в один символ і називається ресурсним елементом.

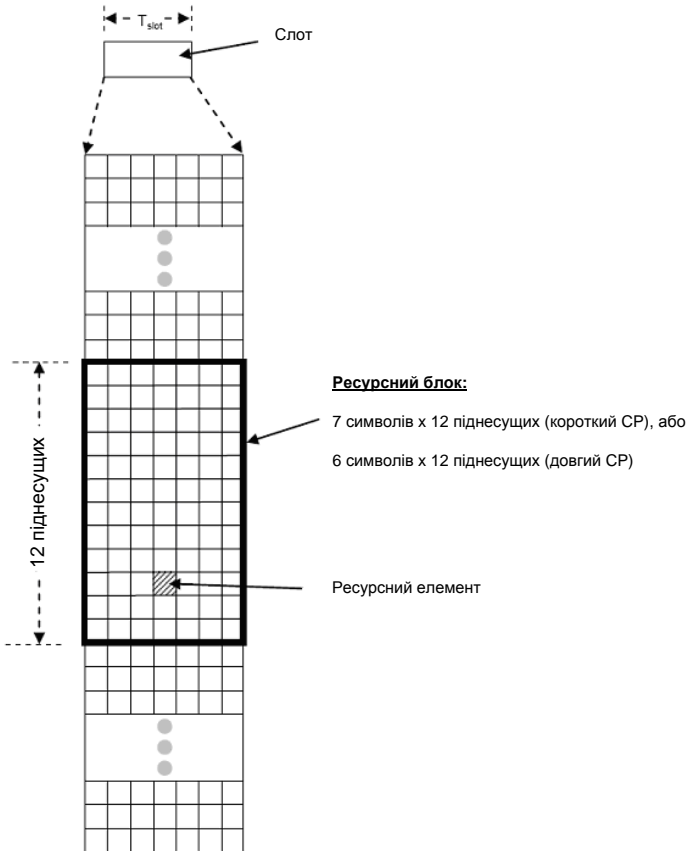


Рисунок 2.7 – Ресурсна сітка нисхідного каналу

На відміну від пакетних мереж, в LTE немає фізичної преамбули, що необхідна для синхронізації й оцінки зсуву несучої. Замість цього, у кожний ресурсний блок додаються опорні сигнали. Опорні сигнали передаються під час першого й п'ятого OFDM символу кожного слоту у випадку використання короткого циклічного префікса CP, і під час першого й четвертого OFDM символу – у випадку довгого префікса.



## 2.3 Фізичні канали Downlink

В LTE існує три фізичних канали. Загальна особливість фізичних каналів полягає в тому, що всі вони передають інформацію з вищих рівнів в LTE стек. Це головна відмінність від фізичних сигналів, які передають інформацію, використовувану винятково в рамках РНУ рівня.

Фізичні канали LTE:

1. Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)
2. Physical Downlink Control Channel (PDCCH)
3. Common Control Physical Channel (CCPCH)

Будь-який фізичний канал визначає алгоритми для:

1. Скремблінг
2. Модуляція
3. Layer mapping
4. Призначення ресурсного елемента

**Physical Downlink Shared Channel** - Розподілений транспортний фізичний канал. PDSCH в основному використовується для передачі даних і мультимедійних повідомлень. Тому він розроблений з урахуванням дуже високих швидкостей передачі даних. Використовується модуляція QPSK, 16QAM і 64QAM і просторове мультиплексування. Фактично просторове мультиплексування є унікальною особливістю PDSCH, воно не використовується ні в PDCCH, ні в CCPCH.

**Physical Downlink Control Channel** - Фізичний канал керування. PDCCH передається керуюча інформація. Надійність, а не максимальна швидкість, є завданням цього каналу. Для даного каналу, єдиний доступний вид модуляції - QPSK. Ресурсні елементи PDCCH займають перші три символи OFDM у першому слоті субкадру.

**Common Control Physical Channel** - Загальний фізичний канал керування. CCPCH містить інформацію контролю всього осередку. Як і в PDCCH основною прерогативою є надійність, тому єдиний доступний вид модуляції QPSK. Крім того, CCPCH передається наскільки можливо близько до несучої частоти. Інформація CCPCH передається винятково на 72 активні піднесучі. Керуюча інформація втримується на ресурсних елементах (k,l), де до відноситься до OFDM символу в межах кадру, а l характеризує піднесучу.

Зв'язок транспортних і фізичних каналів показана на рисунку 2.8. E-UTRAN для LTE визначені чотири транспортних канали:

1. BCH (Broadcast Channel) - віщальний канал;
2. PCH (Paging Channel) - канал виклику (пейджинга);
3. DL-SCH (Downlink Shared Channel) - сполучений канал лінії «вниз»;
4. MCH (Multicast Channel) - канал віщання в групі.

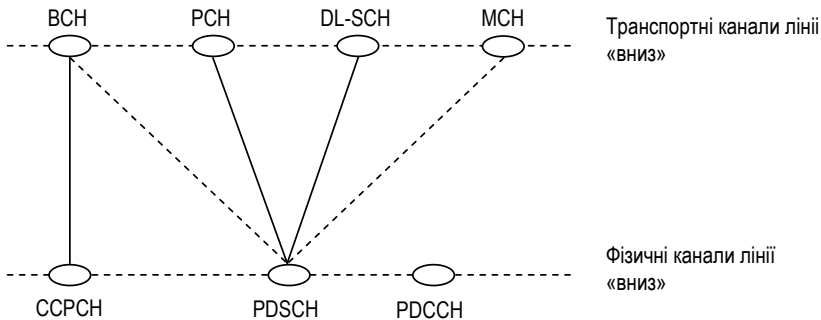


Рисунок 2.8 – Зв'язок транспортних і фізичних каналів у лінії «вниз» E-UTRA

Як видно з рисунку 2.8, розвиток мереж LTE спрямовано на максимальне спрощення протоколів обміну інформацією.

## 2.4 Фізичні сигнали

Фізичні сигнали використовують призначені їм ресурсні елементи. Однак, на відміну від фізичних каналів, фізичні сигнали не передають інформацію вищим рівням. Є два типи фізичних сигналів:

1. Опорні сигнали, які використовуються для визначення відгуку імпульсу каналу
2. Сигнали синхронізації, які передають інформацію синхронізації

### 2.4.1 Опорні сигнали

Опорні сигнали генеруються шляхом перемноження ортогональної послідовності й псевдовипадкового числового (PRN) ряду. У цілому, існує 510 унікальних опорних сигналів. Опорні сигнали привласнюються кожному осередку в межах мережі, і виконує функції ідентифікатора для осередку.

Слід зазначити, що опорні сигнали передаються через кожні шість піднесучих. Більше того, вони зміщені як за часом, так і по частоті. При цьому реакція каналу для піднесучих, на яких розташовуються опорні сигнали, може бути визначена прямо. У той час як для інших піднесучих, реакція каналу визначається за допомогою інтерполяції.

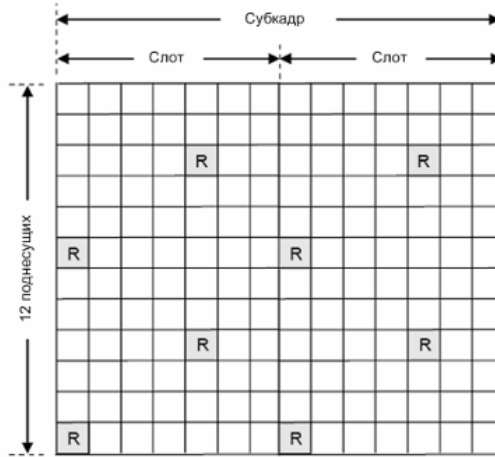


Рисунок 2.9 – Розташування опорних сигналів у спадному каналі.

