ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Методи модуляції та кодування в мережах п'ятого покоління»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис) Владислав БАГМЕТ (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АРДМ-61
Владислав БАГМЕТ

Керівник: Лариса ДАКОВА

Рецензент: О. Ільїн

Київ – 2023

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітньо-професійна програма Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедрою МВТ
_____ Наталія РУДЕНКО
« » _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Багмет Владиславу Вікторовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Методи модуляції та кодування в мережах п'ятого покоління», керівник кваліфікаційної роботи Лариса ДАКОВА, д.т.н., професор,
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 19.10.2023 р. №145.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2023 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Еволюція технологій мобільного зв'язку.
   2. Мобільна мережа.
   3. Методи модуляції та кодування.
   4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Основні характеристики мобільної мережі п'ятого покоління.
   2. Архітектура стільникової мережі п'ятого покоління.
   3. Аналіз методів модуляції та кодування для систем бездротового зв'язку 5 покоління.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	19.10.23	Викон.
2.	Основні характеристики мобільної мережі п'ятого покоління	31.10.23	Викон.
3.	Архітектура стільникової мережі п'ятого покоління	15.11.23	Викон.
4.	Аналіз методів модуляції та кодування для систем бездротового зв'язку 5 покоління	29.11.23	Викон.
5.	Висновки, вступ, реферат	11.12.23	Викон.
6.	Розробка презентації	18.12.23	Викон.

Здобувач вищої освіти Владислав БАГМЕТ

(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи Лариса ДАКОВА

(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 103 стор., 55 рис., 9 табл., 30 дж.

Мета роботи – визначити ефективну схему кодування для схеми адаптивної модуляції, щоб зменшити коефіцієнт бітових помилок та збільшення швидкості передачі даних.

Об'єкт дослідження - мережа 5G та взаємодія методів модуляції та кодування в бездротових мережах 5G.

Предмет дослідження – мережа 5G, методи модуляції та кодування 5G.

Короткий зміст роботи: У роботі досліджено і проведено огляд еволюції технологій мобільного зв'язку. Було проведено аналіз методів модуляції та кодування в lte. Детально представлено технологію 5G, описано її потреби, інфраструктуру, конкретизовано можливості, вимоги та виклики, що виникають з впровадженням технологій 5G. Також в цьому дослідженні розглядаються ключові питання, пов'язані зі специфікаціями бездротових мереж мобільного зв'язку 5G.

Проаналізовано різні схеми модуляції та кодування і проведено порівняння між ними. Проведено порівняння продуктивності між схемами кодування Турбо та Вітербі. Було порівняно методи модуляції QAM та QPSK. Викладені результати досліджень відображено на рисунках та побудованих графіках.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МОБІЛЬНА МЕРЕЖА; МЕРЕЖА П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ, МЕТОДИ МОДУЛЯЦІЇ ТА КОДУВАННЯ, АРХІТЕКТУРА МЕРЕЖІ 5G, СТІЛЬНИКОВИЙ ЗВ'ЯЗОК

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 103 pages, 55 pictures, 9 table, 30 sources.

The purpose of the work - to determine an efficient coding scheme for the adaptive modulation scheme to reduce the bit error rate and increase the data rate.

Object of research – the 5G network and the interaction of modulation and coding methods in 5G wireless networks.

Subject of research – 5G network, 5G modulation and coding methods.

Summary of the work: The paper investigates and reviews the evolution of mobile communication technologies. An analysis of modulation and coding methods in LTE was carried out. The 5G technology is presented in detail, its needs and infrastructure are described, and the opportunities, requirements, and challenges arising from the implementation of 5G technologies are specified. This study also addresses key issues related to the specifications of 5G wireless mobile networks.

Different modulation and coding schemes are analyzed and compared between them. A performance comparison between Turbo and Viterbi coding schemes is made. QAM and QPSK modulation methods were compared. The results of the research are presented in figures and graphs.

KEYWORDS: MOBILE NETWORK; FIFTH GENERATION NETWORK, MODULATION AND CODING METHODS, 5G NETWORK ARCHITECTURE, CELLULAR COMMUNICATION

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Багмет В.В. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

на тему: Методи модуляції та кодування в мережах п'ятого покоління

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Багмет Владислав Вікторович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти технологіями нового покоління, вміло працювати з програмно-апаратними засобами мобільного зв'язку, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу Багмет Владислава Вікторовича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Лариса ДАКОВА
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2023 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Багмет В.В.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувачка кафедри
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ Наталія РУДЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2023 року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Багмет Владислава Вікторовича

на тему: «Методи модуляції та кодування в мережах п'ятого покоління»

Актуальність:

У нинішній час потреба в безпроводових з'єднаннях стрімко росте вгору. Методи модуляції та кодування в мережах 5-го покоління є особливо актуальною, оскільки питання оптимізації передачі даних та підвищення ефективності мереж є важливими викликами в контексті розвитку мереж 5G та наступних поколінь. В роботі обґрунтовано обрану тему, висвітлено сучасні виклики та перспективи в галузі мобільних технологій.

Тому, теоретичні та практичні дослідження направлені на вирішення даних завдань є актуальними і своєчасними.

Позитивні сторони:

1. Зміст магістерської роботи відповідає завданню. Її автор, показав високий рівень знань і ступінь підготовленості до майбутньої роботи за фахом.

2. Текст викладений грамотно, ясно, послідовно. Графічний матеріал оформлений якісно. Широко використовується сучасна науково-технічна література, включаючи англомовні видання.

Недоліки:

1. В деяких розділах може бути корисно детальніше пояснити вибір конкретних методів, надати більше обґрунтування та відзначити їхні переваги та недоліки.

2. Робота може бути вдосконалена, якщо врахує можливі зовнішні впливи на ефективність використовуваних методів.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

Висновок: кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «відмінно», а здобувач БАГМЕТ Владислав Вікторович заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Рецензент:

(науковий ступінь, вчене звання) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ЗМІСТ

ВСТУП 10
1 ЕВОЛЮЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 13
1.1 Передовість в сфері телекомунікацій: огляд розвитку та майбутнє 13
1.2 Телекомунікаційна мережа 13
1.3 Мобільна мережа 14
1.4 Стільниковий зв'язок 15
1.5 Поширення в контексті мобільного радіозв'язку 18
1.6 Архітектура мобільної мережі 18
1.7 Розподіл ресурсів 19
1.8 Мобільність у мобільних мережах 20
1.9 Презентація проекту партнерства 3-го покоління (3GPP) 20
1.10 Розвиток мереж мобільного зв'язку 21
1.11 Нульове покоління (0G) 27
1.12 Перше покоління (1G) 28
1.13 Друге покоління (2G) 31
1.14 Третє покоління (3G) 34
1.15 Четверте покоління (4G) 38
1.16 П'яте покоління (5G) 41
2 МЕТОДИ МОДУЛЯЦІЇ ТА КОДУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LTE 46
2.1 Модуляція 46
2.2 Цифрова модуляція, що використовується в 4G/LTE 49
2.3 FDD та TDD 52
2.4 FDMA та TDMA 53
2.5 OFDM та OFDMA 55
2.6 OFDMA та SC-FDMA 63
2.7 Кодування 65
2.8 Згорткові коди 67
2.9 Коди Ріда Соломона 68
2.10 Турбо коди 69
2.11 LDPC коди 69
2.12 Полярні коди 70
3 АРХІТЕКТУРА МЕРЕЖ 5G 72

3.1 Мережа 5G 72
3.2 Архітектура стільникової мережі 5G 78
3.3 Нова технологія радіозв'язку 5G 81
3.4 Методи модуляції та кодування в мережах 5 покоління 91
ВИСНОВКИ 99
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 101
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 104

ВСТУП

Стрімкий розвиток мобільного зв'язку та інноваційних додатків збільшив попит на нові бездротові послуги. Таке зростання піднімає вимоги до технічної продуктивності мережі, які стають дедалі жорсткішими. Беручи до уваги інформацію, можна сказати, що до 2020 року близько 20,4 мільярда девайсів Інтернету речей (IoT) будуть підключені за допомогою технології "від машини до машини" (M2M). За даними Ericsson, до 2025 року кількість підключених девайсів сягне від 75,4 до 100 мільярдів. Водночас, за інформацією Huawei, число користувачів п'ятого покоління (5G) становитиме 2,8 мільярда в 2025 році.

Нова технологія 5G є основою для багатьох майбутніх розробок та додатків. В наслідок, система мобільного зв'язку 5G консолідувалася у важливий історичний момент, відкриваючи еру всеохоплюючої інформації та забезпечуючи чудовий користувацький досвід. Останнім часом в галузі проводяться масштабні дослідження важливих технологій 5G, особливо з появою Індустрії 4.0. Загалом, необхідно створити та модернізувати відповідну систему контролю, оцінки та перевірки. Через великий попит користувачів та технологій на мобільний трафік, які вимагають дуже високої швидкості передачі даних, дуже низької затримки і широкого спектру, для вирішення цих питань необхідне наступне покоління - 5G.

5G має вісім ознак: велика швидкість до 10 Гбіт/с, низька затримка (1 мс), висока пропускна здатність (велика смуга пропускання), велика кількість підключених девайсів, постійна доступність і покриття скрізь, покликане забезпечити низьке енергоспоживання і тривалий час автономної роботи.

Технологія Інтернету речей є одним з основних рушіїв розвитку 5G. 5G надає сучасну інфраструктуру для Інтернету речей, а також варіанти використання Інтернету речей, які, в майбутньому суттєво зростатимуть. Як наслідок, IoT також матиме значний вплив на дизайн телекомунікаційних мереж. Хоча 5G спричинить фундаментальні зміни в системи стільникового зв'язку та Інтернету речей, на його шляху виникають деякі суттєві труднощі.

Удосконалена технологія масивних решіток MIMO також є важливою технологією, що використовується в мобільних мережах п'ятого покоління. Застосування декількох антен на передавачі та/або приймачі в масивному MIMO дозволить підвищити енергетичну і спектральну ефективність мережі.

Ще один підхід, який дозволяє антені спрямовувати радіохвилі в певному напрямку, а приймачу створювати промінь. Формування променя підвищило ефективність використання спектра і зменшило перешкоди при передачі більшої кількості даних з більшої кількості антен. Крім того, нещодавно розроблені форми сигналів, такі як FBMC, UFMC, F-OFDM і GFDM, можуть подолати проблеми формування імпульсів, фільтрації та попереднього кодування для зменшення позасмугового витоку OFDM-сигналів. Всі ці технології, а також деякі інші, вважаються критично важливими для мереж 5G.

Однак для впровадження технології 5G необхідно вирішити деякі питання. Наприклад, 5G має забезпечити зв'язок між пристроями (D2D) та інтелектуальні транспортні послуги, забезпечити надійність мережі та гарантувати конфіденційність і безпеку. Хоча D2D-зв'язок покращує повторне використання стільників і зменшує перешкоди для фемто- і мікростільників, D2D-зв'язок може впливати на продуктивність системи через спільне використання одних і тих же радіоресурсів у мережі D2D. Крім того, 5G повинен забезпечити надійність і доступність мережі в будь-який час і в будь-якому місці. Безпека і конфіденційність - дві найважливіші проблеми, які має вирішити 5G. Виклики безпеки та конфіденційності 5G зростають зі збільшенням кількості користувачів та обміну даними, що збільшує кількість загроз. Крім того, 5G повинен забезпечити безпомилкову і високоточну передачу даних, щоб відповідати потребам і баченню. Це є значним викликом, особливо з огляду на мобільність користувачів, що призводить до подвійних дисперсійних завмирань каналу, які потребують складного вирівнювання. Всі ці питання повинні бути ефективно вирішені, щоб відповідати вимогам і досягти конкретних цілей технології 5G.

Представлено комплексне дослідження технології 5G. Спочатку описуються, історія стільникових мереж, методи модуляції та кодування в lte, мережі 5G,

архітектури стільникових мереж 5G, архітектури на основі послуг 5G, технології 5G NR, а також автономні (SA) і неавтономні (NSA) режими 5G, пошук ідеальної схеми модуляції та кодування. Ми зосередимося на ключових вимогах і специфікаціях технології 5G. До них відносяться висока швидкість передачі даних, низька затримка, широка смуга пропускання, велика кількість підключених пристроїв, доступність мережі, покриття, низьке енергоспоживання і тривалий термін служби. Окреслені виклики специфікацій 5G, такі як зайнятість смуги пропускання, великі обсяги даних, технологія MIMO, формування променя, D2D-зв'язок, наднизька затримка, наднадійні мережі, безпека і конфіденційність.

5G використовує різні типи схем кодування та модуляції для покращення продуктивності та ефективності. Проаналізовано різні схеми кодування і методи модуляції та проведено порівняння між ними. Було проведено порівняння продуктивності між схемами кодування Turbo та Viterbi. А методи модуляції порівнюються між QPSK і QAM. Схема модуляції QAM буде використовуватися для користувачів, які знаходяться ближче до BTS (базової приймально-передавальної станції), а техніка модуляції QPSK буде використовуватися для користувачів, що знаходяться ближче до межі стільників. Для обох методів модуляції були використані обидві схеми кодування і проведено порівняння ефективності. Для схем модуляції методи кодування Вітербі (згорткове кодування і декодування Вітербі) довели свою ефективність у використання.

1 ЕВОЛЮЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Передовість в сфері телекомунікацій: огляд розвитку та майбутнє

Світ сьогодні кипить від усього інтелектуального, поява 5G в ці роки і 6G наприкінці цього десятиліття змінюють наше повсякденне життя, формують спосіб роботи, покращують дизайн досліджень і соціальну взаємодію. 6G трансформує наші комерційні обміни та впливає на навколишнє середовище.

У цьому контексті, що швидко розвивається, дослідження повинні відповідати викликам цифрової трансформації і передачі технологій, говорячи більш конкретно про перетворення нових поколінь телекомунікацій, що розвиваються, з урахуванням нових наукових і промислових колаборацій і відкриття дослідницьких даних шляхом забезпечення високого рівня безпеки за рахунок використання переваг і експлуатації глобальних мереж і їх вже розгорнутої інфраструктури.

У цій главі ми представимо розвиток і еволюцію різних поколінь телекомунікаційних мереж, характеристики кожного з них; потім кілька нагадувань про 5G, який зараз впроваджується територіально, а також про його обмеження і недоліки. Потім ми розглянемо технологію, необхідну для майбутнього 6G, з її тенденціями, вимогами, обіцянками, викликами та взаємодією з людиною.

1.2 Телекомунікаційна мережа

Телекомунікаційна мережа - це мережа дуг (телекомунікаційних ліній зв'язку) і вузлів (машини, об'єкти, комутатор, маршрутизатор тощо), налаштованих таким чином, щоб повідомлення могли передаватися з одного кінця в інший за допомогою декількох ліній зв'язку. Ланки в телекомунікаційній мережі можуть бути реалізовані за допомогою ієрархічних систем передачі.

Телекомунікаційна мережа - це сукупність обладнання та засобів передачі, однією з функцій яких є забезпечення передачі інформації. Мережі виникли з

потреби швидко і легко обмінюватися інформацією між машинами. Починали з того, що з'єднували ці машини між собою (локальні мережі). Пізніше з'явилася потреба обмінюватися інформацією між об'єктами. Приклади телекомунікаційних мереж: телевізійна мережа, комп'ютерна мережа, мережа мобільного зв'язку, авіаційна мережа (дозволяє автоматично контролювати стан літака в польоті), мережа Інтернет.

Існує багато прикладів телекомунікаційних мереж:

- Комп'ютерна мережа;
- Інтернет;
- Комутована телефонна мережа;
- Цифрова мережа з інтегрованими послугами (ISDN);
- Наземна мобільна телефонна мережа загального користування;
- Глобальна телексна мережа;
- Аеронавігаційна мережа ACARS.

1.3 Мобільна мережа

Мобільна мережа - це система телефонного зв'язку, яка працює з частотами, які складають радіочастотний спектр. Ця мережа дозволяє мільйонам користувачів здійснювати одночасні дзвінки в дорозі на ходу, без будь-яких територіальних обмежень.

Перша мережа, введена в експлуатацію, вже базувалася на шаблонній концепції стільникового зв'язку - концепції, розробленої в Bell Labs на початку 1970-х. Ця технологія є ключовим технологічним компонентом мереж стільникового зв'язку, оскільки дозволяє повторно використовувати ресурси мережі радіодоступу в декількох заданих географічних областей, які називаються стільниками. Таким чином, стільник – це радіоресурс (частота, код і т.д.), який не може бути повторно використаний тільки однією базовою станцією, розташованим на достатній відстані, щоб уникнути будь-яких міжстільникових конфліктів при використанні ресурсу. Концептуально, якщо стільник дозволяє здійснювати певну

кількість одночасних дзвінків, то загальна кількість дзвінків, які може підтримувати мережа, можна контролювати розмір стільника за більш-менш важливими параметрами. Розмір стільника, розташованого в міській місцевості, як правило, менше, ніж розмір стільника у сільській місцевості. Всі мобільні мережі базуються на цій концепції стільника, тому їх також називають стільниковими мережами.

1.4 Стільниковий зв'язок

Управління стільниковим зв'язком здійснюється за допомогою передавача/приймача, який називається базовою станцією, і який забезпечує радіозв'язок з мобільними терміналами в межах своєї зони покриття. Зона покриття базової станції обмежується низкою факторів, серед яких:

– Потужність передачі мобільного терміналу та базової станції;

– Використовувана частота;

– Тип антен, що використовуються на базовій станції та мобільному терміналі;

– Середовище розповсюдження (місто, сільська місцевість тощо);

– Використовувана радіотехнологія.

Стільник зазвичай представляється у вигляді шестикутника. Шестикутник - це геометрична фігура, найближча до зони покриття стільника, яка забезпечує регулярну сітчасту структуру простору. У реальності, звичайно, існують зони перекриття між сусідніми стільниками, які створюють міжстільникові перешкоди.

Існує кілька типів стільників, залежно від радіусу їх покриття, який пов'язаний з потужністю передачі базової станції, і від того, як вони використовуються операторами.

– Макростільники - це великі осередки радіусом від кількох сотень метрів до кількох кілометрів. Макростільники регулярно покривають цілу територію, утворюючи основу покриття мобільної мережі. Вони контролюються макро-базовими станціями, потужність яких зазвичай становить 40 Вт (46 дБм) для смуги

частот 10 МГц. Їхні антени розміщуються на високих точках, наприклад, на дахах будівель або опорах.

– Мікростільники - це стільники з радіусом дії від кількох десятків до сотні метрів, призначені для доповнення покриття макростільників у густонаселених або погано покритих районах. Пов'язані з ними базові станції називаються мікро-базовими станціями, і їхня потужність становить близько 10 Вт (40 дБм). Їх антени зазвичай розміщуються нижче рівня даху, як правило, на фасадах будівель.

– Пікостільники служать для тих же цілей, що і мікростільники, але мають меншу потужність - від 0,25 до 5 Вт (від 24 до 37 дБм). Їх можна використовувати для покриття проблемних зон або великих закритих приміщень, таких як аеропорти або торгові центри. Антени базових станцій рісо можна розміщувати так само, як і антени мікро-базових станцій, на стелі або на стіні всередині приміщень.

– Фемто-стільники - це невеликі стільники радіусом близько десяти метрів, в основному призначені для покриття площі будинку або офісу. Вони мають низький рівень потужності, близько сотні мВт (20 дБм), і, як правило, розміщуються всередині будівель.

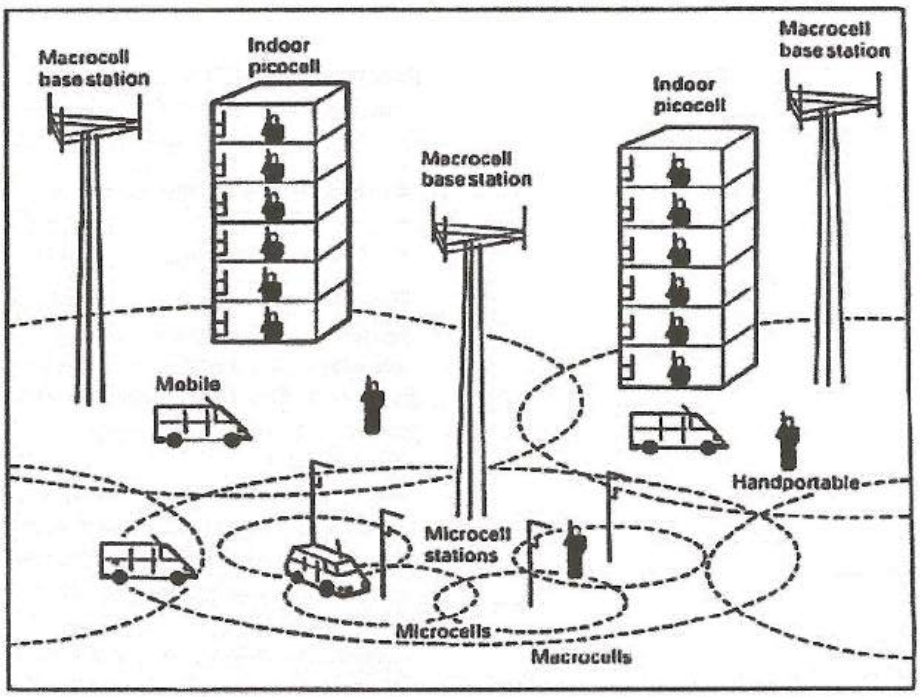


Рис. 1.1. Змішана система стільникового радіозв'язку

Кожна базова станція потребує радіостанції, яку зазвичай купує або орендує оператор мобільного зв'язку, за винятком фемто-базових станцій, які можуть бути розгорнуті користувачем. Слід зазначити, що лише макростільники, як правило, розгортаються у вигляді звичайної стільникової мережі, а інші типи стільників у більшості випадків лише доповнюють покриття на місцевому рівні, утворюючи так звану гетерогенну мережу.

Щоб мінімізувати кількість макро-базових станцій, зазвичай використовується трисекторизація. При такому розгортанні базова станція реалізує систему передачі/прийому в трьох різних напрямках, які називаються азимутами. Для цього використовуються спрямовані антени, кожна з яких спрямована в певному напрямку. На наступній схемі показано загальну топологію макростільникової мережі та ілюструється концепція трисекторизації, де кожна стрілка позначає напрямок направленості антени, а кожен шестикутник - стільник. У випадку трисекторизації комірка також називається сектором. Слід зазначити, що в реальності, особливо в міському середовищі, стільники розташовані не за такою регулярною схемою і можуть мати різну форму в залежності від місцевого розташування.

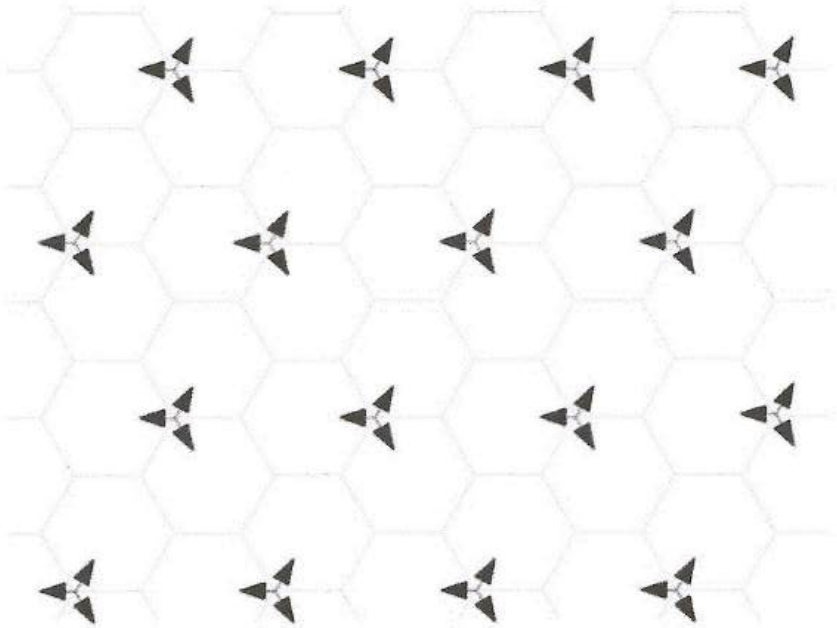


Рис. 1.2. Топологія трисекторної стільникової мережі з шестикутною структурою

1.5 Поширення в контексті мобільного радіозв'язку

Канал передачі мобільного радіозв'язку є одним з найбільш нестабільних засобів зв'язку: оскільки радіохвилі поширюються в просторі, вони піддаються численному впливу різних спотворень, електромагнітних характеристик, температури, вологості середовища, через яке вони проходять, і т.д. На своєму шляху від передавача до приймача переданий сигнал піддається численним явищам, більшість з яких погіршують якість сигналу.

Під час проходження між передавачем і приймачем переданий сигнал піддається численним явищам, більшість з яких мають погіршуючий вплив на якість сигналу. На практиці ця деградація призводить до помилок в отриманих повідомленнях, що призводить до втрати інформації для користувача або системи. Погіршення якості сигналу внаслідок поширення в мобільному радіосередовищі можна класифікувати за різними категоріями:

– Втрати при розповсюдженні через відстань, яку проходить радіохвиля, або втрати на шляху;

– Ослаблення потужності сигналу через затухання, спричинене перешкодами, з якими стикається сигнал на своєму шляху між передавачем і приймачем;

– Згасання потужності сигналу через численні ефекти, спричинені явищем багатопроменевості;

– Перешкоди, спричинені іншими передачами (співканалом або сусіднім каналом). Цей тип втрат дуже важливий у системах повторного використання частот.

– Завади, спричинені навколишнім шумом від випромінювань інших систем.

1.6 Архітектура мобільної мережі

Архітектура мобільної мережі включає три функціональні елементи:

– Мобільний термінал, також відомий як користувацьке обладнання (UE);

– Мережа радіодоступу (RAN);

– Базова мережа (CN).

Існує також два домени:

– Домен UE, який включає власне обладнання користувача;

– Домен інфраструктури, що складається з власного обладнання оператора.

На рисунку 1.3 показано структуру мобільної мережі. UE є частиною домену користувацького обладнання і з'єднаний з мережею доступу за допомогою радіоінтерфейсу. Елементом з'єднання мережі доступу з радіоінтерфейсом є базова станція. Мережа доступу і базова станція належать до домену інфраструктури і з'єднані між собою одним або декількома наземними інтерфейсами.

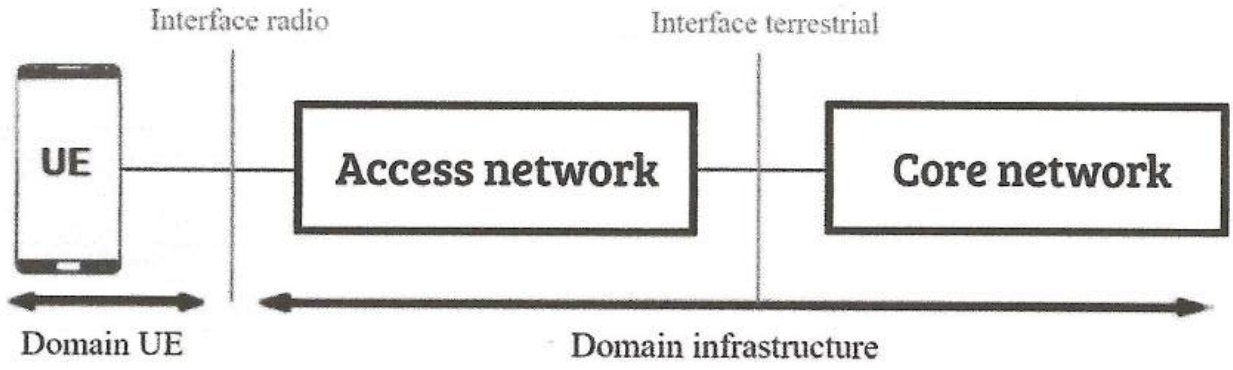


Рис. 1.3. Структура мережі мобільного зв'язку

1.7 Розподіл ресурсів

Спектр є дефіцитним ресурсом. Його організація на глобальному рівні необхідна з кількох причин. Вона гарантує сумісність систем між країнами, дозволяючи користувачам подорожувати по всьому світу. Це також дозволяє виробникам обладнання досягти значної економії на масштабах, зменшуючи витрати і сприяючи розвитку технологій. Сектор радіозв'язку МСЕ (Міжнародного союзу електрозв'язку), або ITU-R, відповідає за цю глобальну місію з гармонізації. Всесвітні конференції радіозв'язку (ВКР) - це міжнародні форуми, що

організовуються ITU-R кожні чотири роки, на яких переглядаються міжнародні договори, що регулюють використання радіочастотного спектру.