#### 2.4.2 Сигнали синхронізації

Сигнали синхронізації використовують той же самий тип псевдовипадкових ортогональних послідовностей, як і опорні сигнали. Вони підрозділяються на первинні й вторинні сигнали синхронізації, у залежності, від того, як вони використовуються під час процедура пошуку. І первинні й вторинні сигнали передаються на 72 зосереджених піднесучих, в 0-их і 10-их осередках структури субкадру.

### 3 ПРИНЦИПИ ОРГАНІЗАЦІЇ ВИСХІДНОГО РАДІОКАНАЛУ

Основним недоліком OFDMA сигналу є його високе співвідношення пікової й середньої потужності (PAR). Для його реалізації потрібні досить потужні підсилювачі, що на сьогоднішній день досить складно реалізовано в мобільних пристроях з низькою потужністю й низьким зарядом батареї. У зв'язку із цим для висхідного (Uplink) каналу LTE була запропонована нова технологія – SC-FDMA (Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access). Таке рішення забезпечує менше відношення максимального й середнього рівнів потужності в порівнянні з використанням звичайної модуляції OFDM, у результаті чого підвищується енергофактивність термінальних пристроїв і спрощується їхня конструкція.

Розглянемо більш докладно, як відбувається формування SC-FDMA сигналу. Передавач і приймач OFDMA і SC-FDMA сигналів мають схожу функціональну структуру (рисунок 3.1)

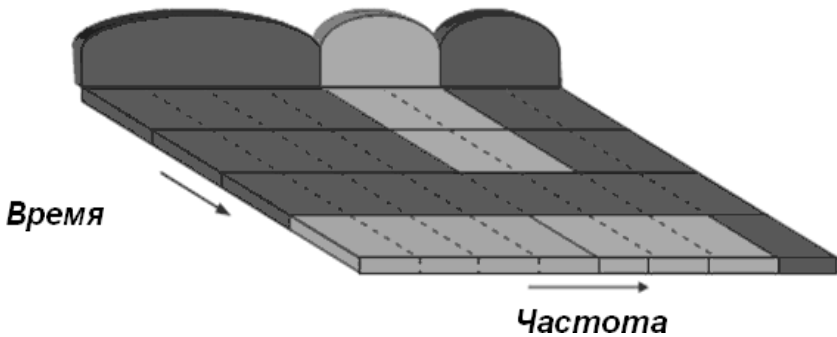
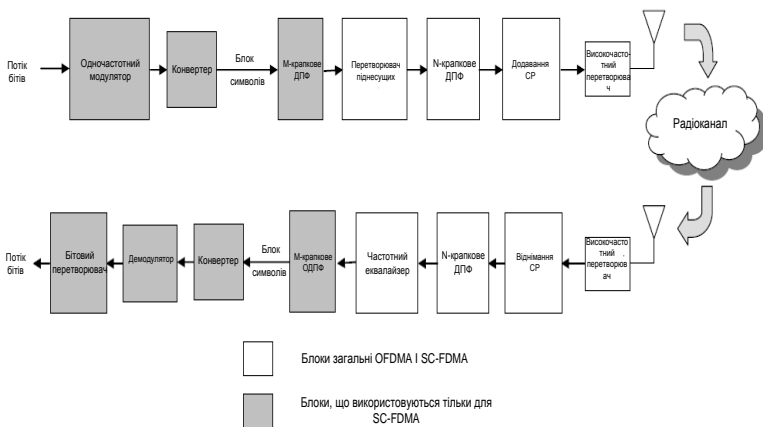


Рисунок 3.1 – SC-FDMA частотно-тимчасова структура у висхідній лінії зв'язку



**Рисунок 3.2 – Функціональна структура OFDMA, SC-FDMA передавача й приймача**

Передавач складається з наступних функціональних блоків:

1. Одночастотний модулятор: перетворює вхідний потік бітів в одночастотні символи (BPSK, QPSK, або 16 QAM, залежно від стану радіоканалу)
2. Конвертор: формує блок з  $M$  символів ( $M < N$  – числа піднесучих, використовуваних у радіоканалі) і подає їх на вхід  $M$ -Крапкового ДПФ.
3.  $M$ -розрядне Дискретне Перетворення Фур'є: перетворює блок символів з часової області в частотну
4. Перетворювач піднесучих: розподіляє вихідні символи ДПФ по  $N$  піднесучих. В SC-FDMA піднесучі розподіляються двома способами: локалізовано й розподілено (рисунок 3.3). У випадку розподіленого способу - інформація від кожного абонента розміщена у всьому спектрі сигналу, тому даний спосіб стійкий до частотно-вибірною завмирання. З іншого боку, у випадку локалізованого способу, можливо, визначити смугу, у якій для даного абонента досягається максимальна стійкість каналу до завмирань. А так як області завмирання сигналу для всіх абонентів різні, то можливе досягнення загальної максимальної ефективності використання радіоканалу. Більш докладно функції диспетчеризації описані нижче.
5.  $N$ -розрядне Зворотне Дискретне Перетворення Фур'є: перетворює сигнал із частотної області в часову
6. Додавання CP: формується аналоговий сигнал і до кожному SC-FDMA (OFDMA) символу додається циклічний префікс
7. Високочастотний перетворювач: спектр сигналу переноситься на несучу частоту й передається в ефір.

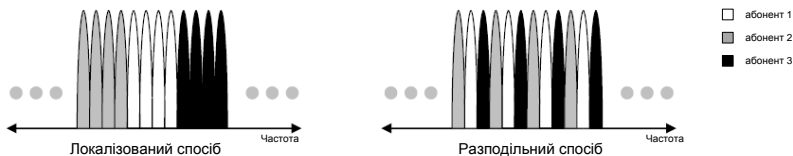


Рисунок 3.3 – Способи розподілу піднесучих в SC-FDMA

На прийомній стороні процес відбувається у зворотному напрямку. Головна відмінність SC-FDMA від OFDMA полягає в тому, що в OFDMA інформаційні символи передаються паралельно (кожний по своїй піднесучій), у той час як в SC-FDMA, кожний SC-FDMA символ складається з “підсимволів”, які представляють собою модульовані дані. Як видно з наведеної вище схеми, формування SC-FDMA сигналу відбувається за допомогою дискретного перетворення Фур'є, тому дану технологію в літературі іноді називають одночастотною технологією передачі інформації у вигляді OFDM, розподіленої за законом дискретного перетворення Фур'є (Discrete Fourier Transform Spread OFDM).

Як приклад, на рисунку 3.4 показаний розподіл послідовності QPSK символів по частоті й у часі при використанні різних способів модуляції. При використанні OFDMA інформаційні символи передаються паралельно. У цьому випадку на 4 піднесучих, паралельно передаються 4 символи. Тривалість кожного символу 66.7 мкс, а відстань між сусідніми піднесучими 15 кГц.

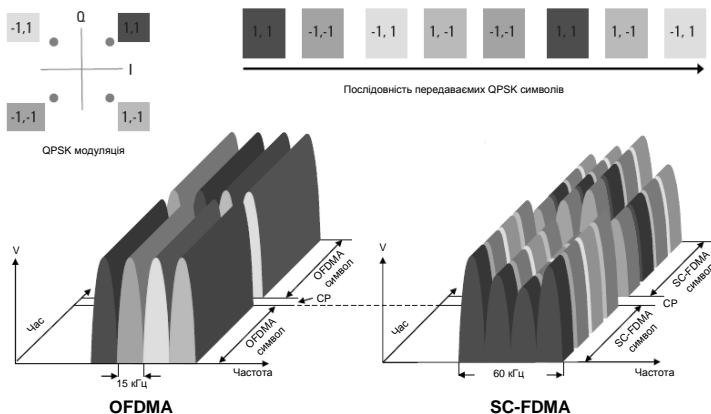


Рисунок 3.4 – Відмінність між OFDMA і SC-FDMA при передачі послідовності QPSK символів

На відміну від OFDMA в SC-FDMA (права половина рисунка) інформаційні символи передаються послідовно в часі, але в більше широкому частотному діапазоні (у нашому прикладі 4x15кГц), при цьому OFDMA і SC-FDMA символи мають однакову тривалість 66.7 мкс.

Структура кадру висхідного радіоканалу LTE з використанням FDD така ж, як і у випадку нисхідного каналу. Ресурсні блоки складаються з 12 послідовних піднесучих тривалістю в один слот. Кожному абонентові мережі для передачі даних від базової станції за допомогою функції планування на певний час виділяється деяка кількість ресурсних блоків. Розклад передається абонентам по службових каналах у спадному радіоканалі.

### 3.1 Фізичні канали Uplink

Висхідний канал E-UTRAN передбачає використання наступних фізичних каналів:

1. PRACH (Physical random access channel) - фізичний канал довільного (випадкового) доступу;
2. PUCCH (Physical uplink control channel) - фізичний канал керування лінії «вгору»;
3. PUSCH (Physical uplink shared channels) - фізичний розподілений транспортний канал лінії «вгору».

Зв'язок транспортних і фізичних каналів показана на рисунку 3.5. У цей час в E-UTRAN для LTE визначено два транспортних канали лінії «вгору»:

1. RACH (Random Access Channel) - канал випадкового доступу;
2. UL-SCH (Uplink Shared Channel) - розподілений канал лінії

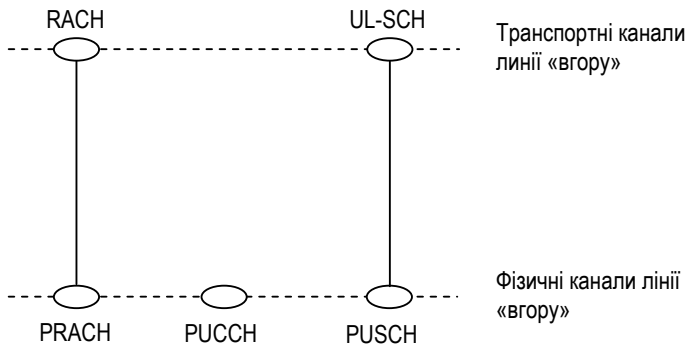


Рисунок 3.5 – Зв'язок транспортних і фізичних каналів у лінії «нагору» E-UTRAN

## 4 MAC РІВЕНЬ

Об'єкти MAC рівня E-UTRA розділяють на два типи: один у користувальницькому встаткуванні (UE), іншої в E-UTRAN. MAC об'єкти передаються по наступних транспортних каналах:

1. Broadcast Channel (BCH)
2. Downlink Shared Channel (DL-SCH);
3. Paging Channel (PCH);
4. Uplink Shared Channel (UL-SCH);
5. Random Access Channel (RACH).

Функції, виконувані MAC об'єктами в користувальницькому встаткуванні й в E-UTRAN різні. На рисунку 5.1 показано можливу структуру MAC об'єктів з боку користувальницького встаткування.

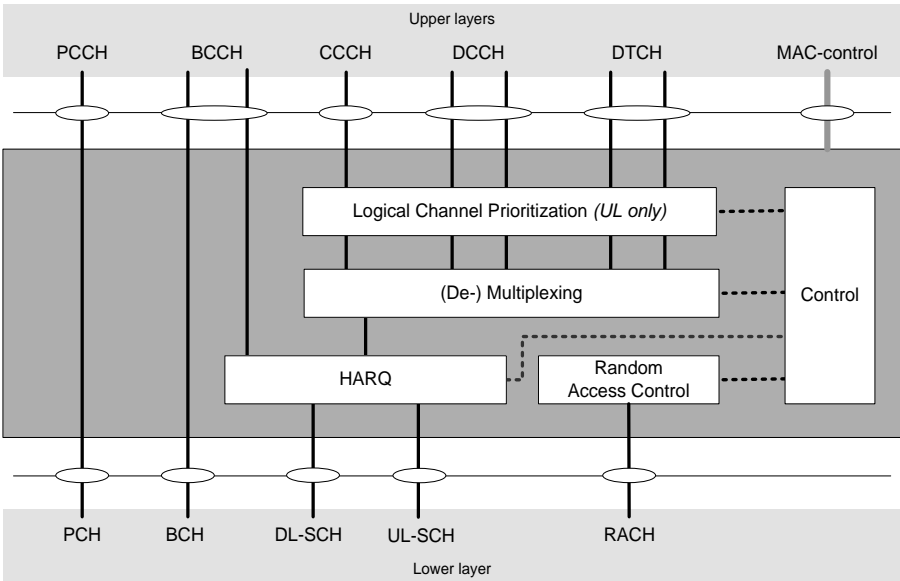


Рисунок 4.1 –MAC структура з боку користувальницького встаткування



## 4.1 Функції MAC рівня

Наступні функції виконуються MAC рівнем:

1. Мапінг між логічними й транспортними каналами
2. Мультиплексування
3. Демультиплексування
4. Усунення помилки через HARQ
5. Обробка пріоритету між UE за допомогою динамічного планування
6. Обробка пріоритету між логічними каналами одного UE
7. Керування пріоритетами логічних каналів
8. Вибір формату передачі.

Таблиця 4.1 – MAC функції і їхнє застосування в різних каналах

| Функція   | UE | eNB | Downlink | Uplink |
|---|----|-----|----------|--------|
| Мапінг між логічними й транспортними каналами                 | X  |     | X        | X      |
|   |    | X   | X        | X      |
| Мультиплексування   | X  |     |          | X      |
|   |    | X   | X        |        |
| Демультиплексування   | X  |     | X        |        |
|   |    | X   |          | X      |
| Усунення помилки через HARQ                                   | X  |     | X        | X      |
|   |    | X   | X        | X      |
| Вибір формату передачі  |    | X   | X        | X      |
| Обробка пріоритету між UE за допомогою динамічного планування |    | X   | X        | X      |
| Обробка пріоритету між логічними каналами одного UE           |    | X   | X        | X      |
| Керування пріоритетами логічних каналів                       | X  |     |          | X      |

## 4.2 Логічні канали

MAC рівень забезпечує передачу даних по логічних каналах. Ряд логічних каналів перепризначений для різних видів передачі даних. Кожний тип логічних каналів визначає, яка інформація з нього передається. MAC містить керуючі канали, і канали трафіка як показаний у таблиці 4.2.

Таблиця 5.2 – Логічні канали

| Назва логічного каналу    | Скорочення | Керуючий канал | Канал трафіка |
|---------------------------|------------|----------------|---------------|
| Broadcast Control Channel | BCCH       | X              |               |
| Paging Control Channel    | PCCH       | X              |               |
| Common Control Channel    | CCCH       | X              |               |
| Dedicated Control Channel | DCCH       | X              |               |
| Dedicated Traffic Chanl   | DTCH       |                | X             |

Широкомовний канал керування BCCH використовується для передачі системних керуючих повідомлень у нисхідному каналі.

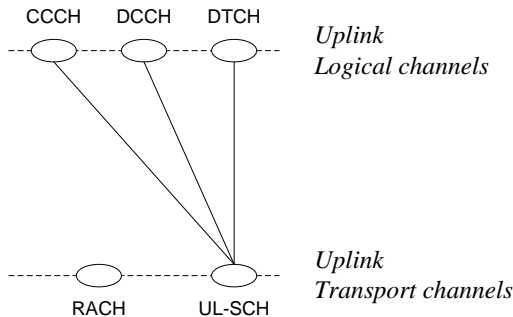
Канал керування пошуковими радіо викликами PCCH - для передачі пошукового радіо виклику (paging) у нисхідному каналі (використовується, якщо мережа не знає точного місця розташування абонента).

Загальний канал керування CCCH призначений для обміну інформацією між мережею й користувальницьким устаткуванням в обох напрямках.

DCCH виділений канал керування - двонаправлений канал для обміну керуючою інформацією між мережею й UE. (Установлюється процедурою RRC установлення зв'язку).