1.8 Мобільність у мобільних мережах

Мобільність забезпечується механізмом хендовера, який широко використовується в мобільних мережах, особливо в межах однієї системи, оскільки в цьому випадку діалог між базовими станціями спрощується. Він використовується, наприклад, для мобільності викликів у системах GSM і UMTS, а також між цими двома системами для забезпечення безперервності голосових викликів.

1.9 Презентація проекту партнерства 3-го покоління (3GPP)

3GPP (3rd Generation Partnership Project) - це консорціум, створений у 1998 році за ініціативою ETSI (Європейського інституту телекомунікаційних стандартів). Метою 3GPP є визначення специфікацій, що дозволяють обладнанню різних виробників взаємодіяти між собою. Всупереч своїй назві, сфера діяльності 3GPP не обмежується стандартизацією систем 3G. Її роль полягає в підтримці та розробці специфікацій для систем.

- GSM/GPRS/EDGE;
- UMTS (FDD і TDD);
- LTE, а також специфікацій для базової мережі EPC;
- 5G Core Network.

3GPP складається з координаційної групи, яка називається PCG (Project Coordination Group) та різних груп технічних специфікацій, які називаються TSG (Technical Specification Groups).

Слід зазначити, що 3GPP не є органом стандартизації як таким. Він визначає технічні специфікації, які потім затверджуються і публікуються регіональними органами стандартизації, специфічними для конкретної країни або регіону світу.

Зміни до специфікацій, затверджені робочими групами, асоціюються з релізом (Release). Реліз відповідає набору нових функціональних можливостей, внесених до стандарта групами 3GPP протягом певного періоду часу, і являє собою значний крок в еволюції систем. 3GPP визначив кілька релізів:

– Етап 1 (1992): базовий GSM;

– Етап 2 (1995): функції GSM, включаючи кодек EFR;

– Випуск 96: оновлення GSM, швидкість передачі даних 14,4 кбіт/с;

– Випуск 97: визначення GPRS;

– Випуск 99: впровадження UMTS;

– Випуск 4: додавання функцій в основній мережі;

– Випуск 5: впровадження еволюції HSDPA для UMTS;

– Випуск 6: впровадження еволюції HSUPA для мережі доступу UMTS;

– Випуск 7: впровадження HSPA+ MIMO;

– Випуск 8: впровадження еволюцій HSPA+ CPC та DC-HSDPA, а також перший запуск мережі доступу LTE та базової мережі EPC;

– Випуск 9: еволюція DC-HSDPA, зокрема в поєднанні з MIMO, впровадження DC-HSUPA і другий випуск LTE;

– Реліз 10: еволюція HSDPA (до 4 несучих, тобто 20 МГц) і впровадження еволюції LTE, відомої як LTE-Advanced;

– Реліз 11: гетерогенні мережі (HetNet), координовані багатоточкові мережі (CoMP), внутрішнє співіснування (IDC), розширені можливості взаємозв'язку IP-сервісів;

– Реліз 12: агрегація несучих (2 несучі висхідної лінії, 3 несучі низхідної лінії низхідні несучі, агрегація несучих FDD / TDD), Масивний MIMO;

– Випуск 13: LTE-U / LTE-LAA, LTE-M;

– Випуск 14: Елементи для впровадження 5G.

1.10 Розвиток мереж мобільного зв'язку

Система бездротового зв'язку значно змінилася з часу створення першої бездротової мережі понад чотири десятиліття тому. Коли на початку 1980-х років з'явилася мобільна мережа першого покоління, попит на більшу кількість зв'язків у всьому світі зростав, що призвело до швидкого розвитку мобільного зв'язку.

Для початку важливо знати, що означає "G" у всіх категоріях. G просто означає покоління, що вказує на те, як вони еволюціонували з плином часу. Таким чином, ми можемо зрозуміти, що всі технології представляють покоління, в якому вони використовуються, тобто 1-е покоління для 1G, 2-е покоління для 2G і так далі до 6G. Кожне покоління швидше, безпечніше і надійніше.

Стандарти мобільного зв'язку повинні були розвиватися, щоб підтримувати більшу кількість користувачів. Тож сьогодні ми розглянемо еволюцію бездротового зв'язку і те, як ми можемо очікувати, що найновіше покоління, 5G, буде продовжувати розвиватися.

Ера телекомунікацій досягла значних успіхів у технологічному розвитку телекомунікаційних мереж, уможлививши появу нових пристроїв і послуг (див. рисунок 1.4).

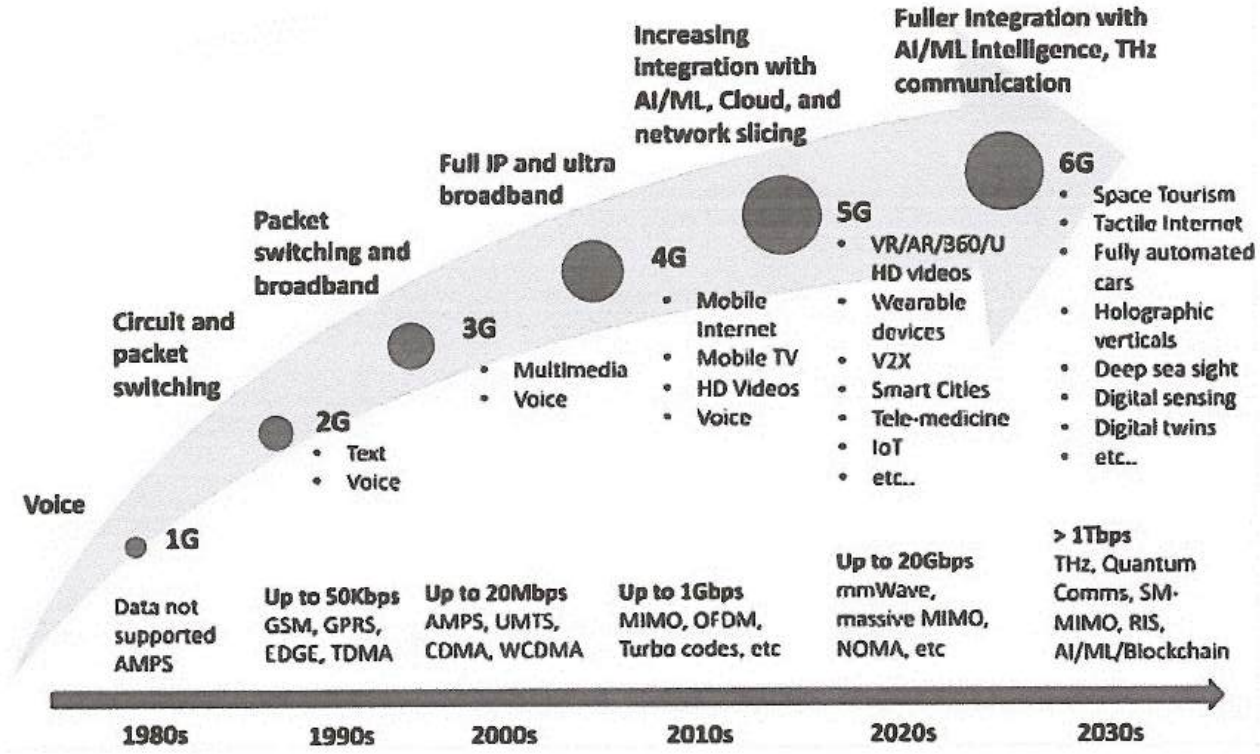


Рис. 1.4. Основні етапи для різних поколінь телекомунікацій (1-6G)

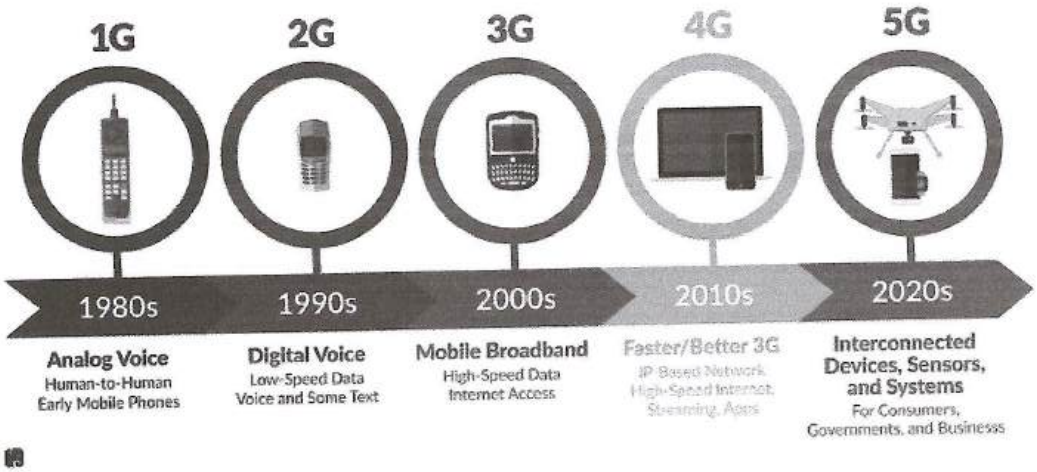


Рис. 1.5. Історія розвитку мобільних телефонів

Таблиця 1.1.

Порівняння всіх поколінь мобільних технологій

Technology → / Features ↓	1G	2G	3G	4G	5G
Start/ Deployment	1980's	1990's	2000's	2010's	2020's
Data Bandwidth	2kbps	64kbps	2Mbps	1 Gbps	Higher than 1Gbps
Technology	Analog Cellular Technology	Digital Cellular Technology	Broadband with CDMA, IP technology	Unified IP & seamless combination of broadband, LAN, WAN & WLAN	Unified IP & seamless combination of broadband, LAN, WAN, WLAN & WWW
Service	Mobile Telephony (Voice)	Digital voice, SMS, Higher capacity packetized data	Integrated high quality audio, video and data	Dynamic Information access, Wearable devices	Dynamic Information access, Wearable devices with AI Capabilities
Multiplexing	FDMA	TDMA, CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Switching	Circuit	Circuit, Packet	Packet	All Packet	All Packet
Core Network	PSTN	PSTN	Packet N/W	Internet	Internet

Еволюція бездротових мереж до сьогоднішнього дня була зумовлена насамперед потребою в більш високих швидкостях, що призвело до постійного тисячократного збільшення пропускної здатності мереж. Хоча ця потреба і надалі зростатиме, поява Інтернету речей (IoE), який об'єднує мільйони людей і мільярди машин, спричиняє радикальну зміну парадигми - від акценту на

високошвидкісному розширеному мобільному широкосмуговому зв'язку (eMBB) минулого до надійного зв'язку з низькою затримкою (URLLC) сьогодення. З моменту появи аналогового зв'язку в 1980-х роках відбувся феноменальний прогрес в еволюції мобільних мереж. Цей прогрес був не одноразовим явищем, а поступовою еволюцією поколінь з різними стандартами, можливостями і технологіями. Нові покоління з'являються приблизно кожні десять років. Графічне зображення еволюції мобільних мереж 10-річного циклу між поколіннями показано на рисунку 1.6, а обсяг мобільного трафіку, оцінений за методологією MCE, - на рисунку 1.9.

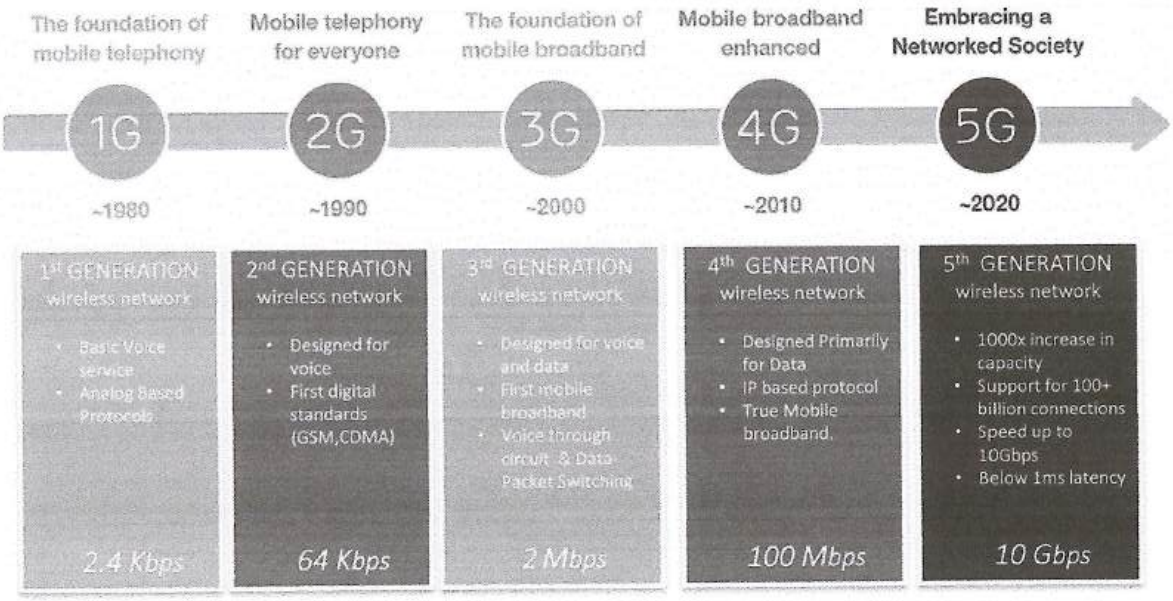


Рис. 1.6. Еволюція мобільного зв'язку 10-річний цикл між поколіннями

З моменту своєї першої появи наприкінці 1970-х років мобільні мережі швидко розвивалися і відіграють дедалі більшу роль у нашому житті. Перше покоління (тобто 1G) спирається на аналогову технологію і дозволяє здійснювати лише голосові дзвінки. Воно страждає від серйозних проблем з надійністю та перешкодами сигналу. На початку 1990-х років з'явилося друге покоління (2G), засноване на технології цифрової сигналізації. Крім голосових дзвінків, воно дозволяє користувачам надсилати короткі повідомлення (SMS) і мультимедійні повідомлення (MMS), хоча і на низьких швидкостях. У 2000 році з'явилося третє

покоління (3G), яке дозволило користувачам здійснювати відеодзвінки, користуватися Інтернетом, обмінюватися файлами, грати в онлайн-ігри і навіть дивитися телевізор онлайн. Незадовго до 2010 року з'явилося четверте покоління (4G), а в проміжку між ними було розроблено багато нових технологій (наприклад, 3.5G і т.д.). У порівнянні з 3G, 4G покращує якість послуг, зменшує затримки і підтримує багато нових послуг, таких як широкосмуговий зв'язок, мобільне телебачення і HDTV. З 2019 року почалося розгортання п'ятого покоління (5G). Його ключові особливості включають вдосконалений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB), наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC) і масовий зв'язок машинного типу (mMTC). Крім того, в основі 5G лежить концепція SBA (архітектура, заснована на послугах), що підвищує безпеку. Порівняно з попередніми поколіннями, 5G значною мірою покладається на стандартні інтернет-протоколи, такі як TCP/IP і HTTP; в той час як 5G поступово розгортається і 4G охоплює більшу частину населення, попередні покоління (2G і 3G) все ще діють, як показано на рисунку 1.7. У багатьох регіонах підтримуються лише мережі нижчих поколінь, і за певних обставин послуга буде знижена з 5G до нижчих поколінь.

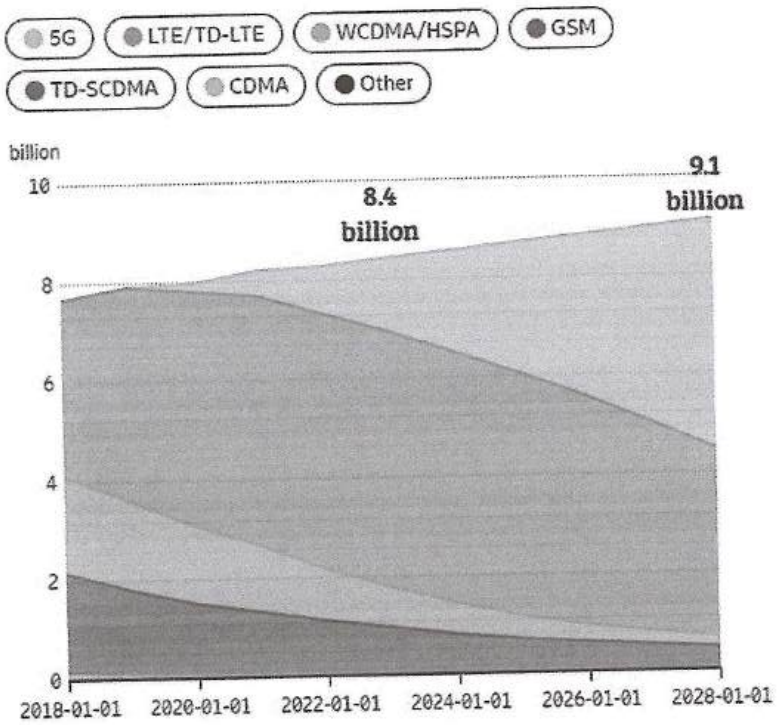


Рис. 1.7. Абоненти мобільного зв'язку (у мільярдах) за технологіями мобільного зв'язку 2018-2028 роки

Довгострокове зростання трафіку зумовлене збільшенням кількості підключень смартфонів, а також зростанням середнього обсягу даних на одну підписку, насамперед через збільшення кількості переглядів відеоконтенту. На рисунку 1.8 показано чисте зростання і загальний місячний трафік даних у глобальних мережах з 1 кварталу 2016 року по 1 квартал 2023 року, а також відсоток зростання трафіку даних у мобільних мережах у річному обчисленні.

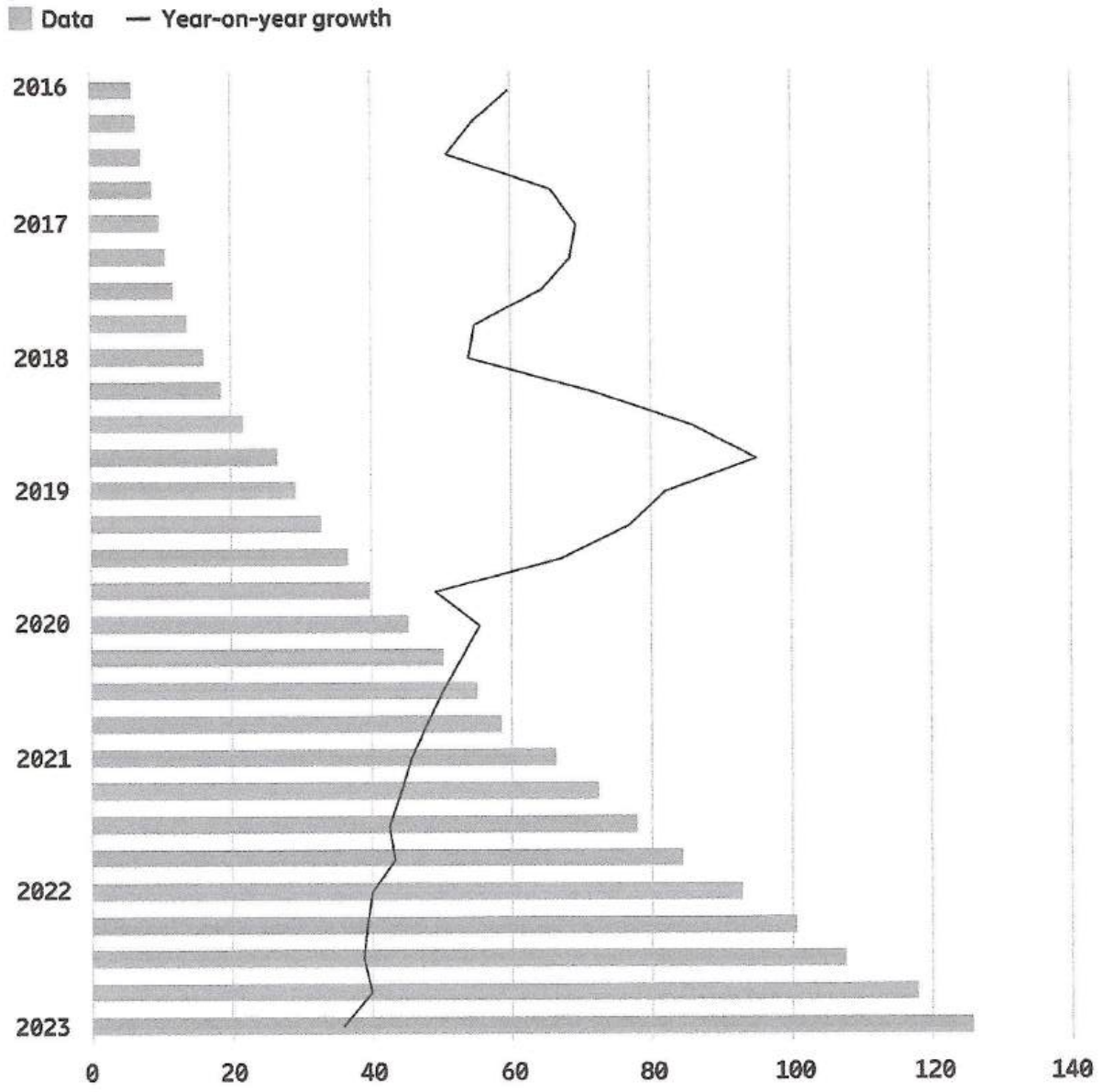


Рис. 1.8. Глобальний трафік даних мобільних мереж і річне зростання (ЕВ на місяць)

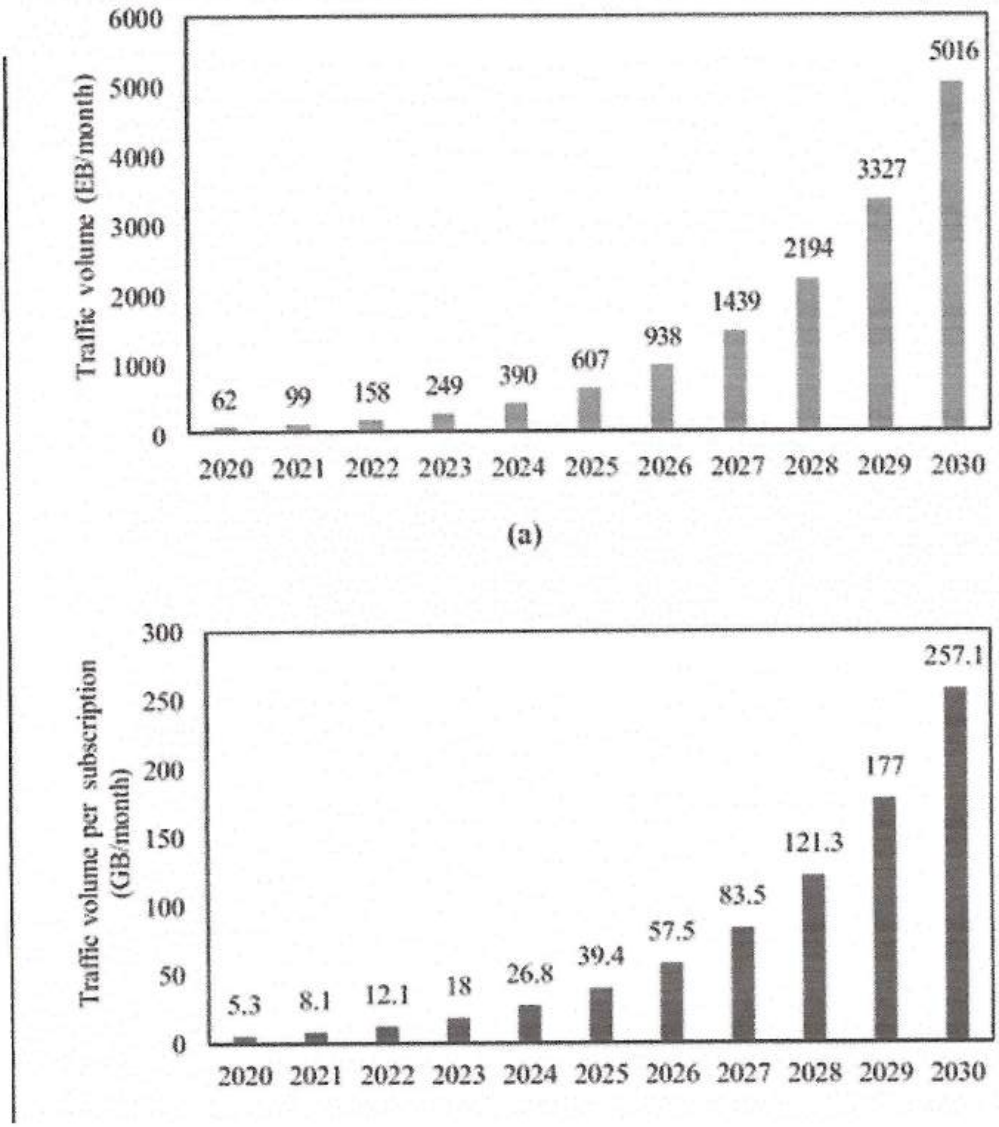


Рис. 1.9. Глобальний мобільний трафік даних у 2020-2030 роках за оцінкою ITU: (a) загальний світовий обсяг трафіку, (b) обсяг трафіку на абонента

1.11 Нульове покоління (0G)

Нульове покоління також відоме як мобільний радіотелефон. Оскільки вони були попередниками першого покоління мобільних телефонів, ці системи також називають достільниковими. Бездротові телефони почалися з того, що можна назвати 0G. Ця система була аналоговою за своєю природою, тобто аналогові сигнали використовувалися як носії. Як правило, мобільна радіосистема забезпечувала напівдуплексний зв'язок, тобто тільки одна людина говорила, а інша слухала. Ці мобільні телефони розміщувалися в транспортних засобах (легкових

або вантажних автомобілях). Обладнання мобільного радіотелефону (0G) складалося з двох основних частин: передавача (приймача) і гарнітури (пристрою з дисплеєм і кнопками набору). Передавач встановлювався в багажнику автомобіля, а гарнітура розміщувалася біля водійського сидіння, причому гарнітура і передавач з'єднувалися кабелем. Пристрій підключався до місцевої телефонної мережі лише тоді, коли швидкість зв'язку не перевищувала 20 км/с. У кожному місті була центральна антенна вежа з 25 каналами. Це означало, що мобільний приймач повинен був мати потужний передавач з дальністю передачі 50 - 70 км/с. Цим обладнанням могли користуватися лише кілька людей, оскільки було доступно лише 25 каналів. Роумінг у цьому поколінні не підтримувався. Мобільна радіотелефонія була комерційною послугою в телефонній мережі загального користування (PSTN) з унікальними телефонними номерами. У нульовому поколінні з'явилися різні варіанти двосторонніх радіотелефонів. Велика кількість обмежень у цьому поколінні призвела до появи нового покоління, яке складається з різних технологій, таких як Advanced Mobile Telephone System (AMTS), Mobile Telephone System (MTS), MTD (Mobile Telephony System D), Push to Talk (PTT) і Improved Mobile Telephone Service (IMTS). Основними користувачами були лісоруби, будівельники, агенти з нерухомості та знаменитості, які користувалися базовим голосовим зв'язком.

Недоліки 0G:

- Дуже великий розмір;
- Підтримувалося лише кілька дзвінків;
- Неможливо було здійснювати дзвінки з користувачем іншого стандарту;
- Напівдуплексне з'єднання.

1.12 Перше покоління (1G)

1G відноситься до першого покоління бездротової телефонії, мобільного зв'язку. Це аналоговий телекомунікаційний стандарт, який був запроваджений у 1980-х роках і проіснував до тих пір, поки його не замінили цифрові

телекомунікації 2G. Основна відмінність між двома наступними системами мобільного зв'язку, 1G і 2G, полягає в тому, що радіосигнали, які використовуються в мережах 1G, є аналоговими, тоді як мережі 2G є цифровими. Система 1G була відома як аналогова система мобільного зв'язку (AMPS). Цей тип аналогової мобільної системи в основному базується на технології комутації каналів і призначений для передачі лише голосу, а не даних. 1-е покоління бездротового зв'язку також можна назвати аналоговим радіопоколінням. Бездротова телекомунікаційна мережа 1G або першого покоління містить багато стільників (територія розбита на невеликі сектори, кожен сектор називається стільником, стільник покривається радіомережею з одним приймачем) і тому одна і та ж частота може використовуватися багато разів, що призводить до значного використання спектру і, таким чином, збільшує пропускну здатність системи, тобто вона може легко вмістити велику кількість користувачів. Всі стандарти 1G використовують методи частотної модуляції для голосових сигналів, і всі рішення про передачу приймаються на базових станціях (БС). Спектр всередині стільника розділений на кілька каналів, і кожному дзвінку виділяється виділена пара каналів.

Таблиця 1.2.

Характеристики 1-го покоління

Generation	1G
Starts from	1970-1984
Frequency	800-900 MHz
Data capacity	2 Kbps
Technology	Analog wireless
Standard	AMPS
Multiplexing	FDMA
Switching	Circuit
Service	Voice only
Main network	PSTN
Hand off	Horizontal

Ключові особливості 1G:

- 1G є аналоговим за своєю природою;
- Голосові дзвінки можуть модулюватися на більш високій частоті приблизно 900 МГц;
- Використовується множинний доступ з частотним розділенням каналів (FDMA);
- Для кожного голосового виклику виділяється виділена пара каналів;
- Забезпечує тільки голосовий зв'язок;
- Пропускна здатність 2 Кбіт/с;
- Використовується техніка комутації каналів.

Недоліки 1G:

- Має невелику пропускну здатність;
- Поганий голосовий зв'язок;
- Великий розмір телефону;
- Часті відключення;
- Відсутність безпеки, оскільки голосовий зв'язок відтворюється на радіовежу;
- Аналогові сигнали легко піддаються впливу перешкод, що призводить до низької якості зв'язку;
- Технології не сумісні між собою;
- Низька надійність передачі даних.

Аналогові системи використовували AMPS (Advanced Mobile Phone Systems) у США та Азії, NTT-MTS (Nippon Telegraph and Telephone Co.) в Японії, NMT (Nordic Mobile Telephone) і TACS (Total Access Communication System) в Європі та C450 в Німеччині. Таким чином, користувачі AMPS не могли дзвонити користувачам NMT або TACS. Всі ці системи пропонували хендовер і роумінг, але стільникові мережі не могли взаємодіяти між країнами. Це був один з неминучих недоліків стільникових мереж першого покоління. Всі ці технології не сумісні одна з одною, оскільки не мають єдиного стандарту. З появою мережі 1G світовий ринок

мобільного зв'язку зростав на 30-50% на рік, а кількість абонентів у всьому світі досягла близько 20 мільйонів до 1990 року.

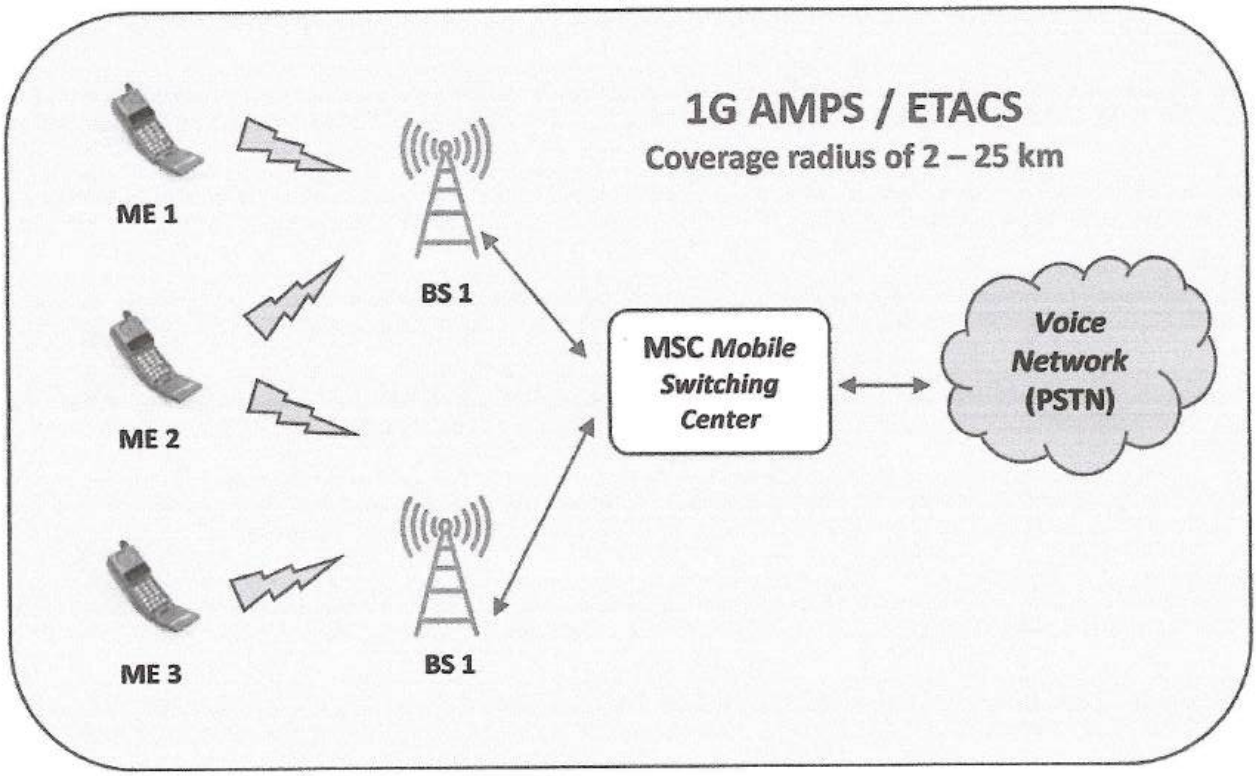


Рис. 1.10. Стільникова система першого покоління: AMPS/ETACS

1.13 Друге покоління (2G)

2G - це технологія бездротового зв'язку другого покоління. Через аналогові голосові сигнали, низьку швидкість передачі даних і недостатню пропускну здатність виникла потреба в бездротовій системі наступного покоління, яка б забезпечувала високу швидкість передачі даних і голосу. Мобільні телекомунікаційні мережі другого покоління (2G) були комерційно запущені на основі стандарту Глобальної системи мобільного зв'язку (GSM) на початку 1990-х років. Технології 2G дозволили різним мобільним мережам надавати такі послуги, як обмін текстовими повідомленнями, зображеннями та MMS (мультимедійні повідомлення). Усі текстові повідомлення, що надсилаються через 2G, зашифровані в цифровому вигляді, що дозволяє передавати дані таким чином, щоб їх міг отримати і прочитати тільки той, кому вони призначені. Технології доступу, що

використовуються в другому поколінні, - це TDMA (множинний доступ з часовим поділом каналів) і CDMA (множинний доступ з кодовим поділом каналів), а також технологія множинного доступу з частотним поділом каналів (FDD). Завдяки використанню технологій другого покоління пропускна здатність системи втричі більша, ніж у аналогових систем першого покоління. Мережева архітектура системи 2G показана нижче:

Таблиця 1.3.

Характеристики 2G, 2.5G та 2.75G

Generation	2G	2.5G	2.75G
Starts from	1990	2000	2003
Frequency	850-1900 MHz (GSM), 825-849 MHz (CDMA)	850-1900 MHz	850-1900 MHz
Data capacity	10 Kbps	200 Kbps	473 Kbps
Technology	Digital wireless	GPRS	EDGE
Standard	CDMA, TDMA, GSM	Supported TDMA/GSM	GSM CDMA
Multiplexing	TDMA, CDMA	TDMA, CDMA	TDMA, CDMA
Switching	Circuit Packet	Packet	Packet
Service	Voice data	MMS, Internet	
Main network	PSTN	GSM, TDMA	WCDMA
Hand off	Horizontal		

Ключові особливості 2G:

- Є цифровим за своєю природою;
- Використовує GSM (запроваджений у 90-х роках);
- GSM використовує цифрову модуляцію для покращення якості голосу;
- Дозволяє здійснювати голосові дзвінки та обмінюватися текстовими повідомленнями;
- 2G запровадив шифрування;
- Використовується комутація каналів;
- Перший GSM використовував 25 МГц спектру в діапазоні 900 МГц;

- Використовується множинний доступ з часовим розділенням каналів (TDMA);
- Пропускна здатність 10 Кбіт/с;
- GSM запровадив розділення термінального пристрою та пам'яті модуля ідентифікації абонента (SIM) для полегшення заміни пристрою зі збереженням номера мобільного телефону;
- Запобігання підслуховуванню.

Недоліки 2G:

- Низькочастотний цифровий сигнал;
- Не підходить для мультимедійних додатків;
- Використовує технологію, орієнтовану на з'єднання, де кінцеві системи призначені для всього сеансу зв'язку.

2.5G розшифровується як "друге з половиною покоління" і є технологією бездротового мобільного зв'язку, розробленою між її попередником 2G і наступником 3G. Термін "друге з половиною покоління" використовується для позначення послуг пакетної передачі даних (GPRS). Мобільну технологію 2G у поєднанні з GPRS іноді називають 2.5G. GPRS забезпечує швидкість передачі даних від 56 Кбіт/с до 115 Кбіт/с. Вона може використовуватися для таких послуг, як Wireless Application Protocol (WAP), Application for Multimedia Messaging Service (AMMS), а також послуг Інтернет-зв'язку, таких як електронна пошта і доступ до всесвітньої мережі. Плата за передачу даних GPRS зазвичай стягується за мегабайт переданого трафіку, тоді як плата за передачу даних традиційними каналами стягується за хвилину з'єднання. Мережі 2.5G можуть підтримувати такі послуги, як WAP, SMS, MMS, мобільні ігри, пошук і записна книжка.

Ключові особливості 2.5G:

- Проміжний між 2G і 3G;
- Використовує GPRS;
- Забезпечує телефонні дзвінки, SMS, MMS, перегляд веб-сторінок;
- Пропускна здатність 200 Кбіт/с;
- Використовує технологію комутації пакетів.

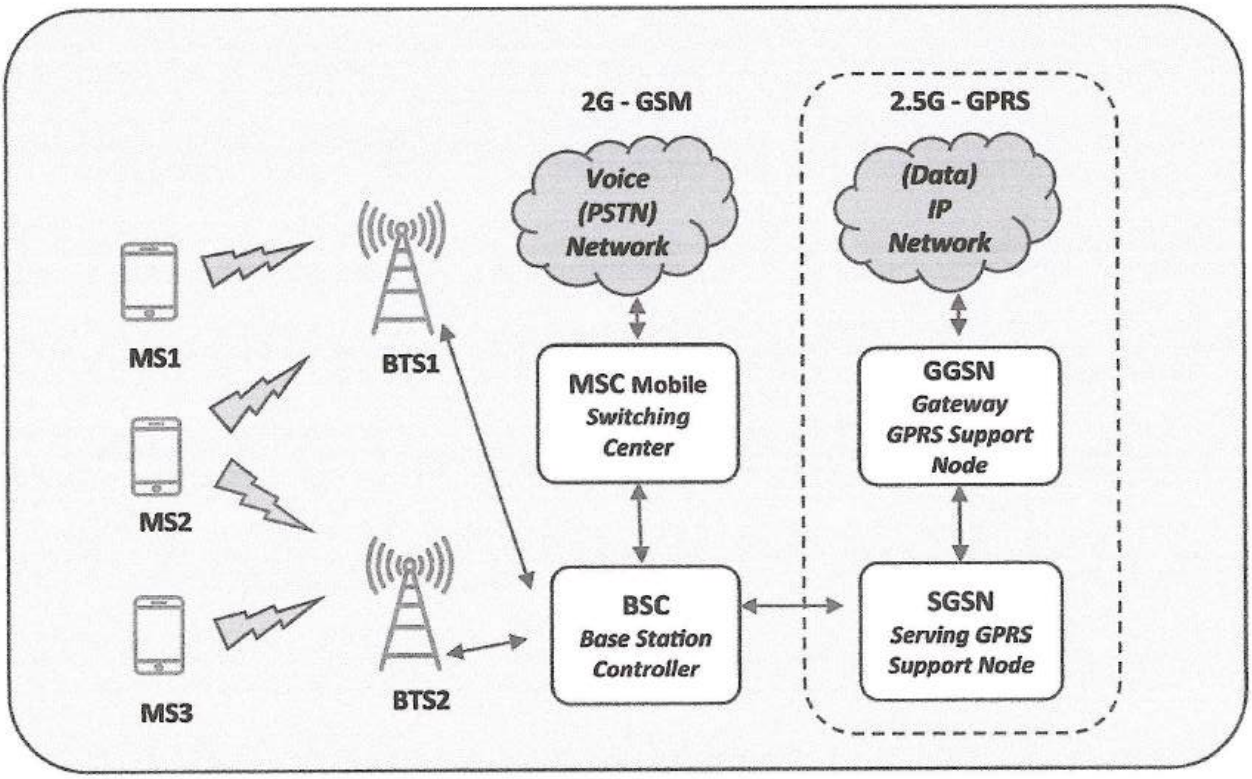


Рис. 1.11. Системи стільникового зв'язку другого покоління - GSM (2G)/GPRS (2.5G)

1.14 Третє покоління (3G)

Технологія 3G була винайдена у 2000 році. 3G розшифровується як "третє покоління" і означає технологію, яка дозволяє мобільним телефонам отримувати доступ до Інтернету - від перегляду веб-сторінок до відеодзвінків і завантаження музики. Телекомунікаційні мережі 3G підтримують послуги, які забезпечують швидкість передачі даних не менше 200 Кбіт/с. General Packet Radio Service (GPRS) - це послуга мобільної передачі даних на основі пакетної передачі даних в рамках Глобальної системи мобільного зв'язку (GSM) 2G і 3G. GPRS забезпечує швидкість передачі даних від 56 до 114 Кбіт/с. Мобільну технологію 2G у поєднанні з GPRS іноді називають 2.5G, тобто технологією між другим (2G) і третім (3G) поколінням мобільної телефонії. У 3G швидкість передачі даних зросла зі 144 Кбіт/с до 2 Мбіт/с. Технологія 3G призначена для мультимедійних мобільних телефонів, які зазвичай називають смартфонами. У 3G збільшена пропускна здатність і швидкість передачі даних, що дозволяє використовувати веб-додатки, аудіо- та відеофайли.

Швидкість в 3G дуже висока в порівнянні з 2G (3-хвилинна mp3-пісня завантажується за 11 секунд). Однією з головних цілей 3G була стандартизація єдиного глобального мережевого протоколу для заміни різних стандартів, раніше прийнятих в Європі, США та інших регіонах.

Існує три типи технологій мобільного доступу в 3G:

- CDMA 2000: базується на 2G з кодовим поділом каналів. Ширина каналу - 1,25 МГц, швидкість - 144 Кбіт/с.
- WCDMA (UMTS): широкосмуговий множинний доступ з кодовим поділом каналів, ширина каналу 5 МГц і швидкість 2 Мбіт/с.
- TD-SCDMA: синхронний множинний доступ з часовим розділенням каналів і кодовим розділенням каналів. Перший комерційний телефон 3G, LG K 8000, який в основному використовувався в європейських мережах WCDMA. Телефон 3G зазвичай має дві камери, так звану фронтальну камеру, тому він використовується для відеодзвінків, і ця камера фіксує його. Деякі недоліки телефонів 3G полягають у тому, що це більш дорогий і великий мобільний телефон, тому його важко носити з собою. HSPA: HSPA (High Speed Packet Access - високошвидкісний пакетний доступ) - це поєднання двох технологій:
- HSDPA (High Speed Downlink Packet Access);
- HSUPA (високошвидкісний висхідний пакетний доступ).

Таблиця 1.4.

Характеристики 3G, 3.5G та 3.75G

Generation	3G	3.5G	3.75G
Starts from	2001	2003	2003
Frequency	1.6-2.5 GHz	1.6-2.5 GHz	1.6-2.5 GHz
Data capacity	384 Kbps	2 Mbps	30 Mbps
Technology	Broad band/IP technology FDD, TDD	GSM/3GPP	
Standard	CDMA/WCDMA/UMTS/ CDMA2000	HSDPA/HSUPA	1exEVDO
Multiplexing	CDMA	CDMA	CDMA
Switching	Circuit Packet	Packet	Packet

Продовження таблиці 1.4.

Service	High speed voice/data/video	High speed voice/data/video	High speed internet/multimedia
Main network	Packet network	GSM, TDMA	
Hand off	Horizontal	Horizontal	Horizontal

Ключові особливості 3G:

- Високошвидкісні голосові системи, інтегровані з послугами передачі даних;
- Використовується множинний доступ з кодовим поділом каналів (CDMA);
- Підтримує передачу даних з комутацією пакетів і комутацією каналів;
- Пропускна здатність 384 Кбіт/с;
- Високошвидкісне підключення до Інтернету;
- Мобільне телебачення;
- Відеодзвінки;
- Глобальний роумінг.

Недоліки 3G:

- Дорожчий і більший мобільний телефон;
- Обмежений обсяг пам'яті;
- Високі вимоги до пропускної здатності;
- Висока плата за ліцензію на використання спектру.

HSDPA (High-speed downlink packet access) - це протокол мобільної телефонії, який також називають 3.5G (або "3½G"), що забезпечує плавну еволюцію мереж 3G на базі UMTS, забезпечуючи вищу швидкість передачі даних. HSDPA - це пакетна передача даних W-CDMA зі швидкістю до 8-10 Мбіт/с у смузі 5 МГц у низхідному напрямку WCDMA. Реалізації HSDPA включають адаптивну модуляцію і кодування (AMC), множинний вхід і множинний вихід (MIMO), гібридний автоматичний запит (HARQ), швидкий пошук стільників і вдосконалену конструкцію приймача.

Ключові особливості 3.5G:

- Використання широкосмугового множинного доступу з кодовим поділом каналів – WCDMA;
- Впроваджено вищі швидкості передачі даних до 2 Мбіт/с.

3.75G відноситься до технологій, які виходять за рамки чітко визначених бездротових/мобільних технологій 3G. Високошвидкісний пакетний висхідний доступ (HSUPA) є розвитком технології висхідного зв'язку UMTS/WCDMA. Технологія мобільного зв'язку HSUPA безпосередньо пов'язана з HSDPA, і ці дві технології є взаємодоповнюючими. HSUPA доповнить сучасні додатки для передачі даних між людьми вищими і симетричними швидкостями передачі даних, такі як мобільна електронна пошта і ігри в реальному часі між людьми. Традиційні утиліти, а також багато споживчих додатків отримають вигоду від вищих швидкостей висхідної лінії зв'язку. Канал передачі даних 3.75 має пропускну здатність приблизно 30 Мбіт/с.

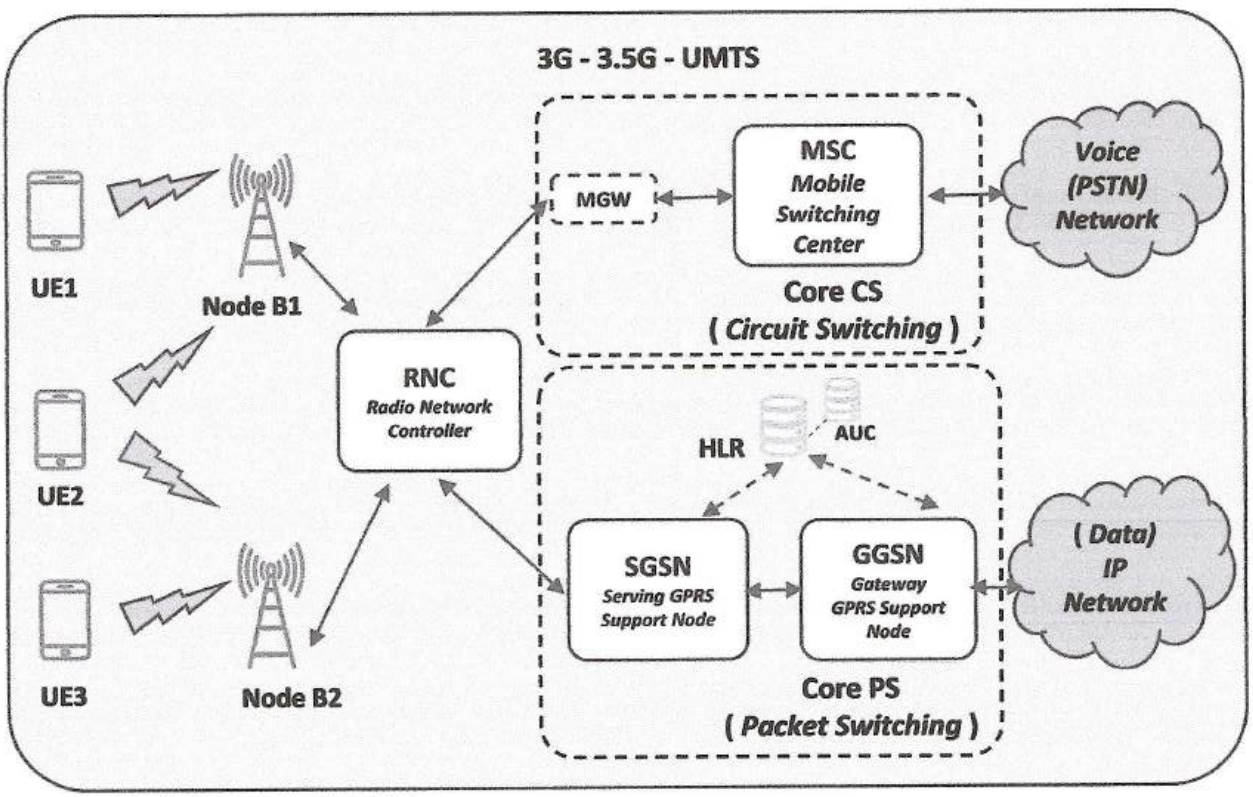


Рис. 1.12. Стільникові системи третього покоління - UMTS (3/3.5G)

1.15 Четверте покоління (4G)

4G відноситься до четвертого покоління стандартів мобільного зв'язку. Це наступник стандартів третього покоління (3G). Система четвертого покоління (4G) надає різні можливості, які не були включені в стандарти третього покоління або в будь-яке інше покоління до 3G (тобто в перше і друге покоління). Можливості 4G включають мобільний доступ до Інтернету, IP-телефонію, ігри, мобільне телебачення високої чіткості, відеоконференції, 3D-телебачення і хмарні обчислення. 4G також забезпечує мобільний надширокосмуговий доступ до Інтернету. Нова структура 4G спрямована на досягнення нового рівня користувацького досвіду і мультисервісних можливостей шляхом інтеграції всіх існуючих мобільних технологій (наприклад, GSM - Глобальна система мобільного зв'язку, GPRS - Загальна пакетна радіослужба, IMT-2000 - Міжнародний мобільний зв'язок, Wi-Fi - Wireless Fidelity, Bluetooth). Системи четвертого покоління обіцяють користувачам вищі швидкості передачі даних. Вищі швидкості передачі даних забезпечують швидший зв'язок, полегшуючи життя користувачам. З впровадженням технології четвертого покоління мережі з високою швидкістю передачі даних підключаються одночасно, забезпечуючи безперервний зв'язок у всіх географічних регіонах. Безперервне підключення забезпечує ефективний зв'язок через бездротове з'єднання. Мережева технологія когнітивного радіо забезпечує безпечне з'єднання.

4G використовує 3 типи стільникових технологій:

- OFDM (ортогональне частотне мультиплексування);
- MIMO (Multiple Input Multiple Output);
- SDR (програмно-визначене радіо).

Технологія OFDM схожа на FDM (мультиплексування з частотним розділенням каналів), але технологічна відмінність полягає в тому, що в OFDM піднесучі розташовані ортогонально одна до одної для зменшення інтерференції. Це також зменшує частотно-селективні завмирання, які суттєво впливають на сигнал, що передається в каналі. Ортогональне розташування піднесучих усуває

перехресні завади між підканалами. Однією з переваг OFDM є те, що між піднесучими не потрібні захисні смуги.

MIMO: другою технологією, що використовується в стандарті четвертого покоління, є множинний вхід і множинний вихід (MIMO). Ця система використовує кілька антен на передавачі і кілька антен на приймачі для поліпшення коефіцієнта бітових помилок (BER) і швидкості передачі даних з метою підтримки пропускної здатності системи. Ця технологія забезпечує надійний зв'язок.

Програмно-визначене радіо (SDR) було розроблено для зменшення глобальних проблем роумінгу. Технологія програмно-визначеного радіо реалізує радіофункції як програмний модуль, що працює на загальній апаратній платформі. Ця технологія має переваги завдяки своїй гнучкості, інтероперабельності, можливості підключення та реконфігурації. На додаток до цієї переваги, вона також стикається з деякими недоліками, такими як збільшення складності та фізичного розміру терміналу. Другим недоліком є недостатня кількість АЦП (аналого-цифрових перетворювачів). Розроблено і використовуються дві форми 4G: WiMAX і LTE.

LTE (Long Term Evolution) змінює поточний спосіб передачі даних в системі Інтернет-протоколу. Замість того, щоб передавати невеликі обсяги даних, як це роблять CDMA і GSM, він буде передавати великі пакети даних і оптимізувати послуги. Основна перевага LTE полягає в тому, що він зменшує затримку при передачі даних. GSM використовує технологію, яка називається дуплекс з часовим розділенням каналів (TDD), тоді як CDMA використовує дуплекс з кодовим розділенням каналів (CDD). Обидві технології є способом кодування інформації для передачі по повітрю. Поява CDD була швидшою, але світ працює за технологією GSM. Тому GSM було модернізовано до HSPA або високошвидкісного пакетного доступу. Подібно до LTE, він дозволяє передавати більші пакети інформації на вищих швидкостях.

Таблиця 1.5.

Характеристики 4G

Generation	4G
Starts from	2010
Frequency	2-8 GHz
Data capacity	200 Mbps-to-1 Gbps
Technology	LTE, WiMAX
Standard	IP-broadband LAN/WAN/PAN
Multiplexing	MC-CDMA, OFDM
Switching	Packet
Service	Voice and data
Main network	Internet
Hand off	Horizontal & Vertical

Ключові особливості 4G:

- Він пропонує швидкість від 100 Мбіт/с до 1 Гбіт/с;
- Це повністю IP-технологія, яка забезпечує швидкість передачі даних до 1 Гбіт/с;
- Включає ті ж функції, що і 3G, але надає нові послуги, такі як MMS, розважальні сервіси та цифрове телебачення високої чіткості LTE;
- Використовується технологія OFDM;
- Висока пропускна здатність мережі;
- Величезна швидкість передачі даних;
- Безпека та конфіденційність;
- Висока якість послуг.

Недоліки 4G:

- Фактичне покриття 4G обмежене великими мегаполісами;
- Підвищена складність;
- Недостатнє аналого-цифрове перетворення.