### 4.3 Мапінг логічних каналів

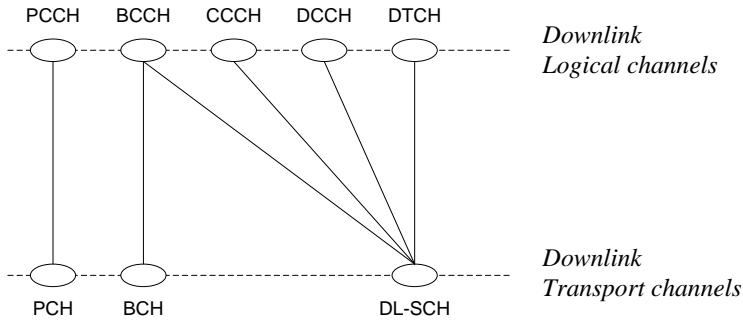
#### 4.3.1 Uplink



| Транспортний канал<br>Логічний канал | UL-SCH | RACH |
|--------------------------------------|--------|------|
| CCCH                                 | X      |      |
| DCCH                                 | X      |      |
| DTCH                                 | X      |      |

Рисунок 4.2– Мапінг логічних каналів uplink

### 4.3.2 Downlink



| Транспортний канал<br>Логічний канал | BCH | PCH | DL-SCH |
|--------------------------------------|-----|-----|--------|
| BCCH                                 | X   |     | X      |
| PCCH                                 |     | X   |        |
| CCCH                                 |     |     | X      |
| DCCH                                 |     |     | X      |
| DTCH                                 |     |     | X      |

Рисунок 4.3 – Мапінг логічних каналів downlink

## 4.4 MAC процедури

### 4.4.1 Процедура пошуку

Це процедура, відповідно до якої термінал знаходить стільник, для організації з'єднання. Як частина процедури пошуку стільника, термінал одержує ідентифікаційний номер. Крім того, процедура пошуку також забезпечує оцінку параметрів прийому системної інформації, так само вона містить набір параметрів необхідних для одержання доступу до системи. LTE підтримує 510 різних ідентифікаторів стільників, вони розділені на 170 груп, по трьох ідентифікатора в кожному стільнику.

Процедура пошуку в LTE здійснюється в кілька етапів. Для полегшення процедури використовуються первинні й вторинні сигнали синхронізації. Первинні й вторинні сигнали синхронізації - певні послідовності, вставлені в останні два символи OFDM у першому й п'ятому слоті нульового субкадру як показано на рисунку 4.4. На додаток до сигналів синхронізації, у процедурі пошуку можуть також використовуватися опорні сигнали.

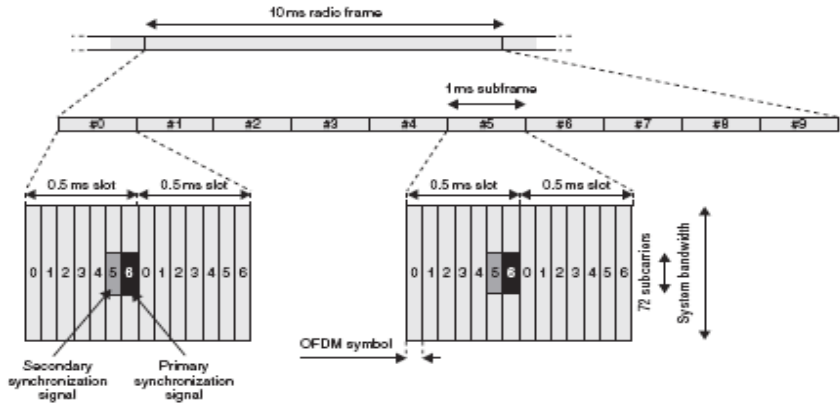


Рисунок 4.4 – Первинні й вторинні сигнали синхронізації

#### 4.4.2 Процедура пошуку стільників

На першому етапі процедури пошуку мобільний пристрій використовує первинні сигнали синхронізації. Варто відзначити, що первинні сигнали синхронізації передаються двічі в кожному кадрі, щоб спростити handover між іншими ситеми радіодоступу, наприклад GSM до LTE. Таким чином, первинний сигнал синхронізації може тільки надати часовий кадр тривалістю 5 мс.

Наступний крок – виявлення ідентифікатора стільника й визначення часової структури кадру. Це здійснюється за рахунок спостереження за парами слотів, де передаються вторинні сигнали синхронізації. Припустимо (s1,s2) – припустима пара з послідовності, де s1 і s2 представляють собою вторинний сигнал синхронізації в нульовому й п'ятому субкадрі, відповідно зворотна пара (s2,s1) не є правильною послідовністю. Використовуючи цю властивість, термінал може визначити синхронізацію кадру. Крім того, кожна комбінація – це один з ідентифікаторів стільників, використовуючи який термінал може одержувати відомості про псевдовипадкову послідовність використовуваної для генерації опорних сигналів у соте. Як тільки процедура пошуку завершена, термінал одержує інформацію системи, що містить такі параметри як смуга пропускання й т.д.

#### 4.4.3 Процедури випадкового доступу

Основна вимога для будь-якої стільникової системи це можливість установки з'єднання. Звичайно це називається випадковий доступ і задовольняє наступним двом вимогам в LTE:

- 1) установлення синхронізації uplink
- 2) установлення унікальності терміналу, C-RNTI

Таким чином, випадковий доступ використовується не тільки для первісного доступу, але так само й після періоду бездіяльності uplink, коли синхронізація втрачена.

Повна процедура випадкового доступу показана на рисунку 4.5, вона складається із чотирьох етапів:

1. Спочатку відбувається передача преамбули випадкового доступу, дозволяючи eNode оцінити синхронізацію передачі
2. Другий крок складається з передачі команди вдосконалення синхронізації, щоб коректувати синхронізацію передачі терміналу.
3. Передача мобільним терміналом повідомлення про ідентифікацію, використовуючи UL-SCH. Точний зміст цього повідомлення залежить від стану терміналу, особливо чи є даний термінал уже відомим цієї мережі.
4. У завершенні процедури передається повідомлення підтвердження рішення від мережі до терміналу по каналі DL-SCH. У цьому кроці так само приймаються рішення щодо безлічі терміналів, що намагаються одержати доступ, використовуючи однакові ресурси випадкового доступу.

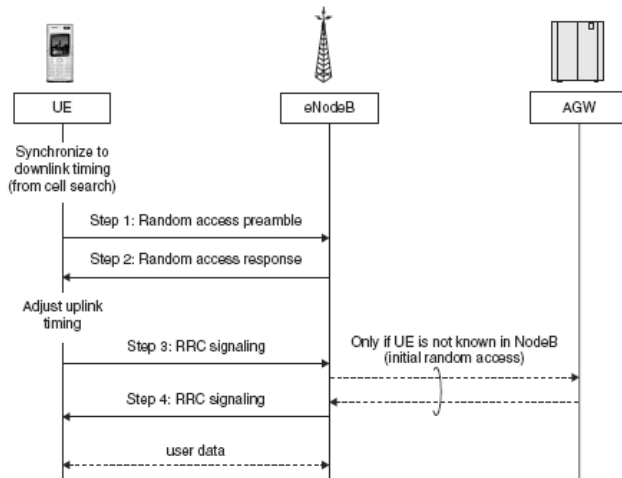


Рисунок 4.5 – Процедура випадкового доступу

## 4.5 Протоколи HARQ/ARQ

Для забезпечення надійної передачі інформації в технології LTE реалізована динамічна ефективна дворівнева система повторної передачі, що реалізує протокол Hybrid ARQ (Automatic Repeat Query), або HARQ зазначений протокол забезпечує з невеликими накладними витратами на зворотний зв'язок і повторну посилку даних, і доповнений високонадійним протоколом селективного повтору ARQ.