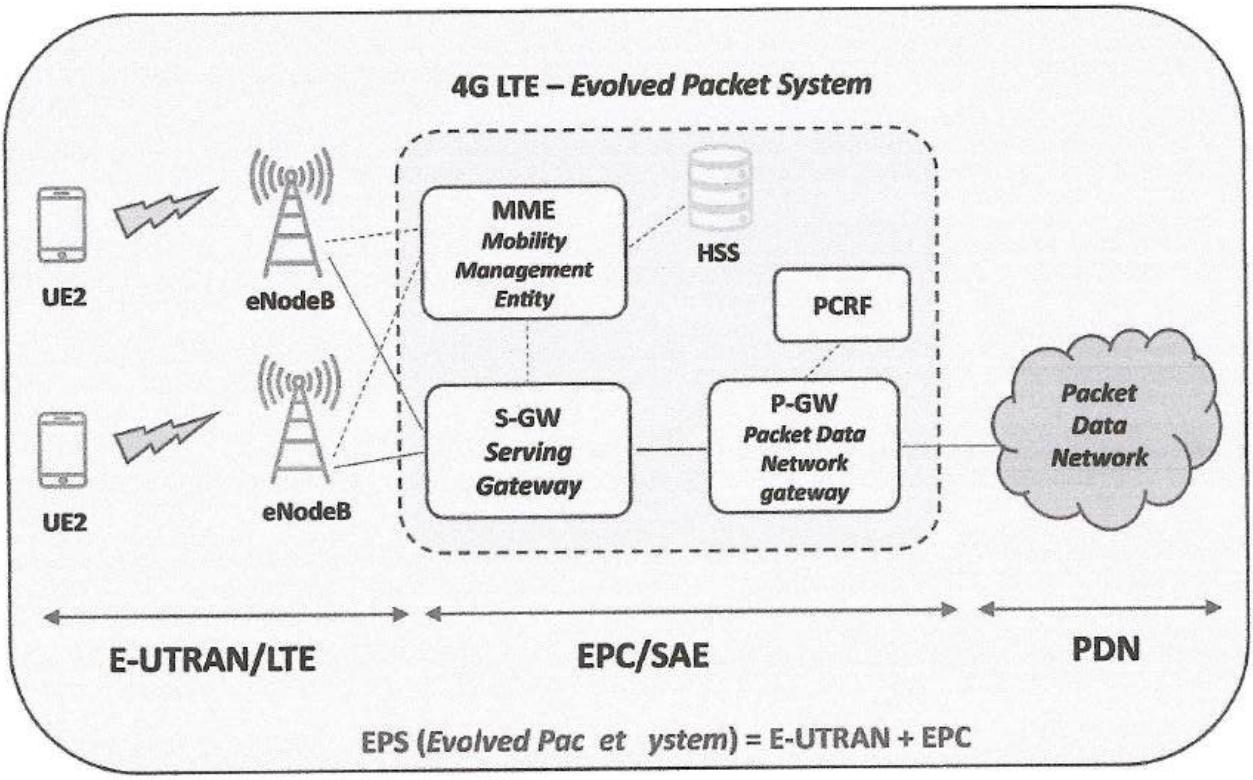


Рис. 1.13. Архітектура мережі доступу 4G LTE - еволюційна пакетна система. E-UTRAN (еволюційна універсальна наземна мережа радіодоступу) + EPC (еволюційне пакетне ядро)

1.16 П'яте покоління (5G)

Мобільні мережі 5-го покоління або проекти бездротових систем 5-го покоління, які знаменують собою наступний важливий етап стандартів мобільних телекомунікацій після нинішніх стандартів 4G/IMT-Advanced. 5G також називають технологією мобільного зв'язку після 2020 року. 5G не описує жодної конкретної специфікації в жодному офіційному документі, опублікованому будь-яким органом зі стандартизації телекомунікацій. 5G буде повноцінним бездротовим з'єднанням без обмежень, яке принесе нам ідеальне бездротове з'єднання в реальному світі - Всесвітній павутині (World Wide Web, WWW). Технологія 5G має надзвичайні можливості передачі даних і може поєднувати необмежену кількість дзвінків і безмежну передачу даних. Деякі з інших додатків, які використовують переваги мобільного зв'язку - це домашня автоматизація, інтелектуальний транспорт, безпека та електронні книги. IEEE 802.16 - це серія стандартів бездротового

широкосмугового зв'язку, затверджених Інститутом інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE). Мобільна технологія 5G змінила спосіб використання мобільних телефонів завдяки дуже високій пропускній здатності. Користувачі ніколи раніше не стикалися з такою потужною технологією. Технології 5G включають в себе всі види передових функцій, які роблять мобільну технологію 5G найпотужнішою і найбільш затребуваною в найближчому майбутньому. У п'ятому поколінні архітектура мережі складається з терміналу користувача (який відіграє ключову роль у новій архітектурі) і декількох незалежних, автономних технологій радіодоступу (RAT). Мобільна система 5G - це заснована на IP-моделі модель для об'єднання бездротових і мобільних мереж. У межах кожного з терміналів кожна з технологій радіодоступу розглядається як точка з'єднання із зовнішнім світом Інтернету.

У системі 5G кожен мобільний телефон матиме постійну "домашню" IP-адресу і "адресу доглядача", яка відображає його поточне місцезнаходження. Коли комп'ютер в Інтернеті хоче зв'язатися з мобільним телефоном, він спочатку надсилає пакет на домашню адресу, а потім сервер на домашній адресі надсилає пакет на фактичне місцезнаходження через тунель. Сервер також надсилає пакет на комп'ютер, щоб повідомити правильну адресу і надіслати більше пакетів на цю адресу. Хмарні обчислення - це технологія, яка використовує Інтернет і центральний віддалений сервер для зберігання даних і додатків. У мережі 5G цей центральний віддалений сервер буде нашим контент-провайдером. Хмарні обчислення дозволяють споживачам і компаніям використовувати додатки без установки і отримувати доступ до своїх особистих файлів на будь-якому комп'ютері з доступом до Інтернету. Ця ж концепція буде використовуватися в нанохмарі, де користувач буде прагнути отримати доступ до свого особистого облікового запису від глобального контент-провайдера через нанохмару. Розвиток хмарних обчислень відкриває величезні можливості для операторів. Вдосконалені білінгові інтерфейси технології 5G роблять її більш привабливою та ефективною з такими майбутніми перспективами.

Таблиця 1.6.

Характеристики 5G

Generation	5G
Starts from	2015
Frequency	600 MHz-300 GHz
Data capacity	Higher then 1 Gbps
Technology	IPv6
Standard	IP-broadband LAN/WAN/PAN&WWW
Multiplexing	CDMA
Switching	All packet
Service	Dynamic Information access, wearable devices with AI Capabilities
Main network	Internet
Hand off	Horizontal & Vertical

Ключові особливості 5G:

- Пропонує більше послуг і компенсує глобальне потепління;
- Дешевий;
- Надає інструменти моніторингу абонентів для швидкого реагування;
- Високоякісні послуги 5G, засновані на політиці уникнення несправностей;
- 5G дозволить передавати дані на гігабітних швидкостях, підтримуючи майже 65 000 з'єднань;
- Завдяки віддаленому управлінню, яке пропонує технологія 5G, користувач може отримати більш якісне та швидке рішення;
- Швидкість завантаження і вивантаження даних за допомогою технології 5G наближається до свого піку;
- Технологія 5G також підтримує віртуальні приватні мережі.

Недоліки 5G:

- Проблеми з інфраструктурою, 5G вимагає розгортання щільної інфраструктури через використання більш високих частот, що може бути дорогим і тривалим процесом;
- Радіус дії сигналу, сигнал 5G має менший радіус дії, ніж у попередніх поколінь, що вимагає більшої кількості веж та інфраструктури.

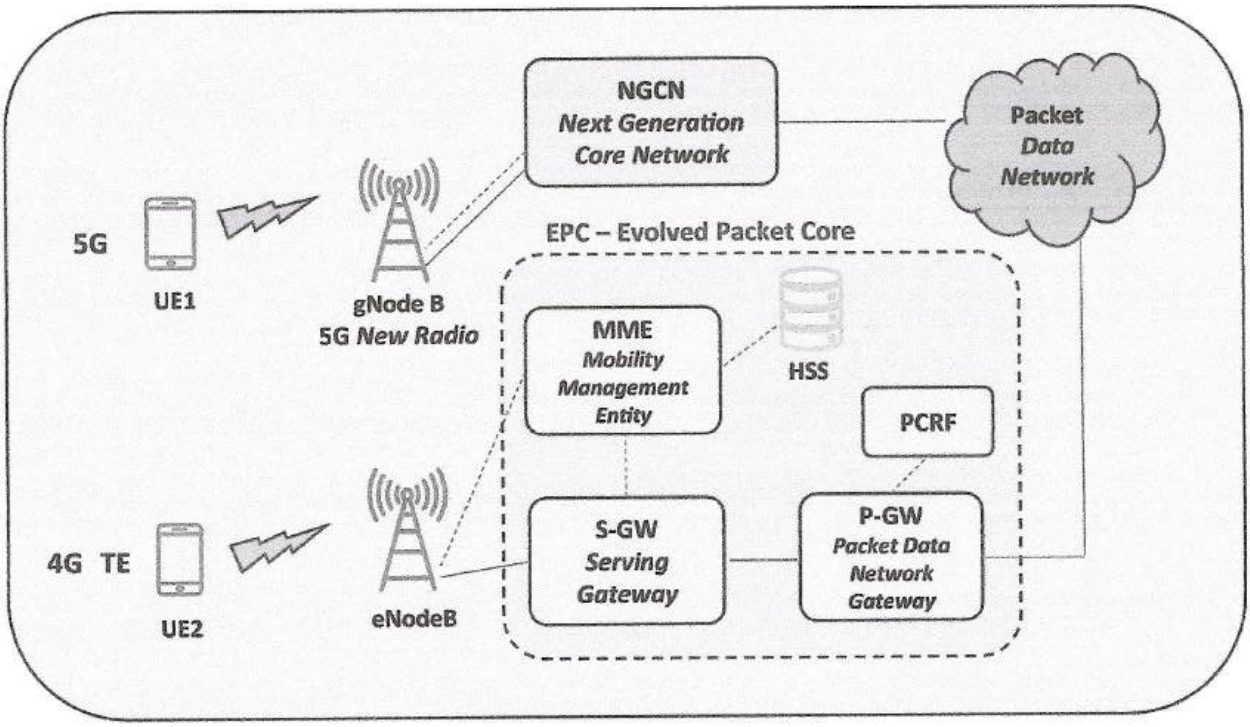


Рис. 1.14. Незалежні архітектури 4G і 5G

Таблиця 1.7.

Характеристики від 1G до 5G

Generation	1G	2G	3G	4G	5G
Period	1980 to 1990	1990 to 2000	2000 to 2010	2010 to 2020	2010 to 2020
Bandwidth	150/900 MHz	900 MHz	100 MHz	100 MHz	1000xBW per unit area
Frequency	Analog signal (30 KHz)	Digital signal (1.8 GHz)	1.6 to 2.0 GHz	2 to 8 GHz	3 to 300 GHz
Data rate	2 Kbps	64 Kbps	144 Kbps to 2 Mbps	100 Mbps to 1 Gbps	1 Gbps <

Продовження таблиці 1.7.

Characteristic	First wireless communication	Digital communication	Digital broadband, increased speed	High speed, all IP	
Technology	Analog cellular	Digital cellular (GSM)	CDMA, UMTS, EDGE	LTE, Wi-Fi	WWW

2 МЕТОДИ МОДУЛЯЦІЇ ТА КОДУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LTE

2.1 Модуляція

Мобільні мережі спілкуються бездротовим способом за допомогою електромагнітних хвиль, які поширюються в повітрі між антенами мобільних операторів і нашими мобільними телефонами. Електромагнітні хвилі також називають радіохвилями, а бездротовий інтерфейс - повітряним. Завдяки законам фізики ці радіохвилі мають певні властивості, які мобільні мережі використовують для передачі та прийому мобільних сигналів та їх ефективного використання в мережі. Мережі 4G LTE мають різні допоміжні засоби для підвищення досяжної швидкості передачі даних, включаючи агрегацію несучих, технологію антен MIMO і методи цифрової модуляції. У цифровій передачі даних досконаліші методи модуляції дозволяють підвищити ефективність мережі, що призводить до збільшення швидкості передачі даних.

4G LTE забезпечує пікову швидкість передачі даних до 3 Гбіт/с завдяки технології LTE Advanced Pro, яка вимагає ефективного використання ресурсів радіомережі для повного використання доступної смуги пропускання. У LTE спектрально-ефективний OFDM може використовувати модуляцію QAM і QPSK для досягнення вищої швидкості передачі даних на символ.

Модуляція є однією з найбільш фундаментальних концепцій мобільного зв'язку і застосовується багато разів під час кожної передачі мобільного сигналу. Модуляція може бути аналоговою і цифровою, і обидві форми модуляції використовуються в сучасних мобільних стільникових мережах.

Модуляція - це процес кодування інформаційного сигналу (даних) за допомогою несучого сигналу для безпечної, ефективної та результативної передачі даних без перешкод. Він передбачає зміну характеристик несучого сигналу, таких як амплітуда, частота і фаза, відповідно до даних.

Модуляція означає модифікацію сигналу, що, природно, викликає питання, навіщо комусь це робити. Модифікація робиться для того, щоб дані, які ми хочемо

відправити (наприклад, голосовий дзвінок, повідомлення WhatsApp тощо), можна було перетворити на достатньо сильний сигнал, який можна безпечно передати, відповідно до пропускної здатності мережі. Саме тут на допомогу приходять методи цифрової та аналогової модуляції. Хоча більшість сучасних мобільних мереж використовують ряд методів цифрової модуляції для досягнення кращої швидкості передачі з доступного спектру, мережа все ще використовує аналогову модуляцію для передачі радіохвиль в ефір. Модуляція передбачає змішування двох окремих сигналів, один з яких є власне даними, а інший - несучим сигналом, який передає дані між мережею і телефоном. Сигнал даних також називають сигналом модуляції.

Сигнал, який містить реальну інформацію, називається сигналом модуляції. Процес розміщення даних у несучому сигналі називається модуляцією, що вимагає певних змін у характеристиках несучого сигналу. Сигнал модуляції або інформаційний сигнал також називається сигналом базової смуги. Інформаційний сигнал зазвичай має низькі частоти порядку декількох герц (Гц) або кілогерц (Гц). Спрощена схема нижче візуалізує інформаційний сигнал.

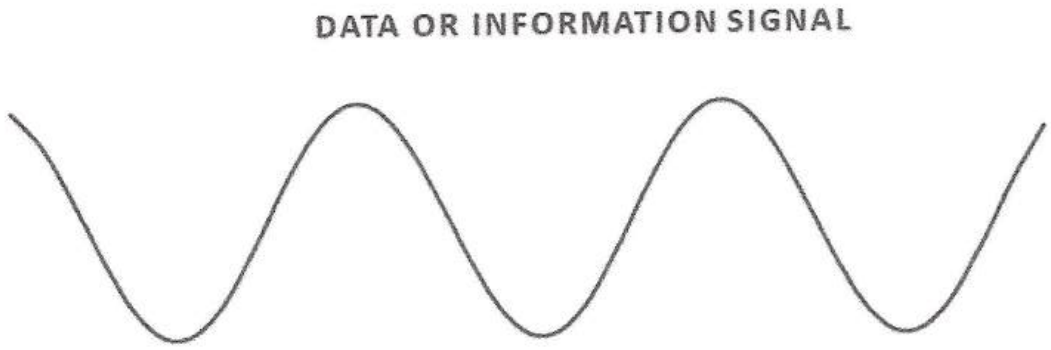


Рис. 2.1. Інформаційний сигнал

Несуча хвиля або несучий сигнал - це термін, який позначає частотний канал, що передає важливу інформацію з однієї частини мережі в іншу. Цей частотний канал є частиною загального частотного спектру, що належить мобільному оператору. Сигнал-носій - це не самі дані, а лише їх носій; це, по суті, порожній, але дуже безпечний контейнер, в який ми можемо помістити інформацію для її

успішної доставки. Як показано на рисунку нижче, несучі сигнали працюють на високих частотах.

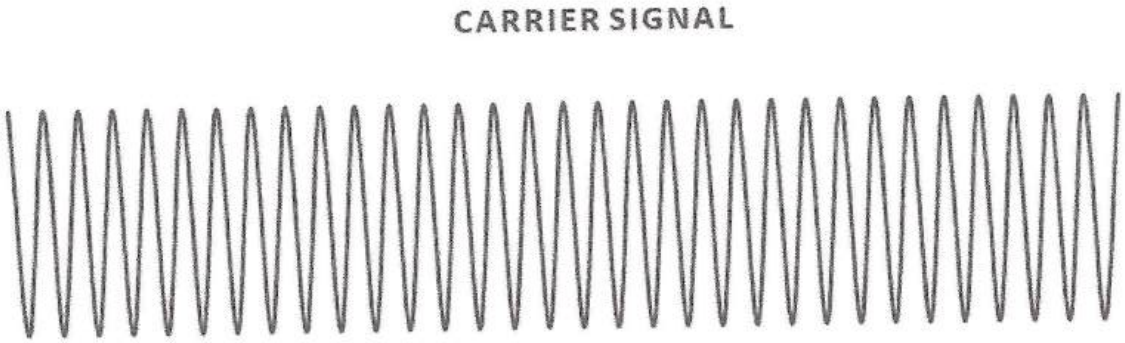


Рис. 2.2. Несучий сигнал

Аналогова модуляція означає модуляцію аналогових даних аналоговим сигналом. Найпоширенішим прикладом аналогової модуляції є радіостанції, які пропонують AM і FM-канали. AM або амплітудна модуляція вимагає зміни висоти тону (амплітуди) несучого сигналу відповідно до інформаційного сигналу. У випадку радіостанцій це означає модуляцію аналогових даних (звук/музика тощо) аналоговим сигналом (радіохвилею). Потім модульований сигнал передається через радіопередавачі. У випадку FM-каналів використовується частотна модуляція, що означає, що замість зміни висоти тону несучого сигналу змінюється частота для передачі інформації. Фазова модуляція - це третя форма аналогової модуляції, яка вимагає зміни фази несучого сигналу. Для ілюстрації, існують також цифрові радіоприймачі, такі як радіоприймачі цифрового аудіомовлення (DAB), які використовують ортогональне частотне мультиплексування (OFDM), так само як 4G LTE.

Несучий сигнал - це радіохвиля, яка працює на радіочастотах (РЧ), і цей сигнал завжди аналоговий. Дані, закодовані в цьому аналоговому сигналі, можуть бути цифровими або аналоговими. Фундаментальною відмінністю між цифровими та аналоговими мережами є "цифрові дані", оскільки радіохвилі в усіх мобільних мережах поширюються в повітрі однаково. Ключовими характеристиками несучого сигналу, які необхідно регулювати, є амплітуда, частота і фаза (кут).

2.2 Цифрова модуляція, що використовується в 4G/LTE

Цифрова модуляція дозволяє безпечно та ефективно передавати інформацію, максимально використовуючи технологічні засоби, що надаються процесорами, які значно розвинулися за останні роки. Саме завдяки виробництву високоінтегрованих цифрових процесорів і надзвичайному зростанню швидкості обробки даних мобільні технології досягли сьогоднішнього рівня. Один розвиток є наслідком іншого.

Було використано кілька схем модуляції. Найпростішою схемою модуляції є PSK (фазова маніпуляція), як показано на рис. 2.3, яка дозволяє передавати лише один біт 0 або 1. Схема праворуч називається сузір'ям і показує нам два можливих положення, тобто фазу 0° або 180°.

У ранніх системах найпоширенішою модуляцією була QPSK (квадратурна фазова маніпуляція), яка дозволяє чотири можливих положення або чотири можливих стани в межах сузір'я, або краще, з чотирма фазовими переходами 45°, 135°, 225° або 315°, як показано на рис. 2.4. У цьому випадку чотири можливих положення - це 11/01/00/10.

Інші поширені модуляції - 16-QAM і 64-QAM, як показано на рис. 2.5. У цих випадках ми маємо як фазові, так і амплітудні зміни.

У таблиці 2.1 для кожного типу модуляції наведено кількість бітів, які генеруються і передаються на один символ, що передається.

Таблиця 2.1.

Модуляція × Біти/символ

Modulation	Bits/symbol	Number of states
PSK	1	2
QPSK	2	4
16-QAM	4	16
64-QAM	6	64
256-QAM	8	256

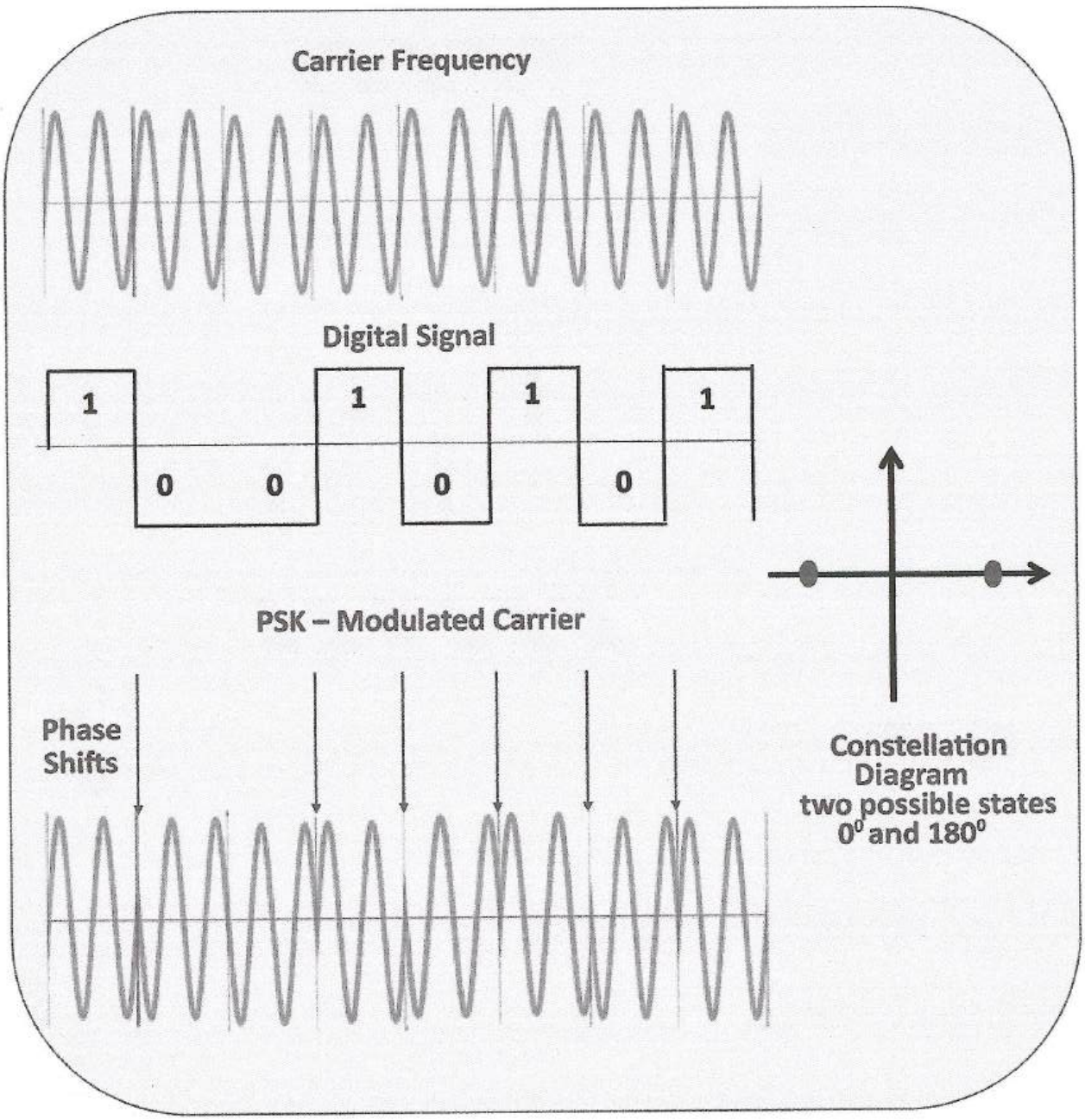


Рис. 2.3. PSK (Phase-Shift Keying) модуляція (фазова модуляція)

Символ відповідає формі, якої набуває несуча хвиля після модуляції, і відповідним станам, які при цьому генеруються. Залежно від кількості переходів параметрів, що містяться в періоді, буде відповідна кількість інформації, представленої цими переходами. Чим більша кількість можливих переходів, тим більша кількість інформації міститься в символі. Швидкість, з якою передаються символи в секунду, називається швидкістю передачі даних або швидкістю передачі символів. Швидкість передачі даних в секунду називається бітовою швидкістю. Співвідношення між швидкістю передачі символів і бітовою швидкістю показує,

скільки бітів (n) може бути змінено або промодульовано за 1 несучу секунду. Рисунок 2.6 ілюструє це співвідношення.

У випадку PSK швидкість передачі символів дорівнює швидкості передачі бітів. У випадку QPSK швидкість передачі символів дорівнює половині бітової швидкості і т.д. Інший спосіб виразити цю залежність - сказати, що швидкість передачі даних еквівалентна величині, оберненій до бітової швидкості, тобто вона еквівалентна періоду переходу бітової швидкості. Швидкість передачі даних вимірюється в символах за секунду (Sps).

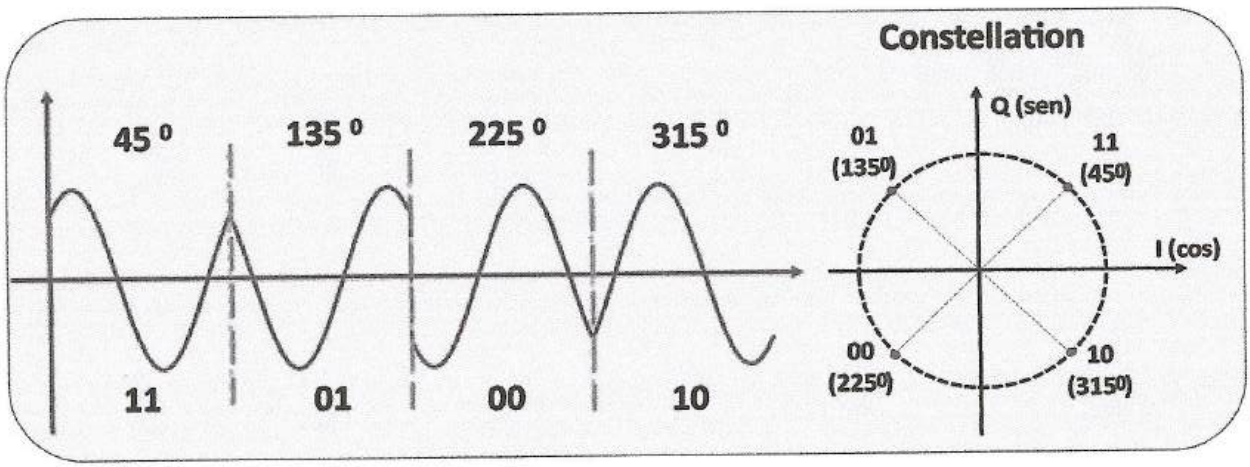


Рис. 2.4. Модуляція QPSK (квадратурна фазова модуляція)

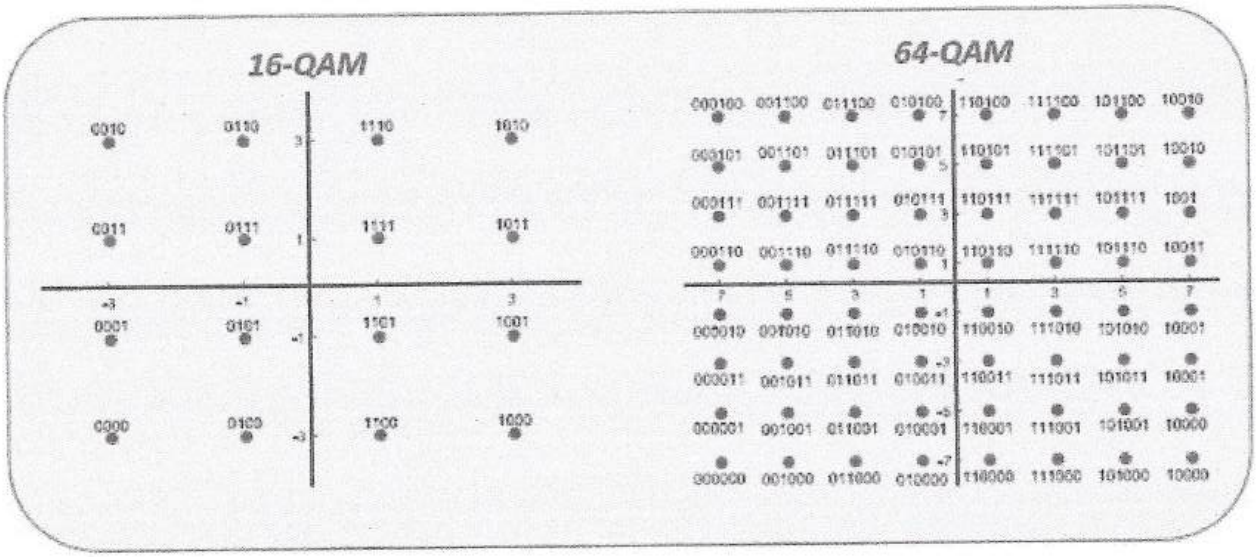


Рис. 2.5. Квадратурна амплітудна модуляція (QAM)

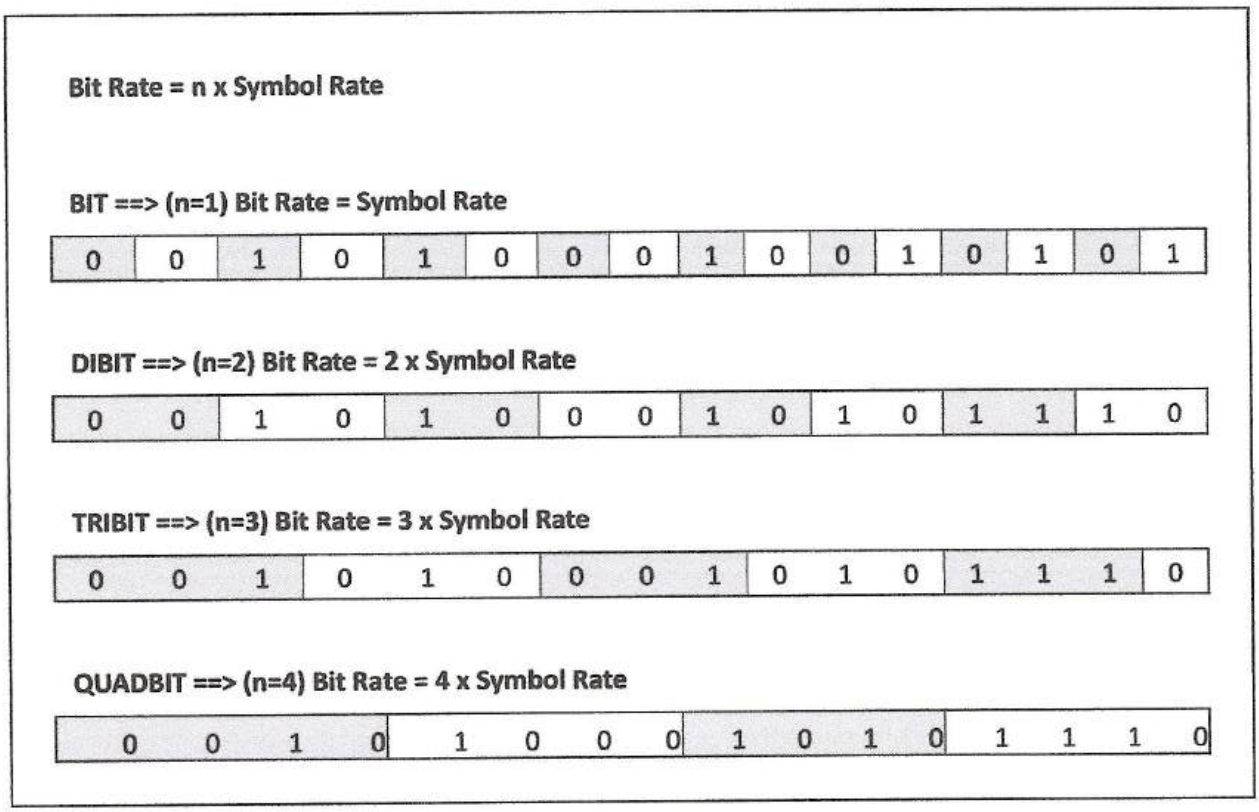


Рис. 2.6. Відповідність між бітовою швидкістю та символьною швидкістю

2.3 FDD та TDD

Ми також знаємо, що радіочастотний спектр можна розділити на смуги і що ці смуги придатні для передачі інформації в обох напрямках: від користувацького обладнання/пристрою (UE) до базової станції, тобто для висхідної лінії зв'язку, і в зворотному напрямку (низхідна лінія зв'язку). Для кожного напрямку можуть бути виділені незалежні робочі смуги FDD (дуплекс з частотним розділенням каналів), причому нижня смуга зазвичай використовується для висхідного напрямку, а верхня - для низхідного, або частина часу передачі може бути виділена для передачі інформації в одному напрямку, а частина загального часу - для передачі інформації в іншому напрямку, TDD (дуплекс з часовим розділенням каналів), як показано на рисунку 2.7.