Протокол HARQ надає прийомному пристрою надлишкову інформацію, що дає йому можливість виправляти певну частину помилок. Повторні передачі по протоколі HARQ створюють додаткову інформаційну надмірність, потрібну в тому випадку, якщо для усунення помилок першої передачі виявилось недостатньо. Повторна передача пакетів, не виправлених протоколом HARQ, здійснюється за допомогою протоколу ARQ.

Дане рішення забезпечує малу затримку передачі пакетів з невеликими накладними витратами, при цьому надійність зв'язку гарантується. Більшість помилок виявляються й виправляються за допомогою протоколу HARQ. Тому повторна передача даних по протоколу ARQ (що пов'язане з більшими накладними витратами й підвищує час затримки передачі пакетів) відбувається лише зрідка

В Downlink HARQ є асинхронним. Коли блоки HARQ передаються, вони супроводжуються інформацією контролю, такий як ідентифікатор процесу HARQ, нова передача/повторна передача.

У цієї схеми є наступні переваги:

1. Повна гнучкість планування різних потоків даних відповідно до їхніх відповідних пріоритетів
2. Оскільки ресурси для процесів HARQ не визначені, блоки можуть бути змодульовані й закодовані відповідно до стану зв'язку.

В Uplink передача HARQ синхронна, це означає, що блоки HARQ визначені для передачі й повторної передачі. У такий спосіб для передачі в Uplink, немає ніякої потреби в передачі інформації контролю.

## **5 БАГАТОАНТЕННІ РІШЕННЯ**

Схеми, у яких використовується багато антен, незалежно від того чи йде мова про формування діаграми спрямованості, або про багаторівневу передачу, відіграють значну роль у збільшенні швидкості передачі даних, охопту і ємності. Досить великий потенціал, що забезпечує можливість використання просторового домена, у цей час ще не повністю використаний. Багаторівнева передача, відома і як багаторазовий вхід - багаторазовий вихід (MIMO - Multiple Input, Multiple Output), може використовуватися для збільшення швидкості передачі. У цьому випадку окремому користувачеві посилають паралельні потоки даних. Такі техніки, які, в основному, застосовні в сценаріях з високим відношенням між сигналом і шумом (SNR - Signal to Noise Ratio), і де радіоканал містить високе розсіювання у першу чергу використовуються в нисхідній лінії зв'язку. Термінал розділяє потоки даних, використовуючи для цього характеристики каналів, а також знання про кодову схему, що використовувала базова радіостанція. Багаторівневі схеми передачі у випадку LTE повинні бути стандартизовані. Одним з

багатообіцяючих підходів є вибірковий контроль швидкості по антені ( S-PARC - Selective Per-Antenna RateControl), що пристосовує число рівнів і швидкість передачі по окремому рівні відповідно до поточних умов радіоканалу.

Використання багатоантенної передачі інформації в системах мобільного зв'язку поліпшує технічні характеристики останніх і розширює їхні можливості в плані обслуговування абонентів. У технології LTE передбачені два методи багатоантенної передачі: рознесена (SDMA) і багатопоточна (MIMO), частим випадком якої є формування вузького радіопроміння (Beamforming).

В LTE рознесена передача заснована на методі просторово-частотного блокового кодування (SFBC), доповненого рознесенням за часом зі зрушенням частоти (FSTD) при використанні чотирьох антен. Рознесена передача застосовується в основному на загальних спадних каналах, у яких не можна використовувати функцію диспетчеризації залежно від стану каналу зв'язку.

При багатопоточній передачі для одночасного пересилання декількох потоків даних по тому самому радіоканалі використовують трохи передавальних і прийомних антен (на базовій станції мережі й у термінальному пристрої відповідно). Це значно підвищує максимальну швидкість передачі даних. Наприклад, при установці чотирьох антен на базовій станції й такому ж числі антен у термінальному пристрої (на прийомній стороні) можна одночасно пересилати до чотирьох потоків даних по тому самому радіоканалі, фактично збільшуючи його пропускну здатність у чотири рази.

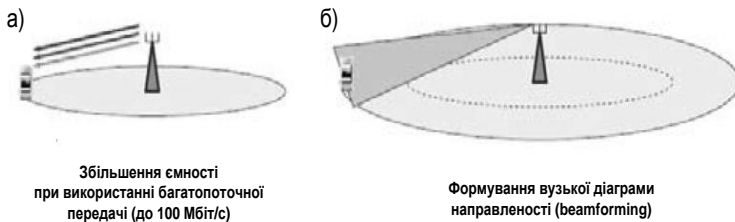


Рисунок 5.1 – Передові антенні рішення

У мережах з невеликим робочим навантаженням або маленькими стільниками багатопоточна передача дозволяє реалізувати дуже високу пропускну здатність радіоканалів і ефективніше використовувати радіоресурси. У випадку ж з більшими стільниками й досить інтенсивним навантаженням якість каналу не дає можливості використовувати багатопоточну передачу. Тоді з метою підвищення якості сигналу кілька

передавальних антен доцільніше задіяти для формування вузького променя (beamforming) при передачі одного потоку даних (рисунок 5.1).

Для досягнення гарної якості роботи мережі при різних умовах експлуатації в технології LTE реалізована адаптивна багатопоточна передача, при якій число потоків, що пересилаються одночасно, даних може постійно регулюватися відповідно до мінливого стану каналу зв'язку. Якщо стан каналу задовільний, можна одночасно пересилати до чотирьох потоків даних, досягаючи тим самим швидкості їхньої передачі до 100 Мбіт/с при ширині займаної смуги частот 20 МГц. При не настільки сприятливому стані каналу передається менше число потоків. У цій ситуації антени частково використовуються для формування вузької діаграми спрямованості, що підвищує загальну якість прийому й, як наслідок, збільшує пропускну здатність системи й розширює зону обслуговування (до 100-120 км). Для забезпечення великої зони радіопокриття або високої швидкості передачі даних на границі стільника можна передавати один потік даних у вузькому промені.

## **6 МЕРЕЖЕВА АРХІТЕКТУРА SAE**

Для переходу до мереж 3G LTE консорціумом 3GPP була запропонована нова мережна інфраструктура (System Architecture Evolution). Метою й сутністю концепції SAE є ефективна підтримка широкого комерційного використання будь-якої послуги на базі IP і забезпечення безперервного обслуговування абонента при його переміщенні між мережами, які відповідають і не відповідають специфікаціям 3GPP (GSM, UMTS, WCDMA і т.д.). Архітектура LTE/SAE знижує експлуатаційні й капітальні витрати. Нова, плоска модель, наприклад, означає, що буде потрібно підвищити пропускну здатність вузлів тільки двох типів базових станцій і шлюзів, щоб вони впоралися із трафіком у випадку його значного росту. Крім того, явно простежується тенденція до все більшого ступеня автоматизації.

SAE описує розподіл необхідних функцій до логічних вузлів і необхідні інтерфейси між вузлами. Необхідними функціями є функції доступу до радіомережі (RAN function). Однак у мобільній мережі так само існують додаткові функції, які потрібні для надання різних послуг: аутентифікація, необхідна для визначення дійсності абонента; установка послуг, необхідних, для того щоб гарантувати безперервне з'єднання й т.д. Як показано на рисунку. 6.1 системна архітектура розділена на дві частини: мережа радіодоступу (Radio access network, RAN) і core network (CN).



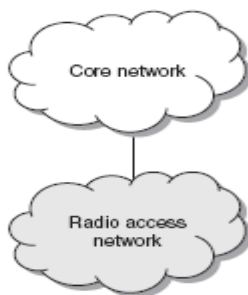


Рисунок 6.1 – Системна архітектура

**Функціональна розбивка між мережею радіодоступу й Core network(CN).**

У процесі розробки стандарту LTE першорядне завдання полягало в тому, щоб розподілити функції між мережею радіодоступу RAN і CN. Хоча на перший погляд це може здатися відносно простим завданням, практично виявляється інакше. Більшість функцій може легко бути розташовано або в RAN або в CN, однак є деякі функції, що вимагають більше ретельної уваги.