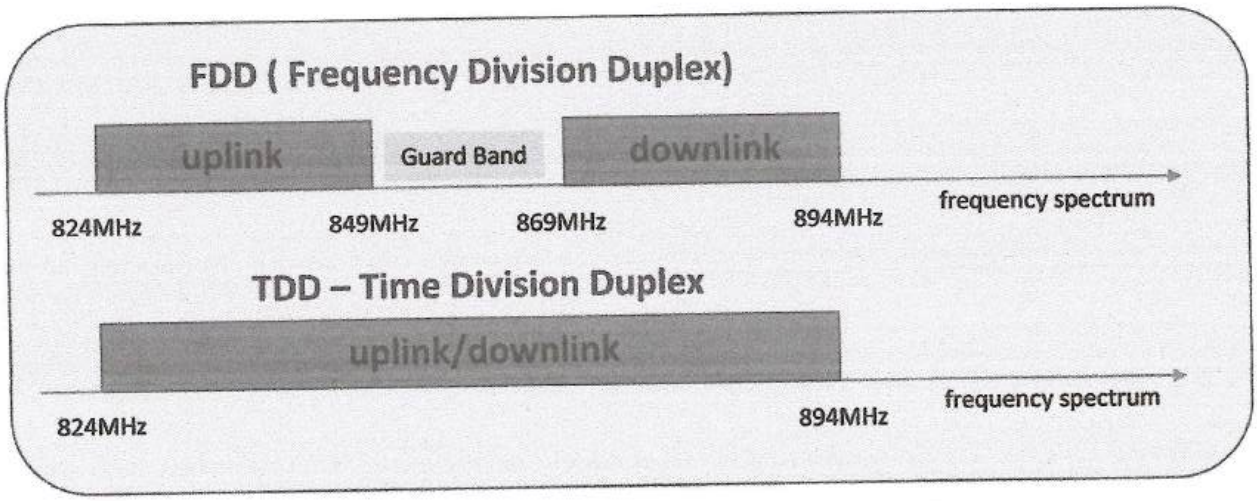


Рис. 2.7. Спектральний поділ FDD і TDD

2.4 FDMA та TDMA

Кожна смуга передачі поділяється на канали. Кожному каналу присвоюється несуча частота, яка може працювати в невеликій, обмеженій смузі. Модуляція дозволяє змінювати один або декілька параметрів несучої частоти таким чином, щоб вона передавала інформацію, яка відповідає цій зміні або змінам.

Кожен канал, у свою чергу, може бути мультиплексований. Це можна зробити шляхом поділу спектра на піднесучі, що називається частотним мультиплексуванням, FDMA (Frequency Division Multiple Access - множинний доступ з частотним поділом). Інший спосіб використання спектра для мультиплексування полягає у виділенні частини ефірного часу на одну піднесучу, що називається множинним доступом з часовим розділенням каналів (Time Division Multiple Access, TDMA). Ця частина часу, що виділяється одній піднесучій, називається часовим інтервалом (time slot). На рисунку 2.8 показано дві основні форми мультиплексування і конфігурації піднесучих.

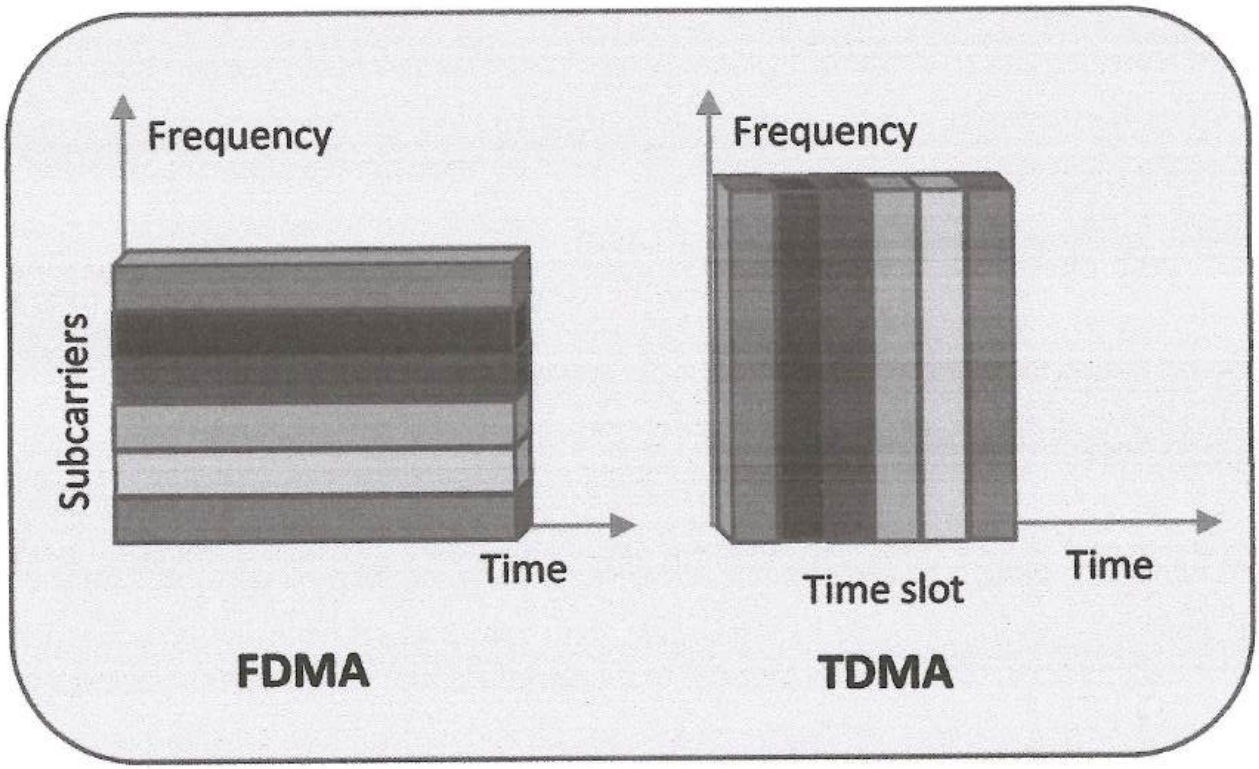


Рис. 2.8. Способи мультиплексування каналу зв'язку

У разі поділу спектра на кілька частотних каналів використовуються ортогональні піднесучі, про які ми згадували раніше, але зараз пояснимо докладніше.

При звичайному поділі спектра кожна несуча частота займає певну смугу і зберігає захисну смугу, щоб не створювати перешкод для сусіднього каналу. У випадку ортогонального розділення спектра несучі частоти стискаються, але дуже дивним чином, коли через одну несучу частоту проходить сигнал з максимальною амплітудою, всі інші проходять одночасно з нульовим значенням. Це дозволяє набагато ефективніше займати спектр, заощаджуючи таким чином захисні смуги. У часовій області характеристика ортогональності означає, що будь-які дві піднесучі відрізняються одна від одної на ціле число циклів у заданому часовому інтервалі. Тобто, вони розділені частотою, кратною один одному. Отже, перша піднесуча має частоту f, друга - 2f і так далі до nf, яка є найвищою піднесучою, що використовується. Рисунок 2.9 чітко показує, як це можливо.

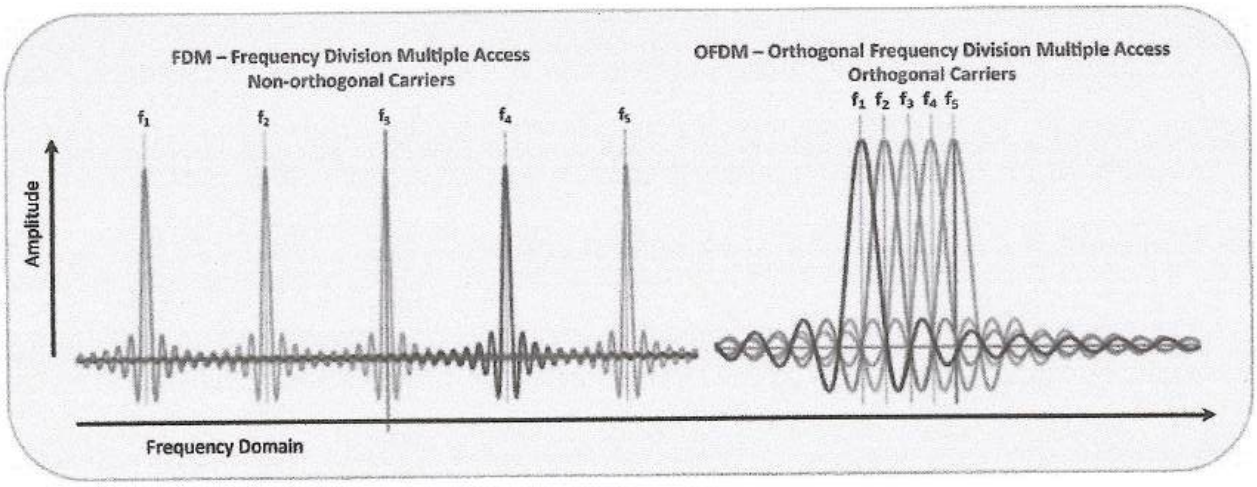


Рис. 2.9. Різниця між ортогональними та неортогональними несучими

2.5 OFDM та OFDMA

OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access - ортогональний множинний доступ з частотним розділенням каналів) - це метод модуляції, заснований на мультиплексуванні з частотним розділенням каналів, подібний до FDM. Тільки в цьому випадку кілька піднесучих, що займають певну смугу спектра, ортогональні один до одного і модулюються незалежно. Може використовуватися кілька типів модуляції, починаючи від QPSK і закінчуючи 256-QAM. Чим нижчий рівень модуляції, тим нижча швидкість передачі даних. Рівень модуляції визначається відношенням C/N (несуча/шум). Чим вище загасання на шляху несучої, тим нижчий рівень отримує приймач і тим важче виявити переходи, що передаються несучою.

Початкова концепція OFDMA полягає в перетворенні цифрового сигналу з високою швидкістю передачі даних на багато піднесучих з меншою швидкістю передачі даних і меншою чутливістю до проблем, притаманних радіопередачі, що робить передачу більш стійкою. Це схоже на поділ вантажу величезної вантажівки на менші вантажі, що перевозяться меншими транспортними засобами, які разом перевозять весь вантаж великої вантажівки. Оскільки піднесучі передаються паралельно, кожна піднесуча може бути модульована з меншою швидкістю передачі символів, ніж це було б потрібно для оригінального сигналу. OFDM

використовує концепцію, розроблену французьким математиком Жаном-Батистом Жозефом Фур'є (1768 - 1830). Фур'є розробив тригонометричний ряд, який отримав назву ряд Фур'є. Основна концепція цього відкриття полягає в наступному: "Кожен періодичний сигнал може бути представлений сумою гармонійно пов'язаних синусоїдальних сигналів (синуса і косинуса)". Кожен сигнал має певну частоту, фазу та амплітуду. Цим процесом ми перетворюємо події, що відбуваються в часовій області, в події, що відбуваються в частотній області. Рисунок 2.10 полегшує розуміння цієї концепції.

З розвитком процесорів і математичних алгоритмів, які називаються швидким перетворенням Фур'є (ШПФ), цей процес можна реалізувати в конкретних схемах. Це стосується процесорів, які використовуються як в 4G, так і в 5G.

Розглянемо докладніше, як працює OFDMA-модуляція.

Як згадувалося раніше, принцип OFDMA полягає в поділі сигналу з високою швидкістю передачі даних на багато піднесучих, які працюють з меншою швидкістю передачі даних і менш схильні до спотворень і перешкод під час розповсюдження. Типова система може мати сотні ортогональних піднесучих, рівномірно розташованих у радіочастотному спектрі на відстані 10 або 15 кГц. У випадку LTE ця відстань становить 15 кГц. Оскільки вони розташовані на відстані один від одного і передаються паралельно, можливо, що кожна піднесуча модулюється з меншою швидкістю передачі символів. Всі піднесучі працюють з однаковою символьною швидкістю, але можуть працювати з різною бітовою швидкістю, тобто кожна піднесуча може модулюватися незалежно. Працюючи на нижчій швидкості передачі символів, ніж оригінальна несуча, піднесучі набагато стійкіші до розповсюдження.

Щоб зробити це можливим, процес OFDMA починається з перетворення модульованого сигналу в QPSK, 16-QAM, 64-QAM або навіть 256-QAM з високою швидкістю передачі на піднесучих, які будуть передаватися одночасно паралельно. Цей процес називається зворотним перетворенням Фур'є. Згадуючи цю концепцію, на цьому етапі процесу передачі, після розділення вихідної піднесучої на піднесучі, ми намагаємося перетворити піднесучі, що працюють на різних частотах з

інтервалом 15 кГц, в один композитний сигнал, який об'єднує всі індивідуально модульовані піднесучі. На рисунку 2.10 показано, як це працює на практиці у вигляді блок-схеми.

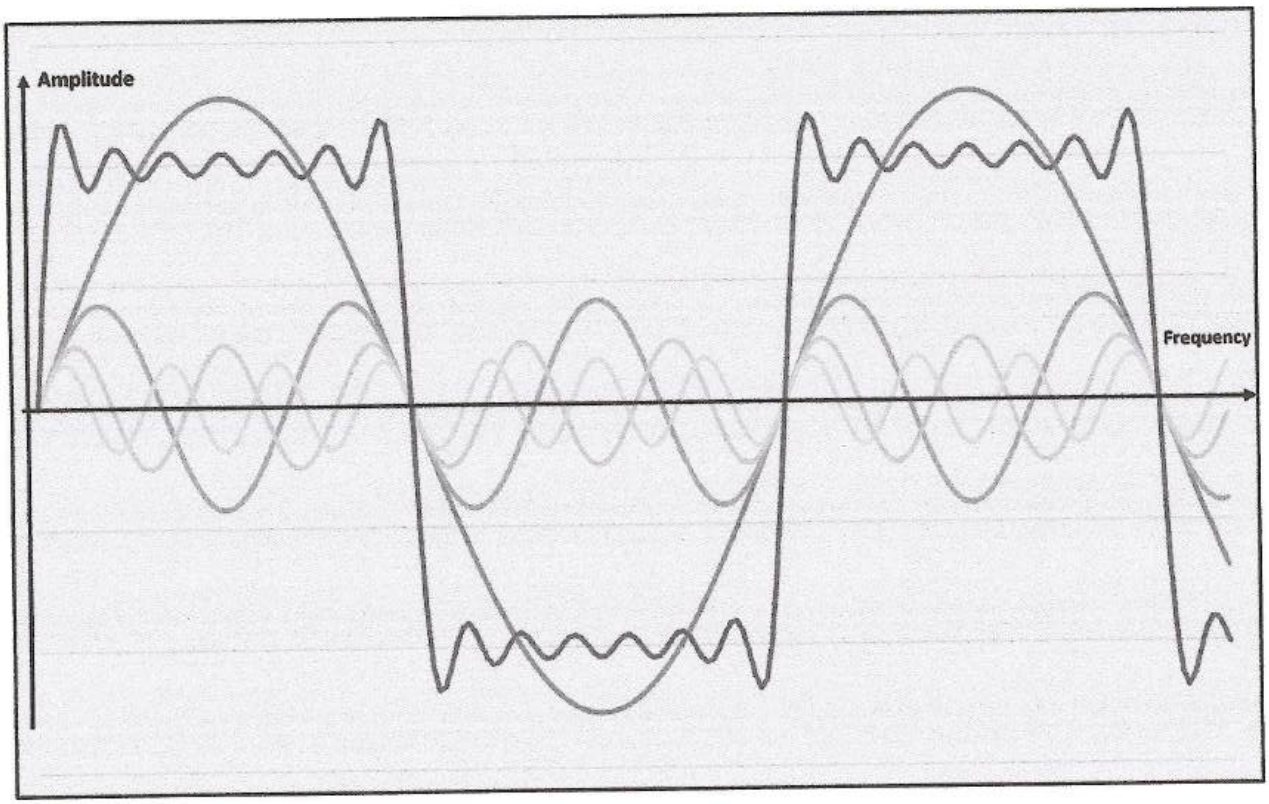


Рис. 2.10. Розкладання періодичного сигналу в ряд Фур'є

Аналізуючи рисунок, ми бачимо, що вхідний сигнал, потік бітів з високою швидкістю передачі, проходить процес модуляції (QPSK, 16-QAM, 64-QAM або 256-QAM), рівень модуляції якого визначається умовами розповсюдження конкретного користувача, з метою перетворення бітів у модульовані символи. У послідовності виконується послідовно-паралельне перетворення, яке, у конкретному випадку LTE, розбиває набір символів на блоки по 7 символів, які будуть модулювати одну з 12 піднесучих. Цей набір, утворений блоком з 7 символів × 12 піднесучих, називається RB (Resource Block). Таким чином, один RB містить загалом 84 символи (Resource Elements).

Перш ніж ми продовжимо, нам краще зрозуміти, як виглядають ці блоки. На рисунку 2.11 схематично показано, як ці блоки конфігуруються. Важливо зазначити, що ці блоки містять як дані користувача, так і керуючі дані, які необхідні для

ефективного зв'язку між користувацьким обладнанням (UE) і базовою станцією як для висхідного, так і для низхідного каналів зв'язку. Конструкція LTE передбачає, що кожен кадр зв'язку повинен тривати 10 мс. Ми багато говорили про пакетні мережі, мережеві пакети або навіть про пакети даних з чергуванням, але ми ще не визначили, що таке "пакет даних". Отже, пакет даних - це набір даних, які об'єднані/упаковані для передачі протягом певного періоду часу. У будь-якій мережі передачі даних важливо мати можливість своєчасно передавати події, які відбуваються в так званій синхронній мережі, яка суворо регулюється протоколом або набором правил, що визначають, що має відбуватися і коли.

Тобто, кадр має тривати 10 мс і ділитися на підкадри по 1 мс, які, в свою чергу, складаються з 2 часових інтервалів, як показано на рисунку 2.12. Кожен часовий інтервал містить 6 символів, і кожен символ фактично триває 66,7 мкс (мікросекунди), або 2048 × 32,55 нс.

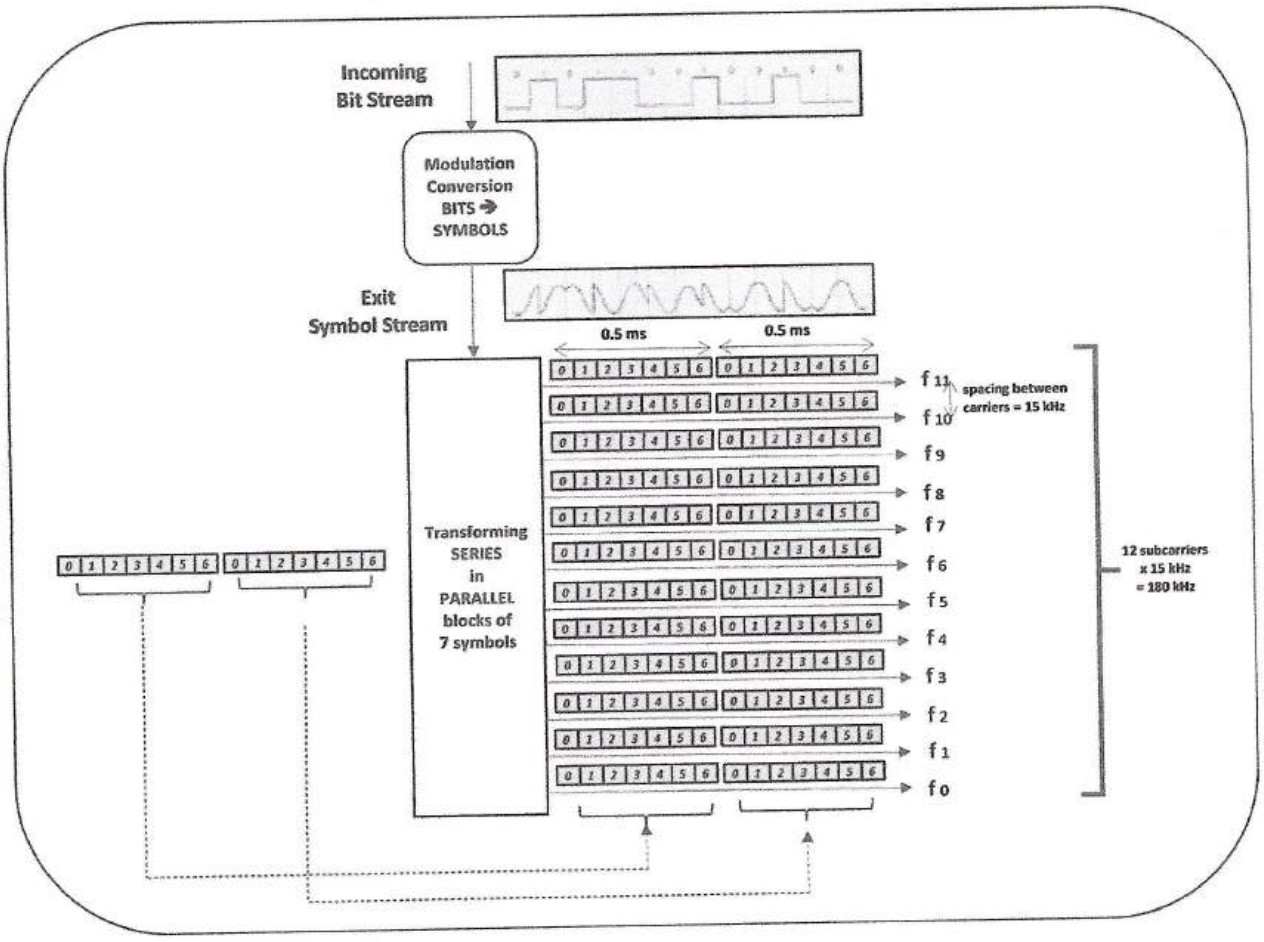


Рис. 2.11. Концепція OFDMA LTE

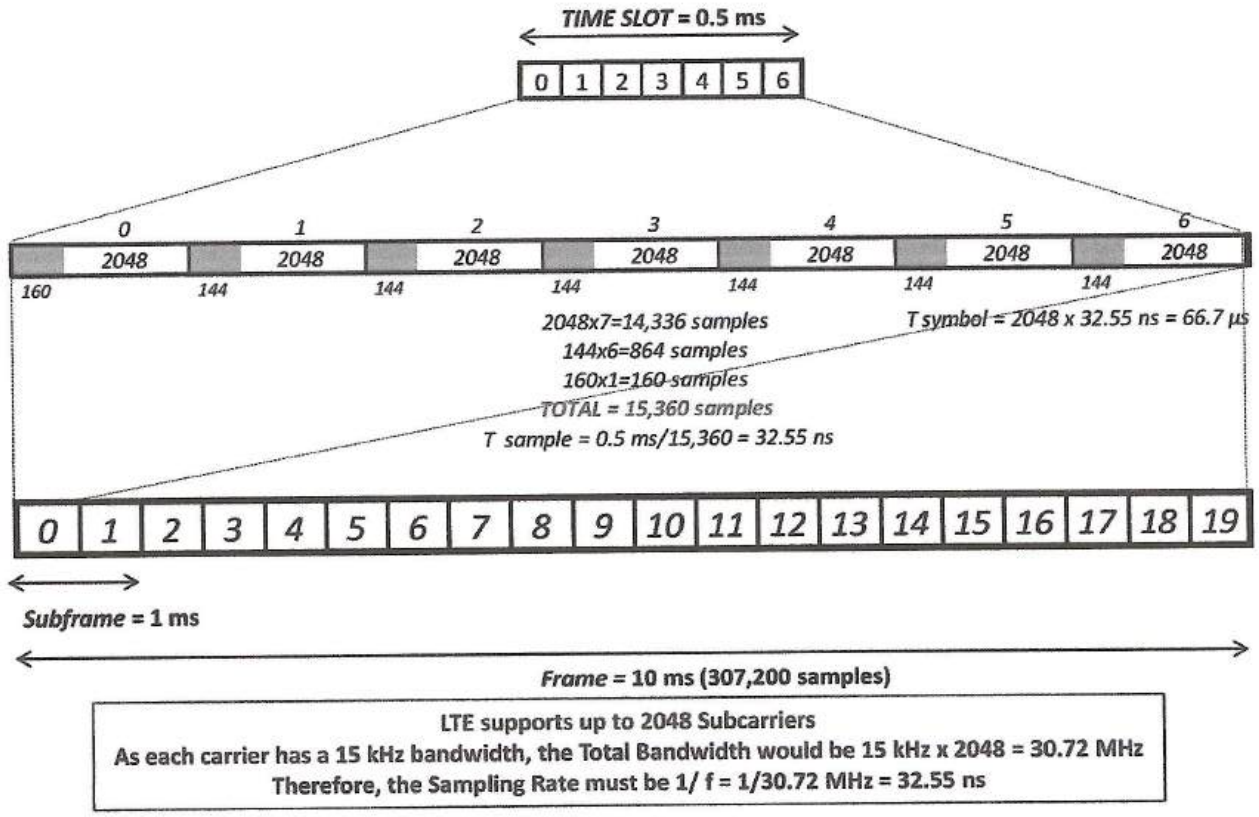


Рис. 2.12. Конфігурація LTE FRAME

Як були визначені ці цифри? Пам'ятайте, що кожна піднесуча займає смугу в 15 кГц, що відповідає ширині каналу, в якому піднесуча може бути модульована без перешкод від сусідніх ортогональних піднесучих. Крім того, LTE стверджує, що може працювати з 2048 піднесучими. Отже, максимальний загальний діапазон, який може займати спектр, становить 2048 × 15 кГц = 30,72 МГц. Оскільки ми знаємо, що тривалість циклу хвилі обернено пропорційна її частоті, а 1 МГц = 1 000 000 циклів на секунду, час, необхідний для 1 циклу 30,72 МГц, становить 1/30,72 × 106 циклів на секунду, або 32,55 нс (наносекунди). Ми називаємо цей період часом дискретизації (TS), тобто, скільки часу потрібно для вибірки, і використовуємо його, щоб визначити, яких змін або відхилень зазнала несуча за цей період, а потім вивести, якої модуляції вона зазнала. Таким чином, LTE визначає, що кожен символ може містити 2048 відліків кожні 32,55 нс, загалом 66,7 мкс, що є тривалістю частини символу.

Однак кожен символ має додатковий час, який становить 5,2 мкс (160 × 32,55 нс) для першого символу часового інтервалу і 4,69 мкс (144 × 32,55 нс) для інших.

Той факт, що перший період трохи довший за інші, вказує на те, що це насправді перший символ. Цей час, який не враховується при оцінці вмісту символу, було обрано для того, щоб мінімізувати можливі багатопроменеві ефекти, яких може зазнати хвиля при відбитті від перешкоди, щоб не заважати оцінці модуляції несучої. Багатопроменева хвиля - це додатковий шлях під час поширення сигналу. Термін, який використовується для опису цього ефекту, називається "розкид затримки" (Delay Spread). Оскільки швидкість світла становить 300 000 км/с і хвиля поширюється з такою швидкістю, за 4,69 мкс, можна очікувати багатопроменеве поширення на відстань до 1,4 км. Багатопроменевість означає, що сигнал прийде із затримкою і буде інтерферувати з хвилею, яка була прийнята без будь-якого відбиття. Зауважте, що ці часові проміжки 5,2 мкс або 4,69 мкс заповнюються копією синусоїди, що відповідає кінцевому сегменту символу, тому рівень сигналу не дорівнює нулю.

Нарешті, ми можемо розрахувати, якої швидкості передачі можна досягти в кожній конфігурації передачі. На рис. 2.13 показано основні параметри, необхідні для цього розрахунку.

Таким чином, ми знаємо, що кожен кадр (пакет даних) може передавати 168 кС/с (k символів/с) і що кожен ресурсний блок займає 180 кГц спектру. Крім того, конфігурація передачі залежить від двох факторів: доступної смуги спектра, яка у випадку LTE може становити 1,4/3/5/10/15/20 МГц, і рівня модуляції, дозволеного умовами поширення, який може бути QPSK, 16-QAM або 64-QAM. На основі цих параметрів ми можемо розрахувати максимальні швидкості передачі LTE для різних комбінацій цих змінних, як показано в Таблиці 2.2. Ми бачимо, що метою LTE було досягнення швидкості 100 Мбіт/с, що можливо, якщо працювати зі смугою спектра 20 МГц і, в залежності від умов поширення, всі несучі модулюються в 64-QAM.

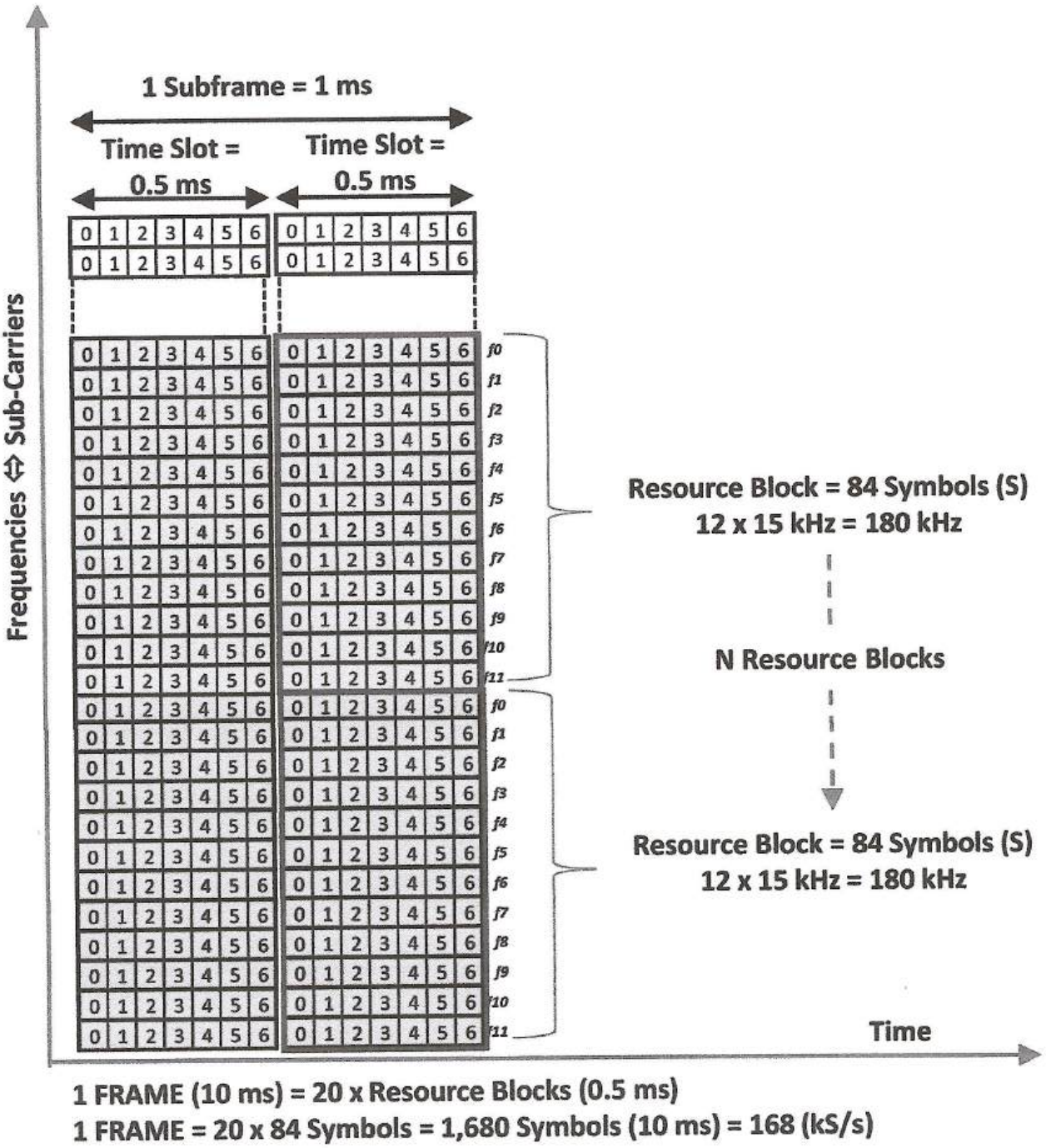


Рис. 2.13. Налаштування блоку ресурсів (RB)

На завершення опису процесу низхідної лінії зв'язку цікаво показати фінальну фазу передачі, яку можна зрозуміти, подивившись на рис. 2.14.

Після конфігурації блоків ресурсів всі піднесучі перетворюються за допомогою зворотного перетворення Фур'є. Воно є зворотним, тому що перетворює сигнал частотної області в сигнал часової області. Отриманий сигнал модулює основну піднесучу, яка працює на частоті обраної смуги. Важливо додати,

що блоки джерел можуть передавати контент від декількох користувачів, тому він називається OFDMA, в якому "A" (access) представляє цю властивість. Схематично ми можемо проілюструвати різницю між OFDM і OFDMA на рисунку 2.15. В OFDM відбувається втрата ефективності передачі, оскільки кожна RB виділяється одному користувачеві, навіть якщо обсяг трафіку не вимагає використання всього блоку.

Коли сигнал приймається, процес відбувається у зворотному порядку.

Таблиця 2.2.

Розрахунок максимальної швидкості передачі даних LTE

Available spectrum width (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Number of resource blocks	6 (6 × 180 = 1.08 MHz)	15 (15 × 180 = 2.7 MHz)	25 (25 × 180 = 4.5 MHz)	50 (50 × 180 = 9.0 MHz)	75 (75 × 180 = 13.5 MHz)	100 (100 × 180 = 18.0 MHz)
Max rate (kbps) QPSK (2 bits/symbol)	2,016	5,040	8,400	16,800	25,200	33,600
Max rate (kbps) 16-QAM (4 bits/symbol)	4,032	10,080	16,800	33,600	50,400	67,200
Max rate (kbps) 64-QAM (6 bits/symbol)	6,048	15,120	25,200	50,400	75,600	100,800

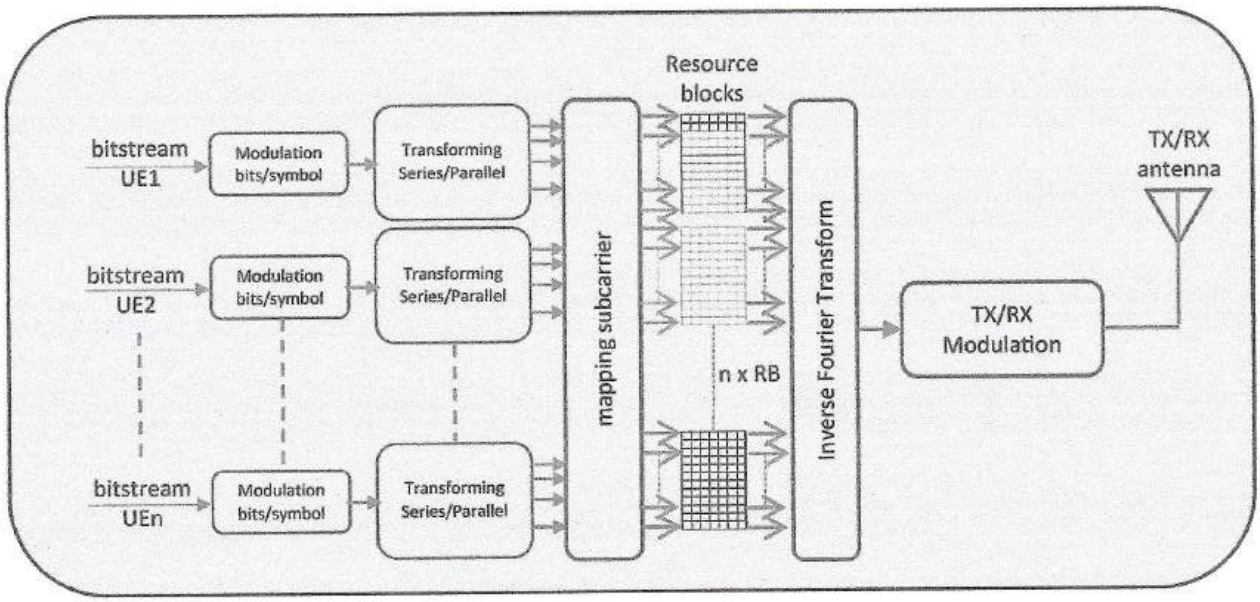


Рис. 2.14. Спрощена схема LTE – OFDMA

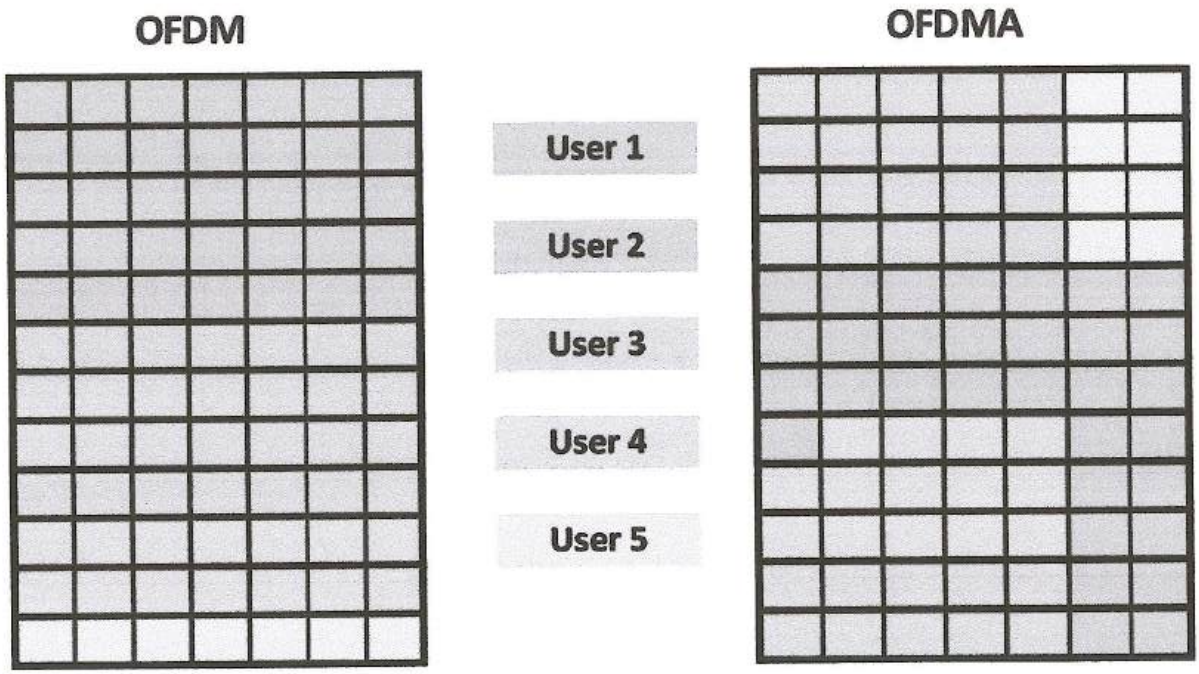


Рис. 2.15. Різниця між OFDM та OFDMA

2.6 OFDMA та SC-FDMA

Тепер, коли ми ознайомилися з модуляцією OFDMA, яка використовується для передачі даних, давайте дізнаємося більше про SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access - множинний доступ з розділенням несучої частоти), яка використовується для передачі даних по висхідній лінії зв'язку.

У SC-FDMA символи агрегуються, щоб мінімізувати зміни амплітуди сигналу. Коли коливання амплітуди великі, як у випадку з передачею сигналів, що генеруються базовими станціями, саме через різні рівні модуляції, викликані умовами поширення і великими коливаннями обсягу трафіку, необхідного користувачам, підсилювачі повинні використовуватися дуже лінійно в дуже широкому діапазоні рівнів оброблюваного сигналу. Це вимагає складної схемотехніки, що робить проект більш дорогим. Це саме те, що відбувається в OFDMA, технологія модуляції якої виправдана, оскільки вона ефективніша за SC-FDMA і оскільки БС є пристроєм, який обслуговує багато користувачів, але не було б сенсу використовувати OFDMA в пристрої, який використовується користувачами. Однак, відмінності невеликі.

Ми повинні пам'ятати, що у висхідному каналі для кожного користувача використовується лише кілька піднесучих, на відміну від того, що відбувається у низхідному каналі, де використовуються всі доступні піднесучі, оскільки вони містять повідомлення від усіх користувачів. Тому у висхідному каналі має сенс використовувати лише набір піднесучих, які відповідають за передачу всієї інформації, згенерованої користувачем. Це досягається введенням додаткового етапу обробки сигналу перед передачею.

На цьому наступному етапі символи групуються таким чином, щоб їх можна було передавати так, як якщо б вони були сконфігуровані як одна піднесуча. Це досягається за допомогою додаткового етапу перетворення Фур'є, який дозволяє відобразити згенеровані символи таким чином, щоб вони були правильно згруповані, а не розподілені по декількох піднесучих, як у випадку OFDMA. SC-FDMA є менш надійною формою передачі сигналу, ніж OFDMA, оскільки в останньому випадку інформація розподіляється по декількох піднесучих, а не концентрується, як у випадку SC-FDMA. Рисунок 2.16 ілюструє це. У OFDMA передача менш чутлива до перешкод і флуктуацій, які можуть виникати в селективних смугах спектра під час поширення сигналу (селективні завмирання).

На рисунку 2.17 показано, як генерується несуча SC-FDMA. Насправді, те, що називається "однією піднесучою", є не однією піднесучою, а набором з 12 піднесучих, які несуть вміст повідомлення від одного користувача. Щоб згрупувати весь вміст від одного користувача, вводиться проміжний крок, на якому виконується перетворення Фур'є, щоб згрупувати вміст, що міститься в 12 підносіях, в один часовий інтервал. Таким чином, у цьому процесі дані, отримані на першому етапі, модулюються, а потім передаються на послідовно-паралельний перетворювач, за яким слідує блок прямого перетворення Фур'є (ДПФ), тобто сигнал, який знаходиться в часовій області, перетворюється в частотну область. Далі процес ідентичний OFDM, символи зіставляються з піднесучими, а потім застосовується зворотне перетворення Фур'є (IDFT) для перетворення сигналу назад у часову область. Нарешті, сигнал надсилається до радіочастотного модуля для передачі.

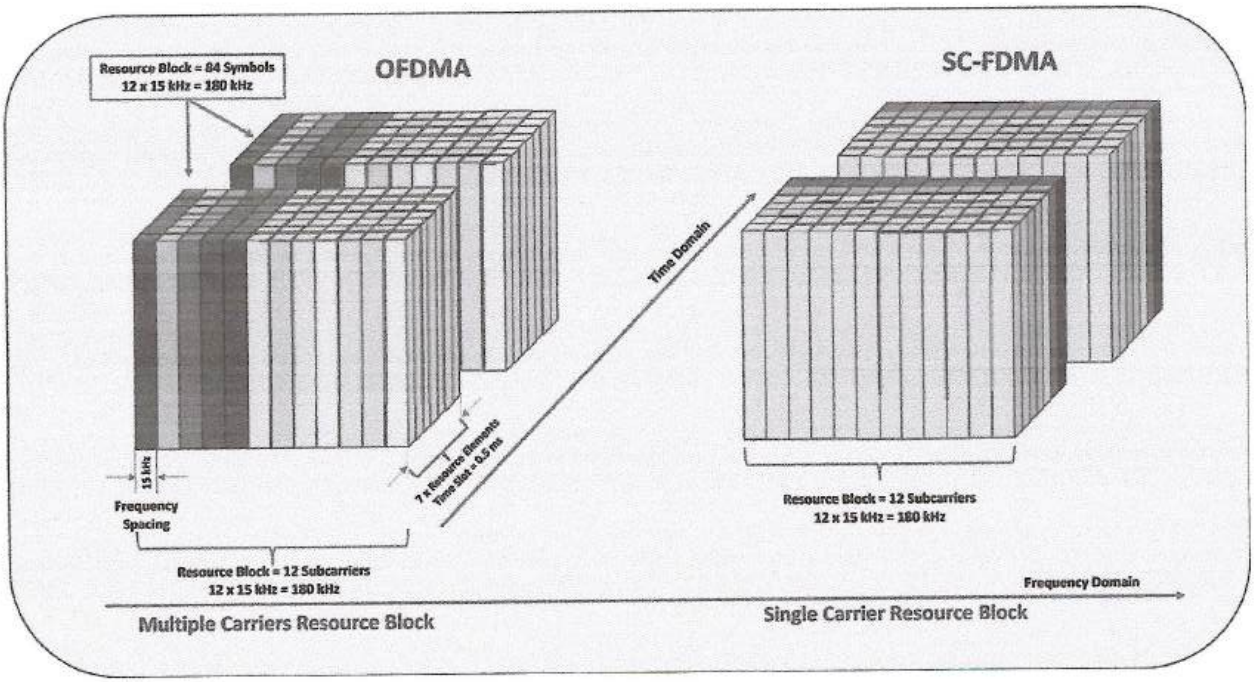


Рис. 2.16. Різниця між OFDMA та SC-FDMA

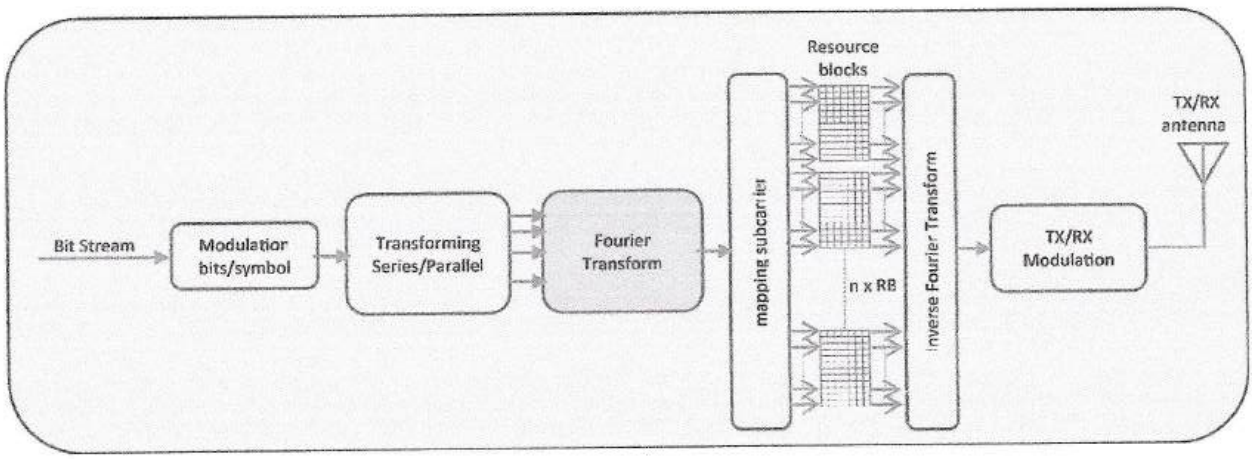


Рис. 2.17. Спрощена схема LTE - SC-FDMA

2.7 Кодування

Кодування - це процес перетворення цифрових даних у формат, який можна передавати каналом зв'язку з можливістю виправлення та виявлення помилок. У бездротовому зв'язку використовуються різні методи кодування, такі як блокові коди, згорткові коди та турбо-коди.

Системи бездротового зв'язку залежать від кодування каналу (іноді його називають корекцією помилок), щоб гарантувати, що отримані дані відповідають

переданим. Бездротовий зв'язок страждає від перешкод і згасання, які спричиняють помилки, тому для їх подолання передавач додає додаткову інформацію перед надсиланням даних. На стороні приймача складні коди, що вимагають складних алгоритмів, потім декодують цю інформацію і відновлюють вихідні дані.

Використання складніших канальних кодів є ключем до підвищення продуктивності майбутніх бездротових систем.

Кожна система зв'язку має одну мету: передати інформацію від відправника до одержувача каналом зв'язку. Через шумову природу кожного каналу повідомлення спотворюється до того, як потрапляє до одержувача, тому в багатьох випадках існують відмінності між відправленою та отриманою послідовностями даних, ці відмінності називаються помилками. Для усунення помилок прийому використовується канальне кодування, яке дозволяє приймачу виявляти і виправляти помилки, що виникли під час передачі. Кодування каналів полягає у введенні надлишковості для того, щоб вихідна послідовність даних могла бути відновлена якомога надійніше.

У LTE для відновлення помилок, що виникли під час передачі, використовуються дві основні схеми канального кодування: згорткові коди і турбо-коди, причому перші використовуються для кодування керуючої інформації, оскільки вони вимагають обчислювально простіших алгоритмів декодування, тоді як турбо-коди використовуються для кодування користувацької інформації, оскільки вони досягають вищої ефективності, незважаючи на те, що є складнішими, ніж згорткові коди.

У 1948 році Шеннон показав, що безпомилковий зв'язок у зашумленому каналі можливий, якщо швидкість передачі інформації менша або дорівнює певному порогу, цей поріг називається межею пропускної здатності каналу. З тих пір докладаються величезні зусилля для пошуку нових методів передачі з метою наблизитися до пропускної здатності каналу.

Кодування каналів є одним з основних методів, які дозволяють працювати в умовах обмеженої пропускної здатності. Шляхом введення структурованої

надмірності в передавачі (кодування) і використання її в приймачі (декодування) можна досягти широких можливостей виявлення і виправлення помилок.

Як показано на рисунку 2.18, видно, що ці схеми канального кодування, справа наліво, неухильно наближаються до межі Шеннона. BCH-коди, що використовувалися в 2G, знаходилися на відстані 5,7 дБ від межі Шеннона, CC-коди, що використовувалися в еру 2G і 3G, мають мінімальну відстань 1,75 дБ від межі Шеннона, а турбо-коди, що використовувалися в еру 3G і 4G, знаходяться лише на відстані 0,7 дБ від межі Шеннона. З того часу коди LDPC скоротили цю відстань до 0,0045 дБ, а полярні коди, як було показано, повністю торкаються межі Шеннона.

Саме постійне вдосконалення продуктивності цих схем канального кодування дозволяє системам мобільного зв'язку задовольняти зростаючі потреби людей. Відкриття полярних кодів відкрило нову главу в системах мобільного зв'язку.

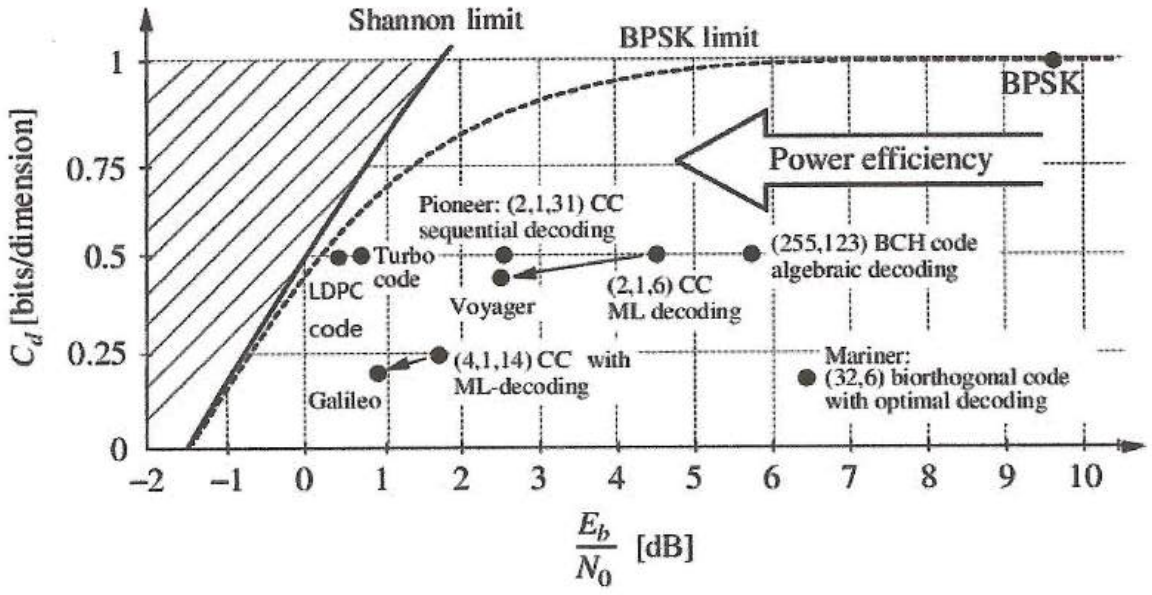


Рис. 2.18. Еволюція канального кодування

2.8 Згорткові коди

У 1955 році Пітер Еліас винайшов згорткові коди. У 1967 році Ендрю Вітербі запропонував алгоритм декодування за методом максимальної правдоподібності (ML), відомий як алгоритм Вітербі, який знаходить оптимальний шлях через

решітчасту структуру. У 1976 році був запропонований інший метод декодування, алгоритм Болла-Кока-Єлінека-Равіва (BCJR), який усуває одне з обмежень алгоритму Вітербі, оскільки він більше не припускає, що ймовірності всіх інформаційних бітів є рівними. Алгоритм BCJR можна розглядати як основу алгоритму максимальної апостеріорної ймовірності (MAP). Тому в епоху 2G згорткові коди використовувалися в деяких стандартах для канального кодування. У наступні десятиліття було несподівано виявлено, що згорткові коди все ще мають хорошу продуктивність і прийнятну складність декодування при тій же швидкості кодування з невеликою довжиною повідомлення, тому вони почали широко використовуватися в каналах управління в епоху 3G і 4G.