Ключова особливість розробки RAN складається в мінімізації кількості вузлів і в пошуку рішення, де RAN складається тільки з одного типу вузла. У той же час особливість CN полягає в як можна більшій незалежності від RAN.

**Функції RAN:**

1. кодування, модуляція й інші типові функції фізичного рівня
2. ARQ
3. функції безпеки (шифрування й т.д.)
4. керування радіо ресурсами, хендоовер

**Функції CN:**

1. керування піднесучих
2. керування рухливістю (спостереження за користувачами - роумерами)
3. керування односпрямованим каналом і обробка якості послуг
4. конфіденційність користувальницьких потоків даних
5. з'єднання із зовнішніми мережами

**Основними принципами архітектури LTE/SAE є:**

1. загальна опорна точка й вузол шлюзу (GW) для всіх технологій доступу;
2. оптимізована архітектура для площини користувача - початок переходу на знижену кількість типів вузлів (із чотирьох до двох - базові станції й шлюзи);
3. протоколи на базі IP у всіх інтерфейсах;
4. поділ функцій RAN-CN, аналогічний поділу у випадку WCDMA/HSPA;

5. поділ у площинах керування/користувача між системою керування мобільністю (MME) і шлюзом;

6. інтеграція технологій доступу, що не ставляться до 3GPP, за допомогою IP для мобільного зв'язку.

Нижче представлена спрощена схема загальної архітектури SAE. Шлюз здатний виконувати функції мережі пакетних даних (PDN) і обслуговуючого шлюзу, при цьому може бути настроєний як на кожну із цих ролей, так і на обидві. PDN-Шлюз служить загальною опорною точкою для всіх технологій доступу, забезпечуючи стабільну IP-точку присутності для всіх користувачів поза залежністю від мобільності. Функціонально MME відділений від шлюзу для полегшення розгортання мережі, для переходу на незалежну технологію й для максимально гнучкої масштабованості пропускну здатності.

GSM і WCDMA/HSPA інтегруються в SAE за допомогою стандартизованих інтерфейсів, що з'єднують вузол SGSN (обслуговуючий вузол підтримки GPRS) і вдосконалену опорну мережу. Сюди входять інтерфейси з MME для передачі контексту й установки каналів при переміщенні між технологіями доступу, а також зі шлюзом для установки IP-З'єднання з користувальницьким устаткуванням. Так що для терміналів GSM і WCDMA/HSPA вузол шлюзу функціонує в якості GGSN (вузла підтримки шлюзу GPRS). Дана архітектура дозволяє також створювати загальну опорну пакетну мережу для GSM, WCDMA/HSPA і LTE шляхом з'єднання SGSN і.

Сервер абонентів власної мережі (Home Subscriber, Server, HSS) підключається до пакетної опорної мережі через інтерфейс, що, швидше за все, буде базуватися на протоколі Diameter (сеансовий протокол, забезпечує взаємодію між клієнтами з метою аутентифікації, авторизації й обліку різних сервісів (AAA- authentication, authorization, accounting, в основі протоколу DIAMETER лежить концепція в створенні базового протоколу з можливістю його розширення для надання сервісів AAA з появою нових технологій доступу.), а не на SS7. Це дозволить створити уніфіковане й більше просте рішення для площини керування в IP-Мережі, оскільки мережна сигналізація для керування правилами й тарифікації вже базується на протоколі Diameter.

Базові станції LTE підключаються до опорної мережі через інтерфейс RAN-CN. MME обробляє сигнали керування, наприклад для мобільності. Користувальницькі дані пересилаються між вузлами базових станцій і шлюзів через транспортну інфраструктуру на базі IP. Для підтримки високошвидкісного переходу обслуговування терміналів в активному режимі кожна базова станція LTE логічно підключена до всіх прилежних базових станцій.

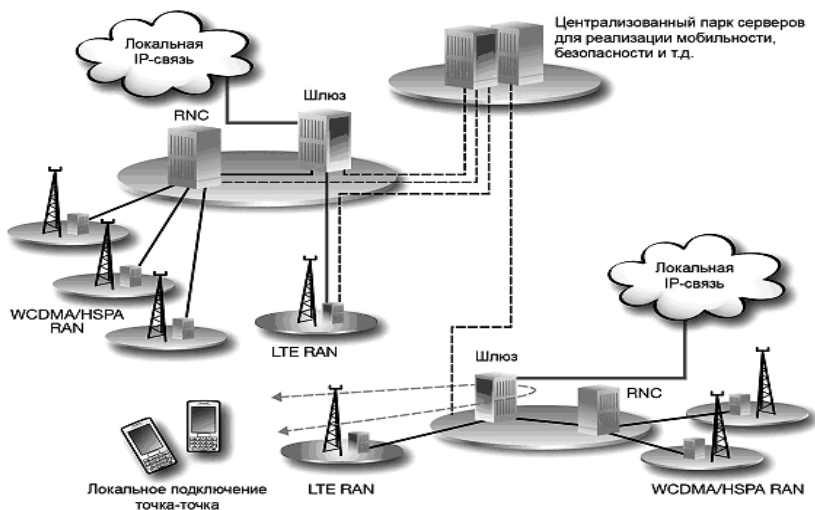


Рисунок 6.2 – Приклад топології мережі

Оскільки існуюча концепція Qo для систем GSM і WCDMA трохи складна, SAE уживає спроба реалізувати концепцію Qo, яка б об'єднала в собі простоту, гнучкість доступу з підтримкою зворотної сумісності. У системі SAE використовується концепція якості обслуговування, заснована на класах. Вона пропонує операторам прості, але ефективні рішення для диференціювання різних пакетних послуг.

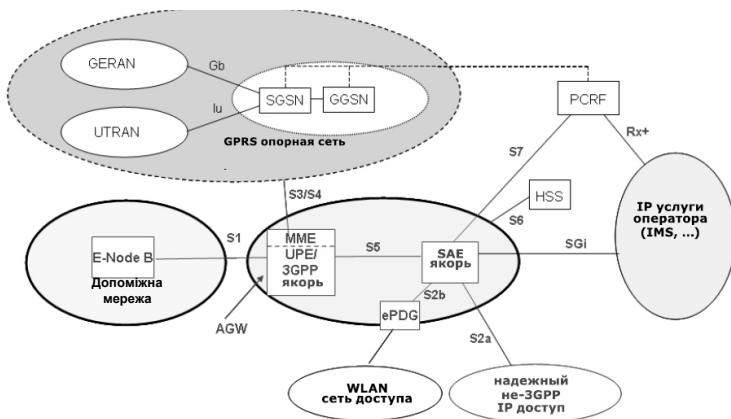


Рисунок 6.3 – Основні компоненти архітектури SAE

У мережі з архітектурою SAE можуть застосовуватися вузли тільки двох типів - базові станції (evolved Node, eNode) і шлюзи доступу (Access Gateway, AGW). Зменшення числа типів вузлів дозволить операторам знизити витрати як на розгортання мереж LTE/SAE, так і на їхню наступну експлуатацію. Ядро мережі SAE містить у собі чотири ключових компоненти:

1. Модуль керування мобільністю (Mobility Management Entity, MME) забезпечує зберігання службової інформації про абонента й керування нею, авторизацію термінальних пристроїв у наземних мережах мобільного зв'язку й загальне керування мобільністю, управляє протоколами, такими як призначення ідентифікаторів UE, безпека, перевірка дійсності й керування роумінгом.

2. Модуль керування абонентом (User Plane Entity, UPE) відповідає за термінацію нисхідного з'єднання, шифрування даних, маршрутизацію й пересилання пакетів. Управляє протоколами користувальницького рівня, наприклад, зберіганням поточного статусу UE, перериванням стану LET\_IDLE на рівні користувача й кодуванням поточного стану.