2.9 Коди Ріда Соломона

RS-коди, винахід Ірвінга С. Ріда та Густава Соломона 1960 року, використовуються в компакт-дисках, Blu-ray, бездротових мережах та інших пристроях для виправлення помилок при передачі даних.

Кожен код виявлення та виправлення помилок має основні характеристики, такі як довжина коду, розмірність та мінімальна відстань. Довжина коду n - це кількість символів в одному кодовому слові. Розмірність коду k - це кількість фактичних інформаційних символів, що передаються в одному кодовому слові. Мінімальна відстань - це мінімальна кількість символьних відмінностей між кодовими словами.

Вони мають лінійні та циклічні характеристики. Лінійність - це властивість вже побудованого кодового слова утворювати нове кодове слово. Циклічна характеристика розглядається як здатність створювати нове кодове слово шляхом циклічного зсуву символів даного кодового слова.

Коди Ріда-Соломона корисні для виявлення та виправлення помилок у пакеті даних. Якщо символ має помилку в більш ніж одному біті, ця помилка все одно вважається помилкою одного символу, яку можна виправити, і це доводить, що коди Ріда-Соломона можуть виправляти багатобітові помилки.

2.10 Турбо коди

У 1993 році С. Берру, А. Глав'є та П. Тітімайшіма запропонували турбо-коди. Турбо-коди мали значний вплив на канальне кодування: як показано на рисунку 2.18, вони знаходяться лише на відстані 1 дБ від межі Шеннона, що робить турбо-коди кращим канальним кодуванням для стандартів 3G і 4G. Тим часом, дві основні ідеї турбо-коду, а саме випадкове кодування та ітеративне декодування, призвели до подальших досліджень кодів LDPC. Однак, завдяки кращій продуктивності кодів LDPC і відкриттю полярних кодів, турбо-коди в мережах 5G були відкинуті через їх відносно низьку продуктивність.

Турбо-коди є важливим класом кодів, що виправляють помилки, які забезпечують продуктивність, близьку до границі Шеннона. Турбо-код будується шляхом конкатенації двох ідентичних згорткових кодерів, з'єднаних паралельно і розділених функцією чергування. Концепція полягає в тому, що перший кодер працює безпосередньо з інформаційною послідовністю, в той час як другий кодер працює з перемежованою версією інформаційної послідовності. Турбо-декодування виконується ітеративно двома максимально-апостеріорними (MAP) декодерами, які з'єднані між собою через інтерлейвер. Оскільки MAP-алгоритми є обчислювально інтенсивними, вони занадто складні, щоб бути реалізованими в реальних системах. Деякі спрощені версії були запропоновані як практичні алгоритми декодування, такі як log-MAP алгоритм та субоптимальний max-log-MAP алгоритм.

2.11 LDPC коди

У 1962 році Галлахер запропонував коди LDPC. Хоча коди LDPC вивчалися протягом тривалого часу, їм не приділялося багато уваги до 1990-х років. З відкриттям турбо-кодів, дослідники зосередилися на LDPC-кодах через розробку алгоритму поширення переконання (алгоритм добутку суми) та ітеративних методів декодування. У 1996 році Маккей та Ніл побудували нові LDPC коди, подібні до

Турбо кодів, з відхиленням приблизно на 1 дБ від межі Шеннона. У 2001 році С.Й. Чанг побудував ще один код LDPC, який знаходиться на відстані лише 0,0045 дБ від границі Шеннона. Це призвело до широкого використання кодів LDPC в епоху 4G і в кінцевому підсумку замінило турбо-коди як метод кодування каналів передачі даних в мережах 5G.

Коди з прямою корекцією помилок, які отримали назву кодів з низькою щільністю перевірки на парність (LDPC). Як випливає з назви, вони характеризуються розрідженою матрицею перевірки на парність H, де "розріджена" означає, що більшість елементів дорівнює нулю. Кодування LDPC коду виконується так само, як і в лінійних блокових кодах, а декодування може бути реалізоване за допомогою алгоритму передачі повідомлень, також відомого як ітеративний алгоритм декодування. Алгоритм сума-продукт (SP) є ітераційним алгоритмом декодування для LDPC кодів, а алгоритми мінімальної суми (MSA) є версією алгоритму SP зі зменшеною складністю. В останні роки квазіциклічні (QC) LDPC коди привертають значну увагу дослідників. Код LDPC 5G належить до класу QC-LDPC кодів, де визначено два базові графи.

2.12 Полярні коди

Полярні коди - це новий тип лінійних блокових кодів, які спочатку були розроблені для покращення коефіцієнта відсікання R_0. У випадковому кодуванні та декодуванні ML цей параметр визначає максимальну ймовірність помилки відповідного блоку коду: в той час як при послідовному декодуванні R_0 можна розглядати як "обчислювальне граничне відношення", коли фактичне відношення вище, алгоритм декодування коду не забезпечить очікуваної продуктивності. У 2009 році Ердал Арікан використав комбінування та розділення каналів для покращення граничної швидкості. Він виявив, що зі збільшенням довжини коду (або кількості каналів) пропускна здатність цих підканалів сходиться до двох крайніх значень: один канал має приблизну пропускну здатність 1, а інший - приблизну пропускну здатність 0. Це явище називається поляризацією каналів. Тому цей метод кодування

називається полярним кодуванням, де "Polar" означає поляризація. Вважається, що полярні коди є першим методом канального кодування, який може досягти межі Шеннона в двійковому дискретному каналі без пам'яті (B-DMC). Полярні коди швидко розвивалися, і в 2016 році вони розглядалися для використання в каналі управління 5G NR.

Полярні коди є особливим класом кодів, що виправляють помилки, який може достовірно досягти пропускної здатності каналу. Полярні коди використовують нову концепцію, яка називається поляризацією каналу, що включає дві фази: розділення каналів і об'єднання каналів. Ідея полягає в тому, що коли довжина коду прямує до нескінченності, вхідні канали стають поляризованими. Декодування полярного коду здійснюється за допомогою алгоритмів декодування з послідовним скасуванням (SC). Хоча полярні коди з алгоритмом СК досягають пропускної здатності асимптотично, їх продуктивність є незадовільною при малих довжинах блоків. Для вирішення цієї проблеми запропоновано алгоритм послідовного списку скасування (SCL). Продуктивність декодера SCL може бути додатково підвищена шляхом їх конкатенації з кодами з циклічною перевіркою надлишковості (CRC) (CRC-SCL), де CRC використовується для визначення дійсного кодового слова в списку кандидатів в кінці процесу декодування SCL.

3 АРХІТЕКТУРА МЕРЕЖ 5G

3.1 Мережа 5G

Мережі 5G - це наступне покоління мобільного інтернет-зв'язку, що пропонує вищі швидкості та надійніше з'єднання. Мобільні мережі 5G не лише з'єднуватимуть людей, але й дозволять підключати і керувати машинами, об'єктами і пристроями. Це забезпечить нові рівні продуктивності та ефективності, надасть нові можливості для користувачів і з'єднає нові галузі.

5G забезпечить пікові швидкості в кілька Гбіт/с, наднизьку затримку, величезну пропускну здатність і більш уніфікований користувацький досвід.

- Згідно з вимогами IMT-2020, очікується, що 5G забезпечить пікову швидкість передачі даних до 20 Гбіт/с.
- Він забезпечує значно вищу пропускну здатність мережі завдяки розширенню спектру, наприклад, за рахунок міліметрових хвиль (mmWave).
- Значно менші затримки для швидшого реагування на запити.
- Більш стабільний користувацький досвід, завдяки чому швидкість передачі даних залишається незмінно високою, навіть коли користувачі перебувають у русі.
- Нова мобільна мережа 5G NR (New Radio) підтримуватиметься базою гігабітного покриття LTE, що забезпечить зв'язок гігабітного класу скрізь.

Варіанти використання 5G:

- Покращений мобільний широкосмуговий зв'язок;
- Критично важливі комунікації;
- Масовий Інтернет речей;
- Визначальною здатністю 5G є розробка для майбутньої сумісності - здатність гнучко підтримувати майбутні послуги, які сьогодні ще невідомі.

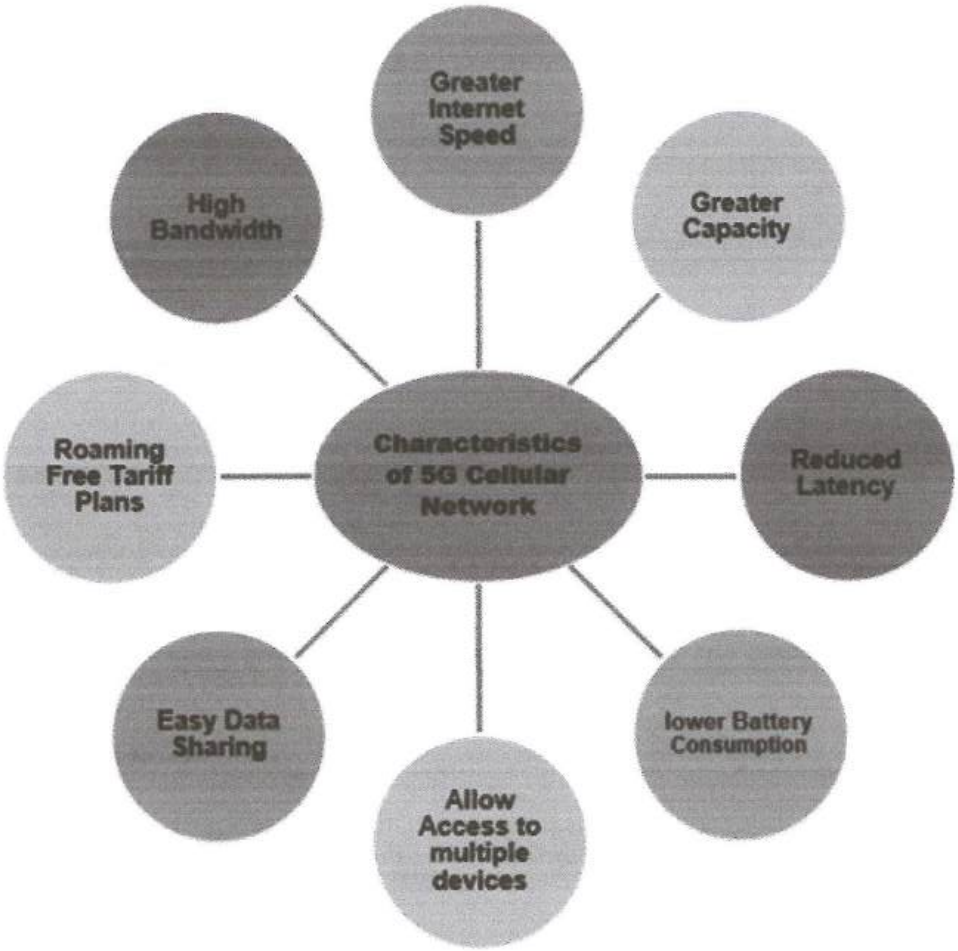


Рис. 3.1. Характеристики мережі 5G

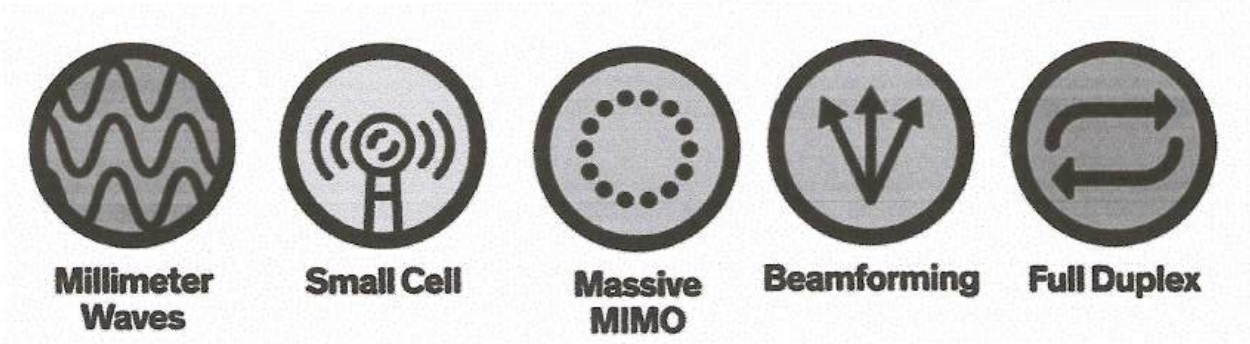


Рис. 3.2. Технологічний фундамент 5G

Міліметрові хвилі:

Спектр мобільного зв'язку охоплює діапазон радіочастот від 3 до 100 ГГц з новим спектром 5G вище 6 ГГц. Інший спектр мобільного зв'язку вище 6 ГГц, включаючи діапазони 26-28 ГГц, які часто називають міліметровими хвилями

(mmWave). Додатковий спектр і вища пропускна здатність дозволять збільшити кількість користувачів, обсяг даних і швидкість зв`язку.

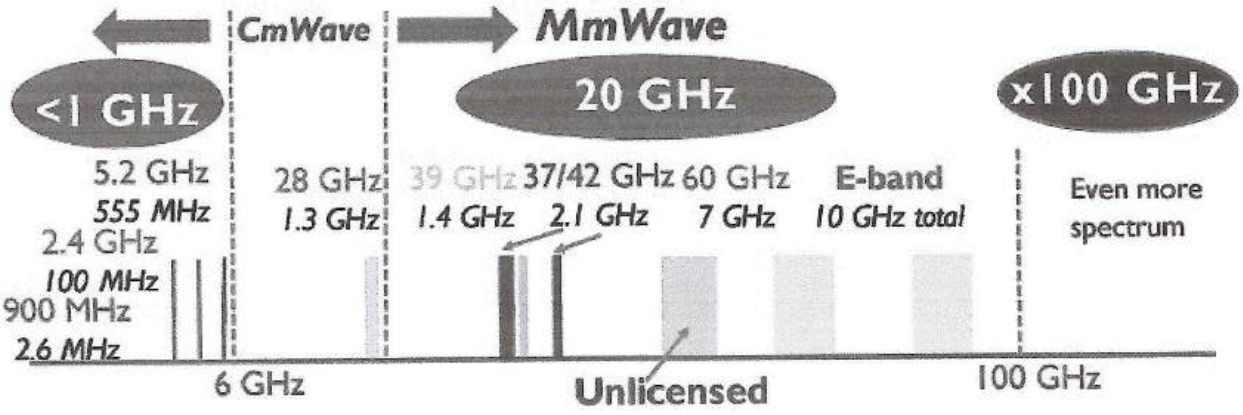


Рис. 3.3. Спектр міліметрових хвиль для 5G

Малі стільники:

Малі стільники - це рішення для подолання недоліків міліметрових хвиль: нездатність проникати крізь будівлі/перешкоди і схильність до поглинання рослинами/дощем. Для комутації використовується малопотужна міні-базова станція, яка допомагає вирішити проблему перешкод.

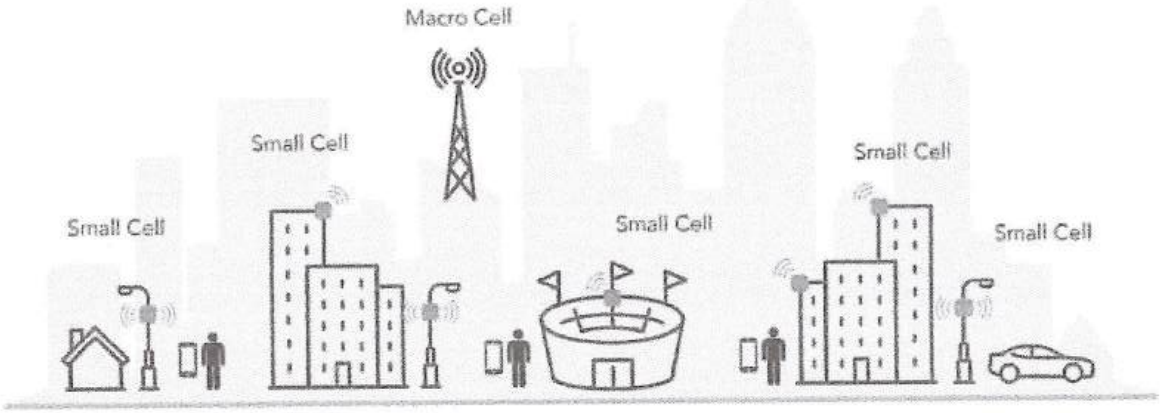


Рис. 3.4. Малі стільники

Масивний MIMO:

MIMO розшифровується як Multiple-input multiple-output. Massive MIMO - це система MIMO з надзвичайно великою кількістю антен. Мережа Massive MIMO буде краще реагувати на пристрої, що передають у більш високих частотних діапазонах, покращуючи покриття. Однак Massive MIMO може спричиняти серйозні перешкоди через свою тенденцію передавати в усіх напрямках одночасно. Звідси виникає потреба у формуванні променя.

Масивна MIMO: багатоантенна форма антенних решіток великої площі

Рішення для антенних решіток великої площі дозволяє формувати 3D-промінь і повторно використовувати кілька антен, покращуючи покриття і пропускну здатність системи.

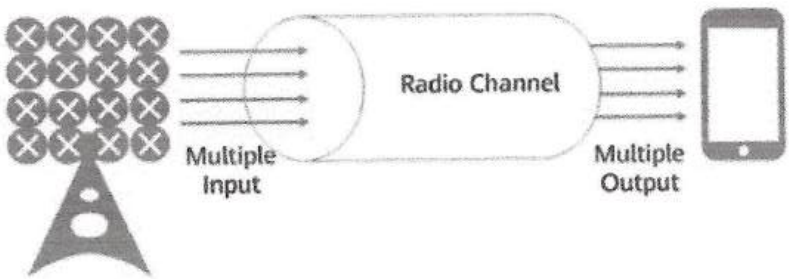


Рис. 3.5. Масивна MIMO

Формування променя:

Керування променем - це технологія, яка дозволяє масивним антенам базової станції MIMO спрямовувати радіосигнал на користувачів і пристрої, а не в усіх напрямках. Технологія керування променем використовує передові алгоритми обробки сигналу, щоб визначити найкращий шлях для радіосигналу до користувача. Це підвищує ефективність за рахунок зменшення перешкод (небажаних радіосигналів).

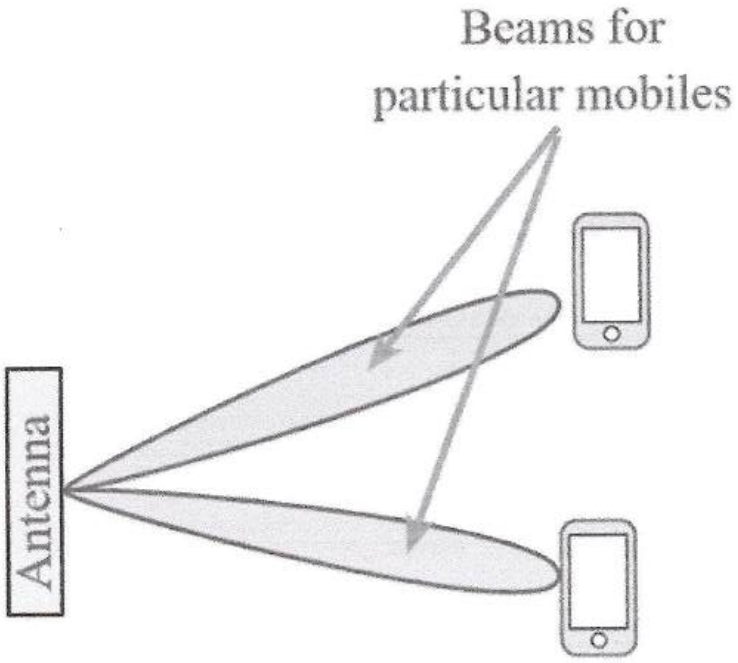


Рис. 3.6. Формування променя

Повний дуплекс:

З 5G передавач зможе передавати і приймати дані одночасно на одній частоті.

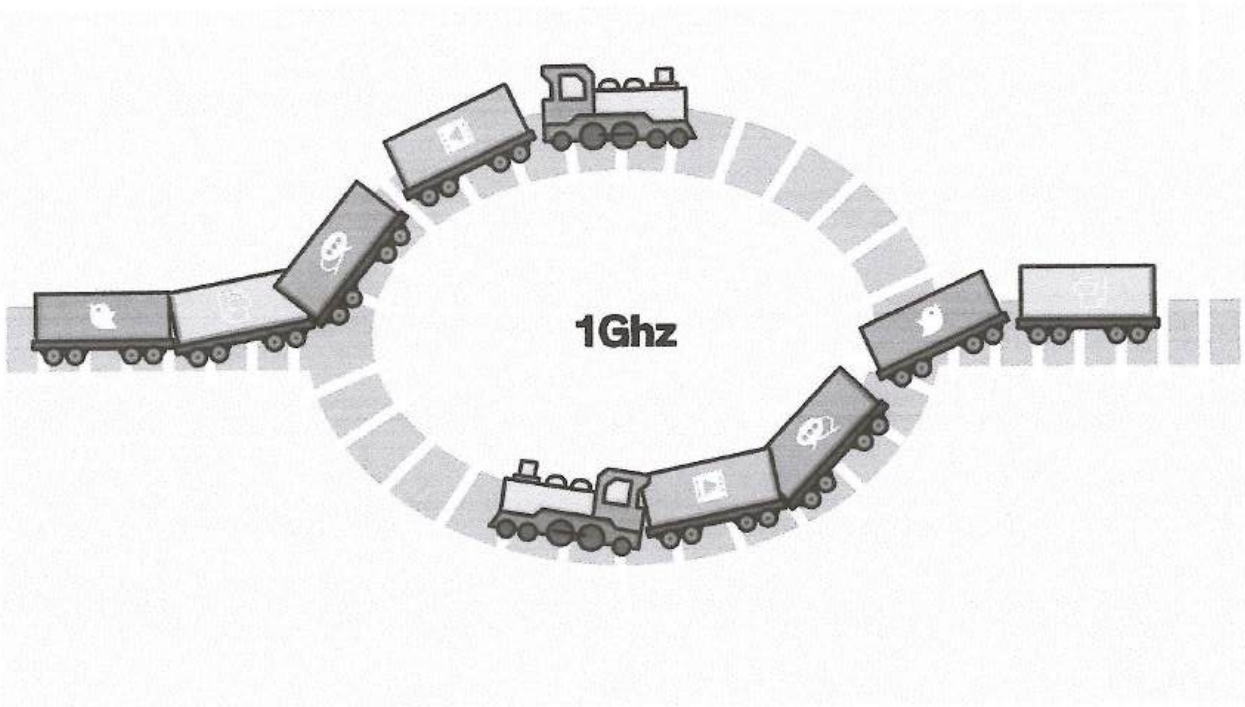


Рис. 3.7. Повний дуплекс

Система мобільного зв'язку 5G - це новітня технологія мобільного зв'язку, яка забезпечує новий спосіб комунікації, включаючи зв'язок на великих територіях. У порівнянні з попередніми поколіннями від 1-го (1G) до 4-го (4G), 5G пропонує набагато вищу продуктивність. Крім того, очікується, що 5G уможливить новий тип зв'язку і додатків, таких як "розумні" транспортні засоби, автомобільний транспорт і зв'язок, масове завантаження відео, оскільки медіа потрібні скрізь, значне збільшення взаємодії між людьми, Інтернет речей і дистанційне керування з тактильним зворотним зв'язком - всі ці сфери вимагають широкого зв'язку, як показано на рисунку 3.8.

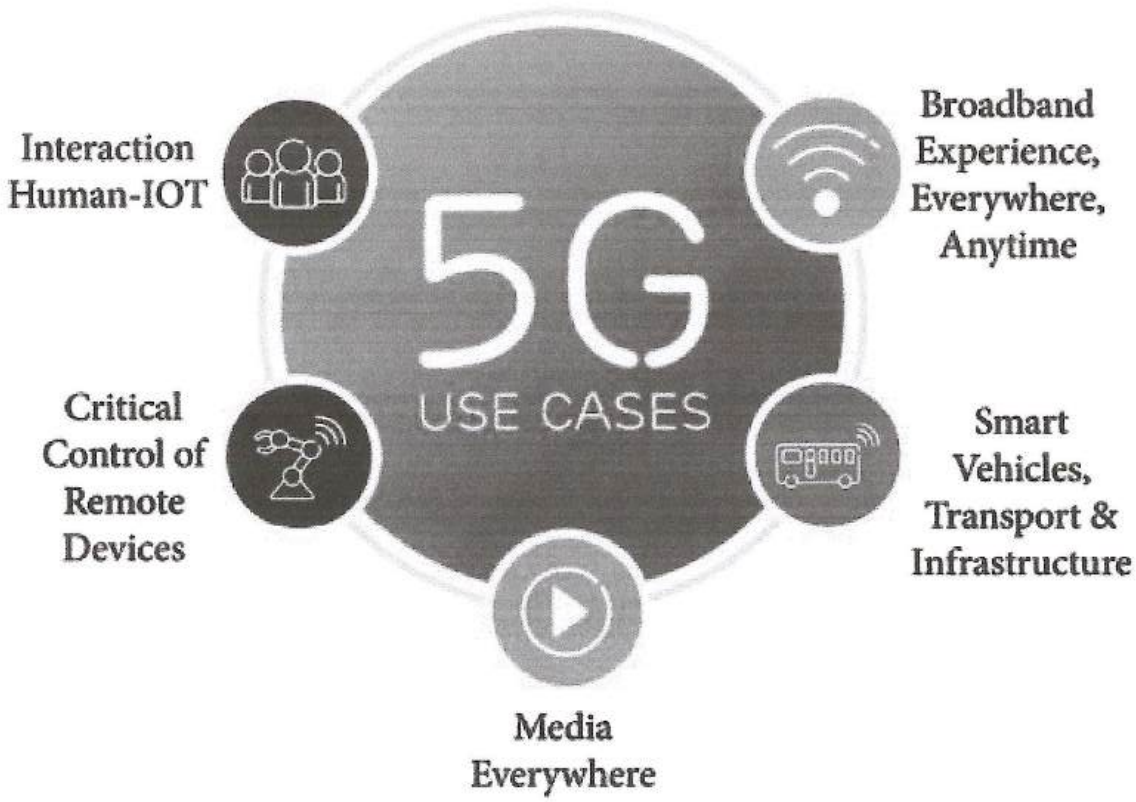


Рис. 3.8. Варіанти використання 5G

Водночас він був розроблений для забезпечення дуже низьких швидкостей передачі даних, щоб задовольнити потреби різних додатків, таких як датчики та додатки Інтернету речей. Іншими словами, він підтримує широкий спектр додатків, від тих, що вимагають низьких швидкостей передачі даних, до тих, що вимагають

дуже високих швидкостей передачі даних з мінімальною затримкою. Хоча мережа 5G спочатку базувалася на застарілих мережах, стільникова архітектура 5G вважається гетерогенною мережею, яка повинна складатися з макростільників, мікростільників, пікостільників і реле. Швидкість 5G досягає 10 гігабіт на секунду (Гбіт/с), що в 10-100 разів швидше, ніж у 4G, як показано на рисунку 3.9.