3. 3GPP якір відіграє роль шлюзу між мережами 2G/3G і LTE

4. SAE якір використовується для підтримки безперервності сервісу при переміщенні абонента між мережами, що відповідають і не відповідним специфікаціям 3GPP ( I-WLAN і т.п.).

Останні два компоненти являють собою зовсім нові елементи архітектури ядра мережі мобільного зв'язку (Evolved Packet Core) і зобов'язані своєю появою згаданий вимозі підтримки мобільності при переміщенні абонента між мережами різних типів. Функціональні елементи можна фізично сполучати або розподіляти по мережі - все залежить від особливостей застосовуваних продуктів і самої мережі. Наприклад, 3GPP якір припустимо розташовувати разом з модулем керування абонентом, хоча це не є обов'язковою вимогою. Точно так само модулі MME і UPE можуть бути сполучені або перебувати в різних вузлах мережі.

Користувальницькі дані пересилаються між вузлами базових станцій і шлюзів через транспортну інфраструктуру на базі IP.

Значна увага в документі 3GPP Release 8 приділена забезпеченню якості сервісу, вибору мережі й використанню ідентифікаційних даних. Поява багатомодових терміналів, призначених, наприклад, для роботи в мережах Wi-Fi і стільникового зв'язку, дозволяє обслуговувати абонентів із застосуванням різних варіантів доступу. У цьому зв'язку в SAE передбачені механізми вибору найбільш зручної інфраструктури для надання послуг, необхідних абонентів.

Як відзначають розроблювачі SAE, запропоновані ними архітектурні зміни дозволять значно зменшити затримки передачі даних, які особливо критичні для таких додатків, як VoIP або онлайнів інтерактивні ігри. Як орієнтир для коротких IP-Пакетів і невеликого мережного навантаження

сумарна затримка при обігу пакета по мережі LTE/SAE повинна становити близько 5 мс для смуги 5 МГц і понад 10 мс для меншої смуги. Ці значення, принаймні, на 50% краще аналогічних показників найбільш зроблених з нинішніх мереж 3G.

### 6.1 Продуктивність

Ефективність доступу в системі LTE ретельно аналізувалася 3GPP. Аналіз показав, що доступ LTE задовольняє сформульованим вимогам і відповідним чином забезпечує необхідну гнучкість спектра. Схожим образом Еріксон провів всебічні випробування з імітаційним моделюванням системи і її продуктивності на рівні каналів. На малюнку показана ефективність використання змодельованого спектра й пропускної здатності користувальницького трафіка.



Ефективність спектра становить 1, 7-2,7 біт/з/Гц на стільнику в спадному каналі й 0,7 біт/з/Гц на стільнику у висхідному каналі при відстані між станціями 500 м. Пропускна здатність користувальницького трафіка на границі стільника – 18-0,28 біт/з/Гц на стільнику в спадному каналі й 0, 022-0,05 біт/з/Гц на стільнику у висхідному каналі, при моделюванні роботи з 10 користувачами й до кінця заповнених буферів кожної стільники.

Технологія LTE здатна забезпечувати швидкість передачі, що перевищує в задані 100 Мбіт/с для нисхідних й 50 Мбіт/с для висхідних каналів. На практиці, при виділенні смуги пропускання в 20 МГц, досягнута

швидкість в 325 Мбіт/с для нисхідного каналу й 80 Мбіт/с для висхідного каналу.

Орієнтовна затримка відгуку в мережі становить 7 мс; затримка в одну сторону становить 3,5 мс, а значення затримки відгуку в мережі для HARQ - 5 мс.

## **7 МЕХАНІЗМ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ**

Під диспетчеризацією розуміється процес розподілу мережних ресурсів між користувачами, що передають дані. У технології LTE передбачена динамічна диспетчеризація у висхідному й спадному каналах.

Метою диспетчеризації є збалансованість якості зв'язку й загальної продуктивності системи. У радіоінтерфейсі LTE реалізована функція диспетчеризації залежно від стану каналу зв'язку. Вона забезпечує передачу даних на підвищених швидкостях (за рахунок використання модуляції більше високого порядку, зменшення ступеня кодування каналів, передачі додаткових потоків даних і меншого числа повторних передач), задіючи для цього часові й частотні ресурси з відносно гарними умовами зв'язку. Таким чином, для передачі будь-якого конкретного обсягу інформації потрібно менше часу. Частотно-тимчасова сітка OFDM допомагає вибирати ресурси одночасно в частотній і часовій областях.

Для трафіка сервісів, пересилаючих пакети з невеликим корисним навантаженням і через однакові проміжки часу, об'єм трафіка сигналізації, необхідної для динамічної диспетчеризації, може перевищувати об'єм переданої користувачем інформації. Тому в LTE також є функція статичної диспетчеризації (на додаток до динамічного). Під статичною диспетчеризацією розуміється виділення користувачеві радіочастотного ресурсу для передачі певного числа субкадрів.

Механізми адаптації каналу потрібні для того, щоб максимально використовувати можливості каналу з якістю, що змінюється, зв'язку. Такий механізм «вибирає» схеми модуляції й каналного кодування відповідно до умов зв'язку. Від його роботи залежать швидкість передачі даних і ймовірність виникнення помилок у каналі.

## 8 РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ У ВИХІДНОМУ КАНАЛІ

Мова йде про керування рівнем випромінюваної терміналами потужності для того, щоб збільшити ємність мережі, розширити зону радіопокриття, підвищити якість зв'язку й знизити енергоспоживання. Для досягнення перерахованих цілей механізми регулювання потужності, як правило, домагаються максимального збільшення рівня корисного прийнятого сигналу при одночасному зниженні рівня радіоперешкод.

Сигнали у вихідному каналі LTE є ортогональними, тому взаємні радіоперешкоди між користувачами однієї стільники відсутні - принаймні, при ідеальних умовах радіозв'язку. Рівень завад, створюваний користувачем сусідніх стільник, залежить від місця розташування випромінюючого мобільного терміналу, а точніше, від рівня загасання його сигналу на шляху до цих стільників. Загалом кажучи, чим ближче термінал до сусіднього стільника, тим вище рівень створюваних їм перешкод у ній. Відповідно термінали, що перебувають на більше далекій відстані від сусіднього стільника, можуть передавати сигнали більшої потужності, ніж термінали, розташовані поруч із нею.

Ортогональність сигналів у вихідному каналі LTE дозволяє мультиплексувати сигнали термінальних пристроїв різної потужності в цьому каналі в одній і тій ж соте. Це означає, що замість компенсації сплесків рівня сигналу, що виникають внаслідок багатопроменевого поширення радіохвиль (шляхом зниження випромінюваної потужності), їх (сплески) можна використовувати для збільшення швидкості передачі даних за допомогою механізмів диспетчеризації й адаптації каналу зв'язку.

## 9 LTE ADVANCED

Оскільки робота над першим випуском стандарту LTE закінчується, центр робіт тепер поступово рухається до подальшого розвитку LTE, за назвою LTE-Advanced. Схема розвитку LTE-advanced представлена на рисунку 9.1. Одна із цілей цього розвитку полягає в тому, щоб досягти й навіть перевершити вимоги IMT-advanced. IMT-Advanced - системи рухомого зв'язку, що володіють новими можливостями. Такі системи забезпечують доступ до широкого діапазону послуг електрозв'язку, включаючи послуги вдосконалених систем рухомого зв'язку, надавані мережами рухомого й фіксованого зв'язку, у яких всі частіше використовується пакетна передача. Системи IMT-Advanced забезпечують застосування з низкою й високою мобільністю, а також великий діапазон підтримуваних швидкостей передачі даних залежно від потреб користувачів і служб у середовищі з безліччю

користувачів. Системи IMT-Advanced також здатні забезпечувати мультимедійні застосування високої якості в широкому спектрі служб і платформ, істотно поліпшуючи показники роботи і якість обслуговування.

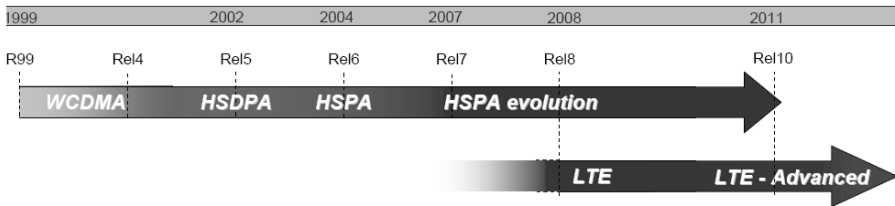


Рисунок 9.1 – Схема розвитку

Стандарт LTE-advanced повинен мати сумісність із LTE, у тому розумінні, що організація мережі LTE-advanced повинна бути можлива в спектрі частот уже зайнятому LTE, без заміни існуючих терміналів LTE. Така сумісність спектра має дуже велике значення для гладкого й дешевого переходу до LTE-advanced, цей перехід подібний до розвитку WCDMA до HSPA.

#### **Вимоги LTE-advanced**

1. Пікова швидкість передачі даних DL: 1 Гбіт/сек, UL: 500 Мбіт/сек
2. Смуга пропускання передачі: приблизно 70 МГц в DL і 40 МГц в UL
3. Користувальницька пропускна здатність на краях каналу в 2 рази вище, ніж це LTE
4. Середня користувальницька пропускна здатність в 3 рази вище, ніж в LTE
5. Ефективність спектра в 3 рази вище, ніж в LTE
6. Пікова ефективність спектра DL: 30 бітів у секунду/Гц, UL: 15 Біт у секунду/Гц
7. Гнучкість спектра: підтримка масштабованих смуг пропускання
8. Рухливість: така ж, як в LTE
9. Сумісність із фіксованими мережами

#### **Пікова швидкість передачі даних**

Пікова швидкість передачі даних - максимальна швидкість передачі, що буде забезпечуватися з погляду вимог до системи, незалежно від параметрів радіо інтерфейсу, таких як смуга пропускання й конфігурації антенних пристроїв.

В LTE-advanced повинне забезпечуватися значно збільшені пікові швидкості передачі даних у порівнянні з іншими мережами. А саме в downlink 1Гбіт/з, а в uplink - 500 Мбіт/с.



### Ефективність спектру

Пікова ефективність спектру - досягається при піковій швидкості передачі даних, коли сигнал приймається безпомилково й всі доступні ресурси зв'язку використовуються одним UE.

Метою є підтримка ефективності спектра в downlink 30 біт у сек/Гц, а в uplink 15 біт у сек/Гц. Пропонується використання конфігурації антени 8x8 для DL і 4x4 для UL.

Середня ефективність спектра - визначається, як добуток числа правильно отриманих біт у повідомленні (на певному проміжку часу) і повної смуги пропускання діленої на кількість стільників. Середня ефективність спектра вимірюється в Біт/Сік/Гц/Стільника. В LTE-advanced передбачається наскільки тільки можливе збільшення середньої ефективності спектра, з огляду на звичайно розумну складність створюваної системи. У таблиці 9.1 показана середня ефективність спектра при різних антенних конфігураціях.

Таблиця 9.1 – Значення ефективності спектру

| Конфігурація антен |     | Значення середньої ефективності спектра, біт/с/гц/стільника |
|--------------------|-----|---|
| UL                 | 1x2 | 1,2   |
|                    | 2x4 | 2   |
| DL                 | 2x2 | 2,4   |
|                    | 4x2 | 2,6   |
|                    | 4x4 | 3,7   |

Користувальницька пропускна здатність на краях стільника визначається як 5% від повної пропускної здатності. У таблиці 9.2 представлені значення, які задовольняють вимогам стандарту.

Таблиця 9.2 – Користувальницька пропускна здатність

| Конфігурація антен |     | Користувальницька пропускна здатність [bps/Hz/cell/user*] |
|--------------------|-----|---|
| UL                 | 1x2 | 0.04  |
|                    | 2x4 | 0.07  |
| DL                 | 2x2 | 0.07  |
|                    | 4x2 | 0.09  |
|                    | 4x4 | 0.12  |

### **Мобільність**

Система повинна підтримувати зв'язок при різних швидкостях руху до 350км/год, або навіть до 500км/год залежно від діапазону робочих частот. Так само повинна бути забезпечена гарна якість зв'язку при роботі системи на низьких швидкостях від 0 до 10км\ч.

### **Спектр частот.**

В LTE-advanced будуть застосовуватися додаткові групи частотних діапазонів:

1. 450-470 Мгц
2. 698-862 Мгц
3. 790-862 Мгц
4. 2.3-2.4 Мгц
5. 3.4-4.2 Ггц
6. 4.4-4.99 Ггц

### **Технічні пропозиції.**

1. Використання передових антенних рішень (MIMO)
2. Масштабована смуга пропускання системи (від 20 Мгц до 100Мгц)
3. Висока мобільність
4. Гнучке використання спектра
5. Автоматична й автономна конфігурація мережі
6. Удосконалення кодування й усунення помилок
7. Гібрид OFDMA і SC-FDMA в uplink

## **СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Ю.А. Громаков. Структура TDMA кадров и формирование сигналов в стандарте GSM. // Электросвязь. – 1993. № 10. – С. 9-12.
2. Берлин А. Н. Цифровые сотовые системы связи. – М.: Эко-Трендз, 2007. – 296 с.  
А. Mehrotra. Cellular Radio: Analog and Digital Systems. Artech House. Boston-London. 1994. p. 460.
3. 3GPP, Широкополосный множественный доступ с кодовым разделением каналов для универсальных систем подвижной связи. Системы радиодоступа для третьего поколения подвижной связи.: Пер. с англ. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 393 с.
4. Бабков В. Ю., Аксёнов А.Н. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – С.170-175
5. Шахнович И. В. Современные технологии беспроводной связи. Издание второе, исправленное и дополнено. — М.: Техносфера, 2006. – 288 с.

6. Педжман Рошан, Джонатан Лиэри. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. — 304 с.
7. Олег Василик. Широкополосная мобильность. // Сети и телекоммуникации. – 2007. №1-2.
8. Шахнович И.В. Стандарт широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 для диапазона ниже 11 ГГц. // Электроника: Наука, Техника, Бизнес – 2005. №1.
9. Бакланов И.Г. NGN: принципы построения и организации. – М.: Эко-Трендз, 2008. – 399 с.
10. Семенов Ю.В. Проектирование сетей связи следующего поколения. – М.: ОАО «ГИПРОСВЯЗЬ», 2005. – 240 с.
11. Пер Бегшин, Ларс Фрид. Долгосрочная эволюция. // Сети и телекоммуникации – 2008. №1-2.
12. IEEE Std 802.20.4™-2008 IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems — local and metropolitan area networks— Specific requirements. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANS).
13. Ekstrom H., Furuskar A., Karlsson J. Technical Solutions for the 3G Long-term Evolution. // IEEE Communications Magazine. – 2006, pp.38–45.
14. Вишневский В.М. Технология сотовой связи LTE – почти 4G. // Связь и телекоммуникации – 2009. №1
15. Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. – М.: Техносфера, 2005.
16. Э.Дальман, А.Фурускар, И.Ядинг. Радиоинтерфейс LTE в деталях. // Сети и Системы связи. – 2008, № 9.
17. Moray Rumney. 3GPP LTE: Introducing Single-Carrier FDMA. // Agilent Measurement Journal, – 2008, № 4, p. 18–27.
18. Jim Zyren. Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer. White Paper. – [www.freescale.com/](http://www.freescale.com/)
19. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 1104 с.
20. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов.– М.: Питер, 2002. – 608с.
21. Столингс В. Беспроводные линии связи и сети: Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 640с.
22. Wiley J. WiMAX Technology for Broadband Wireless Access, 2007. – 310p.
23. Wiley J. LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access. April 2009. – 433 p.