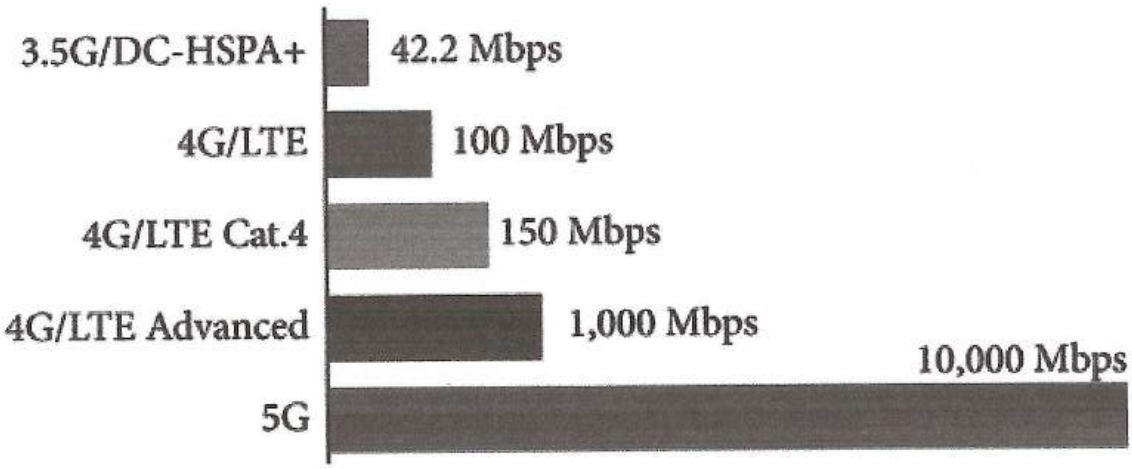


Рис. 3.9. Порівняння швидкості передачі даних 3G, 4G і 5G

Крім того, мобільна система малих стільників є важливою частиною бездротової стільникової системи 5G, яка включає в себе як мобільні релейні системи, так і системи малих стільників.

3.2 Архітектура стільникової мережі 5G

Існуюча мережа 5G показує, що її методи множинного доступу залишаються стабільними, про що свідчать сучасні технології, такі як множинний доступ з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDMA), який, ймовірно, буде використовуватися протягом наступних 50 років. Крім того, немає необхідності переналаштовувати налаштування бездротової мережі з 1G на 4G. Однак подальші вдосконалення реалізації можуть бути зроблені в базовій мережі для задоволення критеріїв користувача. Як результат, постачальники пакетних послуг зможуть легко

перейти на мережу 5G після завершення комерційного розвитку 4G. Для того, щоб вирішити проблеми систем 5G і задовольнити потреби користувачів, еволюція архітектури бездротового стільникового зв'язку 5G вимагає швидкого розвитку. Більшість користувачів бездротового зв'язку проводять приблизно 80% свого часу в приміщенні і 20% - на вулиці. Відповідно до поточної архітектури бездротового стільникового зв'язку, зовнішня базова станція в центрі стільника підтримує зв'язок між користувачами зовні і всередині. В результаті, сигнали будуть передаватися через внутрішні стіни, дозволяючи взаємодіяти між користувачами всередині і зовні приміщення. В наслідок відбувається значна втрата проникнення, що призводить до зниження продуктивності через зменшення спектральної ефективності та енергоефективності бездротового зв'язку. Для вирішення цієї проблеми було розроблено новий метод проектування для створення архітектури стільникового зв'язку 5G для різних сценаріїв використання зовні та всередині приміщень. Масивна технологія MIMO, яка дозволяє географічне розгортання десятків і сотень антенних блоків, є однією зі стратегій проектування, що обмежує проникнення крізь стіни в приміщеннях. Замість звичайних систем MIMO, які використовують дві або чотири антени, масивні системи MIMO використовують великі антенні решітки, які забезпечують значні переваги у пропускній здатності. Різні технології, такі як зв'язок на міліметрових хвилях, малі стільники, Wi-Fi, надширокосмуговий зв'язок і зв'язок у видимому діапазоні підходять для покриття всередині приміщень, забезпечуючи високу швидкість передачі даних на короткі відстані. Однак видиме світло і міліметрові хвилі вимагають використання більш високих частот, які зазвичай не застосовуються в мобільному зв'язку. Зокрема, не рекомендується використовувати ці високочастотні хвилі на великих відстанях і в зовнішніх умовах, оскільки вони не зможуть успішно проникати крізь щільні матеріали.

З іншого боку, ці хвилі можуть ефективно поширюватися через рослини, гази і краплі дощу. Міліметрові хвилі і видиме світло мають широку смугу пропускання і можуть збільшити швидкість передачі даних у внутрішніх системах. На додаток до появи нових спектрів, які зазвичай не використовуються для радіозв'язку, іншим

підходом до вирішення проблеми дефіциту спектра є використання мереж когнітивного радіо (CR) для поліпшення використання спектра нових радіодіапазонів. Неоднорідність стільникових архітектур 5G вимагає інтеграції ретрансляторів, малих стільників, мікростільників і макростільників.

Зокрема, ідея мобільних малих сот є ключовим компонентом бездротової стільникової мережі 5G, яка включає в себе концепції малих сот і мобільних ретрансляторів. Ця концепція була розроблена для підтримки зв'язку користувачів під час високої мобільності у високошвидкісних поїздах і транспортних засобах. Крім того, мобільні малі стільники встановлюються всередині рухомих транспортних засобів для зв'язку з користувачами, в той час як масивний блок MIMO встановлюється зовні транспортного засобу для зв'язку із зовнішньою базовою станцією. З точки зору користувача, мобільна стільникова мережа ідентифікується як звичайна базова станція, а пов'язаний з нею користувач ідентифікується як єдине ціле з базовою станцією, що вказує на поділ внутрішніх і зовнішніх структур. Також користувачі малих мобільних стільникових мереж використовують високі швидкості передачі даних для послуг з високою пропускною спроможністю, зменшуючи при цьому накладні витрати на передачу сигналів. Дизайн бездротової стільникової мережі 5 G складається з двох логічних рівнів: мережевої хмари і радіомережі.

Бездротова мережа складається з різних елементів та різних функцій. Хмара мережевих функцій (NFV) складається з елемента площини управління (CPE) і елемента площини користувача (UPE), причому більш критичні площини корисності пов'язані з площиною управління, а площини корисності пов'язані з площиною користувача.

Слід зазначити, що архітектура стільникової мережі 5G є критично важливою як для магістральної, так і для базової мережі. На рисунку 3.10 показана багаторівнева мережа з макростільниками, покритими D2D-зв'язками, фемтостільниками, пікостільниками і реле. Впровадження декількох рівнів в архітектуру стільникової мережі забезпечує відмінне управління міжшаровими і

внутрішньошаровими завадами, що призводить до поліпшення загального енергоспоживання, спектральної ефективності, покриття і пропускної здатності.

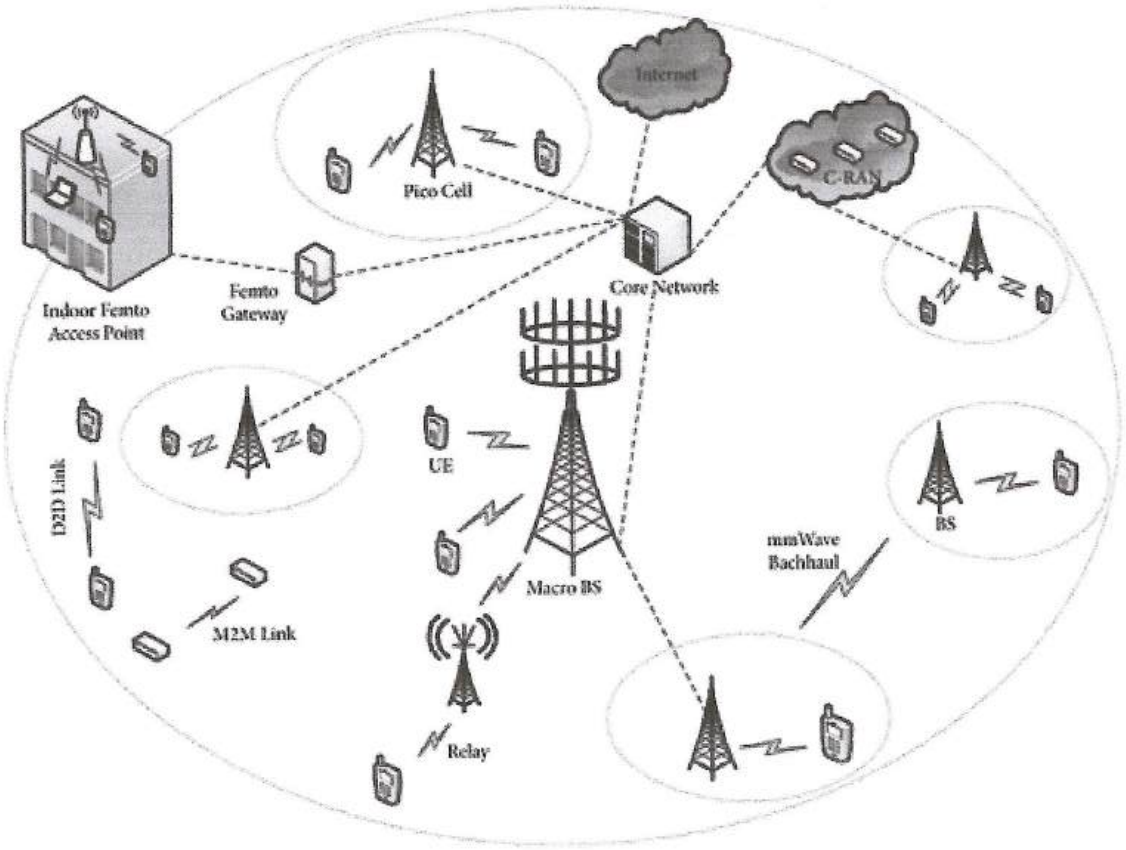


Рис. 3.10. Архітектура стільникової мережі 5G

3.3 Нова технологія радіозв'язку 5G

3GPP знаходиться в процесі визначення нового радіоінтерфейсу 5G, відомого як NR. Покращений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB) і надалі матиме велике значення, стимулюючи попит на збільшену пропускну здатність системи, розширене покриття і вищу швидкість передачі даних. Однак амбіції 5G виходять за рамки широкосмугового мобільного зв'язку. Наприклад, MMTC, яку часто називають Інтернетом речей, зацікавлена в тому, щоб вартість пристроїв і енергоспоживання були мінімальними, щоб запропонувати широке покриття і працювати з величезною кількістю пристроїв.

Ще однією метою 5G є зв'язок з наднизькою затримкою (URLLC), який забезпечує доставку даних з дуже низькою затримкою, наприклад, для критично важливих промислових додатків. Крім того, цілком можливо, що протягом життя NR з'являться нові і несподівані варіанти використання. Як наслідок, майбутня сумісність, яка дозволяє легко впроваджувати майбутні оптимізації, є критичною вимогою до проектування. Також ключовим принципом є підвищення енергоефективності мережі порівняно з існуючими системами. На рисунку 3.11 показані деякі з найважливіших технологій, які NR буде підтримувати в 5G.

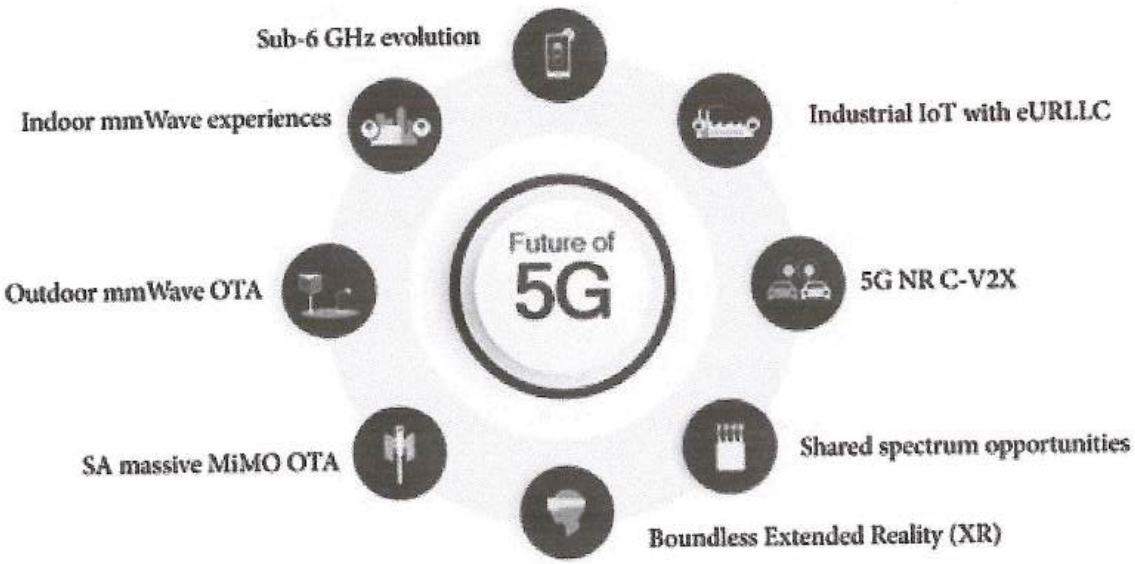


Рис. 3.11. Підтримувані технології 5G NR

Автономний та неавтономний режим:

Для покращення наскрізної продуктивності 5G оптимальним рішенням є рішення з декількома підключеннями, яке поєднує технологію Long Term Evolution (LTE) з надійними з'єднаннями до 6 ГГц, такими як одночасні з'єднання на міліметровому діапазоні хвиль. Його можна використовувати в режимі NSA з 5G NR. Тобто, режим NSA з 5G NR означає, що мережа 4G використовується для підключення до площини управління, а мережа 5G NR - для площини користувача. На відміну від цього, в автономному режимі (SA) і площина управління, і площина користувача використовують тільки дротову мережу 5G NR. На рисунку 3.12

показані автономні і неавтономні системи 5G NR. Технічна робота над NR розпочалася навесні 2016 року. Перший реліз був частиною 15-ї версії 3GPP, а специфікація NR була завершена в кінці 2017 року. Ця початкова версія обмежена неавтономною роботою NR. Пристрої NR покладаються на LTE для початкового доступу і мобільності. Крім того, автономна робота NR підтримується у фінальній версії 15 специфікації, доступній після червня 2018 року. Різниця між автономними і неавтономними мережами в основному пов'язана з питаннями інтерфейсу до верхніх рівнів і базових мереж. Базова бездротова технологія в обох випадках однакова.

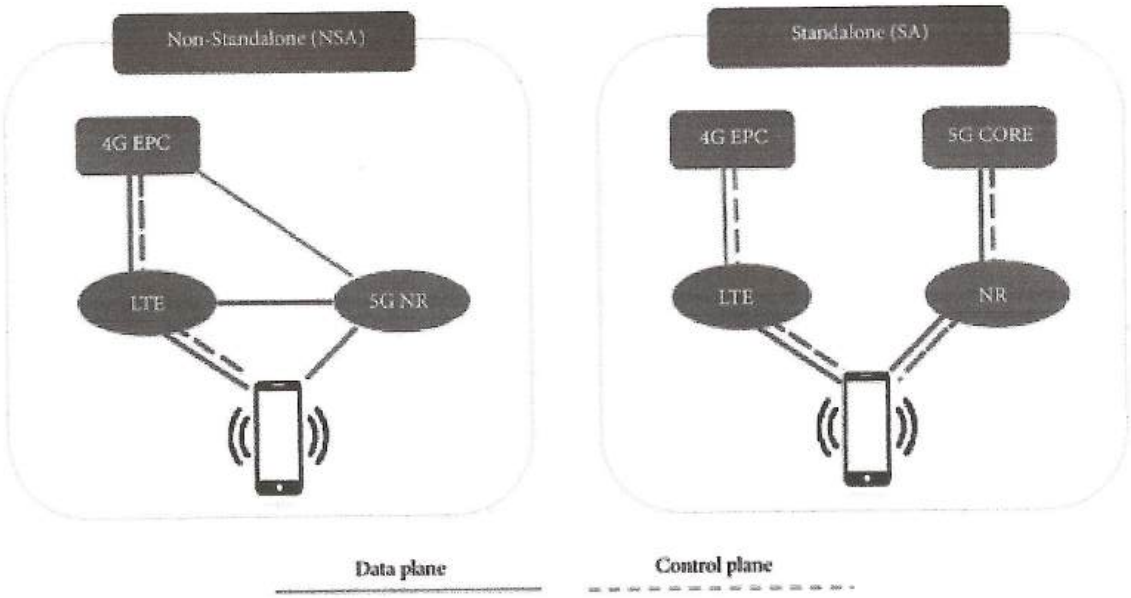


Рис. 3.12. Неавтономна 5G NR та автономна 5G NR

Технологія 5G базується на восьми специфікаціях, як показано на рисунку 3.13:

1) 100% покриття;

2) швидкість передачі даних до 10 Гбіт/с -> від 10 до 100 разів швидша, ніж у мережах 4G та 4,5G;

3) затримка в одну мілісекунду;

4) в 1000 разів більша пропускна здатність на одиницю площі;

5) до 100 разів більше підключених пристроїв на одиницю площі (у порівнянні з 4G LTE);

6) 99,999% доступність;

7) зменшення на 90% споживання енергії в мережі;

8) до 10 років автономної роботи для малопотужних IoT-пристроїв.

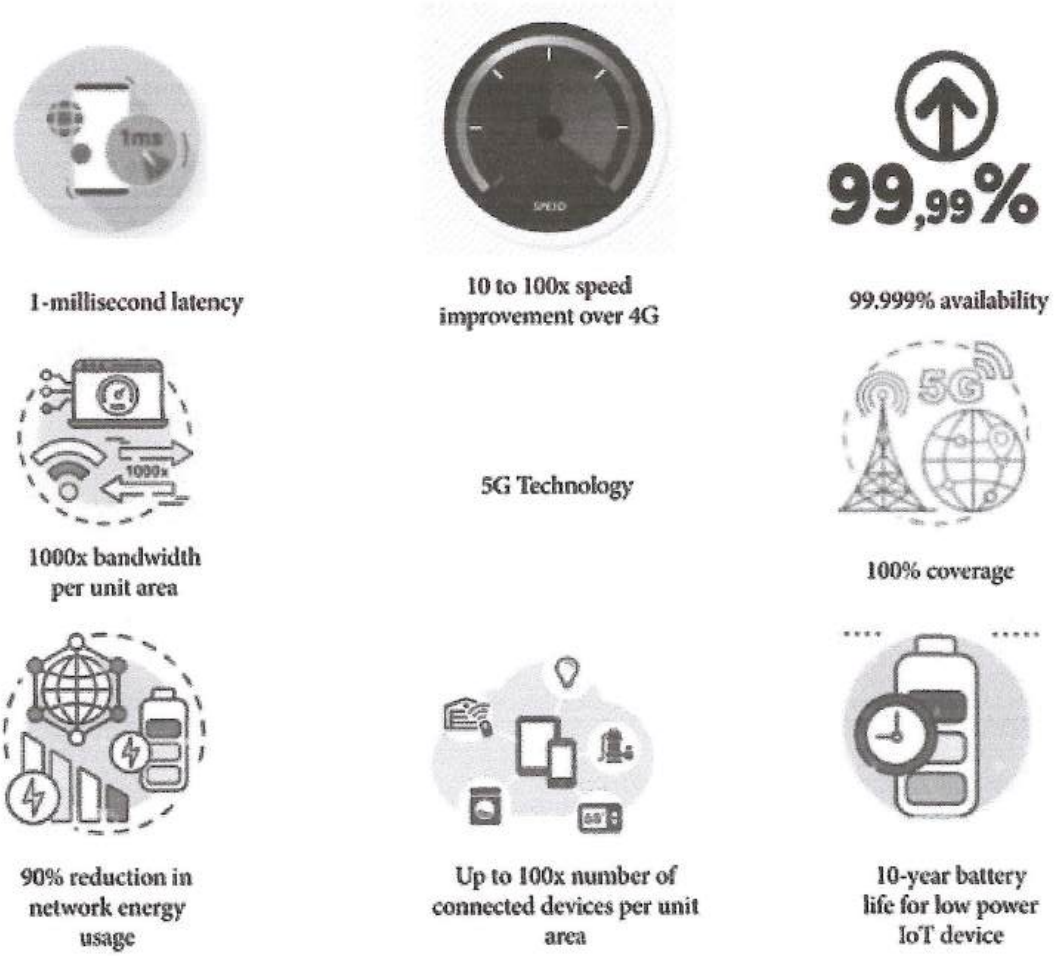


Рис. 3.13. Специфікаційні вимоги до технології 5G

Високе покриття:

Ще однією проблемою, на яку намагається відповісти 5G, є покриття. 5G вимагає створення повного покриття. Забезпечуючи достатнє покриття, такі технології, як IoT, D2D і V2V, можуть підключатися до мережі з будь-якого місця. Крім того, оскільки 5G забезпечує доступність мережі до 99,999% і покриття,

близьке до 100%, різні сервіси, включаючи вищезгадані технології, зможуть отримати доступ до мережі в будь-який час і з будь-якого місця.

Висока швидкість передачі даних:

Масове поширення мобільного зв'язку в останні роки збільшило попит на великі обсяги даних. Це є основним фактором, що зумовлює потребу у високих швидкостях передачі даних у технології 5G. Технологія 5G буде підтримувати багато послуг і додатків, які вимагають високої швидкості передачі даних. Ця система призначена для збільшення швидкості передачі даних до 10 Гбіт/с, що в десять разів більше, ніж у мережі 4G. Для досягнення цієї мети технологія 5G використовує кілька передових технічних рішень, таких як mmWave, масивне MIMO, а також різні методи модуляції та кодування.

Значно низька затримка:

Однією з найважливіших потреб, яку має задовольнити 5G, є забезпечення дуже низької затримки, де затримка - це час, необхідний для того, щоб запит пройшов наскрізний шлях, або час, необхідний для того, щоб мережа відповіла на нього. Затримка 5G значно зменшується до 1 мс для наскрізного циклу. Наскрізна затримка в мережі 5G в десять разів нижча, ніж в мережі 4G. Низька затримка мережі 5G дозволить використовувати різні додатки, такі як доповнена реальність, віртуальна реальність, безпілотні автомобілі та дистанційна хірургія.

Ширша пропускна здатність:

Більша пропускна здатність призводить до збільшення пропускної здатності. Традиційна мережа LTE працює в діапазоні частот 3 ГГц. Ця характеристика обмежує реалізацію до 5 Гбіт/с і ускладнює дизайн. Велика пропускна здатність на одиницю простору дозволяє розмістити велику кількість підключених пристроїв на невеликій площі. Це стає можливим завдяки технології mmWave. Технологія 5G забезпечить в 1000 разів більшу пропускну здатність на одиницю площі, збільшивши пропускну здатність до 10 Гбіт/с.

Величезна кількість підключених пристроїв:

Ще однією важливою метою системи 5G є значне розширення пропускної здатності і забезпечення можливості використання величезної кількості одночасно

підключених пристроїв. У порівнянні зі старими системами, 5G буде підтримувати від 10 до 100 разів більше одночасно підключених пристроїв. Величезна кількість пристроїв і датчиків IoT буде підключатися до мережі 5G, оскільки вона є важливою інфраструктурною мережею для IoT. Однак канали зв'язку також повинні забезпечувати дуже високу пропускну здатність і мінімальну затримку даних. Хоча одночасне підключення мільярдів пристроїв і датчиків до мережі є складним завданням, цієї мети можна досягти за допомогою таких рішень, як масові MIMO, технологія D2D і хмарний RAN.

Висока доступність:

Багато послуг і додатків, що надаються мережею 5G, вимагають постійного підключення до мережі. Як результат, 5G обіцяє 99,999% доступності, що означає, що мережа завжди буде працювати. Ця функція дозволить користувачам і пристроям підключатися до мережі та отримувати доступ до неї в будь-який час.

Збільшення часу автономної роботи:

Очікується, що термін служби батареї в 5G становитиме 10 років. Цієї мети можна досягти за рахунок розвитку технологій акумуляторів і електроніки, що вимагає багато енергії. Збільшення часу автономної роботи є критично важливим для пристроїв з обмеженою ємністю акумулятора, таких як ноутбуки, мобільні телефони та планшети.

Низьке енергоспоживання:

5G зменшить споживання енергії в мережі на 90%. Таке зниження енергоспоживання очікується, оскільки 5G забезпечує надзвичайно високі швидкості. Хоча 5G забезпечує високу швидкість передачі даних, низьку затримку і покриття, а також доступність на 99,999%, він збільшить споживання енергії через швидке перемикання між сплячим і активним режимами.

Виклики щодо специфікацій 5G:

Через високий попит і складні особливості мереж 5G необхідно вирішувати різні технологічні проблеми.

Широкі частотні діапазони:

У майбутньому мережевий трафік і необхідні швидкості передачі даних зростатимуть. Ці зміни вимагають більш широкого діапазону частот, ніж той, що використовується в системах LTE. Тому поточна смуга частот з діапазоном нижче 4 ГГц не може підтримувати вимоги 5G. Тому нам потрібні нові технології, які зможуть підтримувати високі швидкості трафіку і передачі даних будь-де і за будь-яких умов. Технологія міліметрових хвиль - найкращий спосіб одночасно задовольнити такі потреби. Це пов'язано з тим, що mmWave забезпечує більш широкі частотні діапазони, які підтримують передачу даних мережевого трафіку 5G.

Крім того, використання mmWave з масивними технологіями MIMO і формуванням променя надає відповідні можливості для реалізації мережі 5G. Однак підтримка високого трафіку і додаткових частотних діапазонів збільшує складність системи і, таким чином, ускладнює застосування мережі 5G. Іншими проблемами широких частотних діапазонів є обмеження покриття і більш високе загасання порівняно з низькочастотними діапазонами.

Величезний обсяг даних:

Щороку кількість пристроїв, підключених до Інтернету, значно зростає, так само як і обсяг даних. Основним викликом для 5G є мільярди гаджетів і датчиків, підключених до Інтернету. За прогнозами Huawei та Information Handling Services (IHS), до 2025 року кількість підключених пристроїв сягне 75-100 мільярдів. Як наслідок, 5G повинен бути здатним обробляти величезні обсяги даних з величезної кількості підключених пристроїв і датчиків та стисло обробляти їх. Зростання обсягів даних викликає труднощі та складність у забезпеченні безпеки, обробці, регулюванні та аналізі величезних обсягів даних.

Наднизька затримка:

Забезпечення наднизької затримки передачі даних є серйозною проблемою, з якою стикаються системи 5G. Багато важливих пакетів, в тому числі для індивідуального використання і використання підприємствами охорони здоров'я, вимагають затримок в 1 мс. Забезпечити надзвичайно низьку затримку менше 1 мс при величезній статистиці - складне завдання, яке має вирішити 5G. Крім того,

машинний зв'язок (MTC) - це утиліта, яку мережі 5G, ймовірно, хочуть допомогти, коли гаджети механічно розмовляють при кожній нагоді. Для таких додатків, як V2V-зв'язок, цей тип зв'язку вимагає дуже низької затримки. Проекти METIS і METIS-II, які є європейськими проектами з безпеки дорожнього руху, і приклад використання "підключених автомобілів" розглядають обмін інформацією між транспортними засобами та з інфраструктурою для забезпечення наступних цілей:

- Безпечніший та ефективніший транспорт;
- Дистанційні обчислення в режимі реального часу для мобільних терміналів.

З іншого боку, було запропоновано, щоб ефективність і безпека дорожнього руху були типовим тестовим прикладом застосування, причому затримка є критично важливою для оцінки системи. Інтелектуальні транспортні системи є поширеним сценарієм, показаним в METIS і METIS-II, в якому автомобілі потребують швидкого обміну даними, щоб уникнути аварій. Низька затримка також покращить користувацький досвід у таких додатках, як багатокористувацькі ігри. Таке зменшення затримки вимагає технологічних інновацій в дизайні сигналів і гнучкої архітектури на вищих рівнях мережі, і обидві ці вимоги можуть бути виконані за допомогою бездротових програмно-визначених мереж.

Наднадійна мережа:

Точність передачі даних без помилок відома як надійність. Деякі майбутні додатки і сервіси потребуватимуть високонадійних мереж, які не терпітимуть збоїв. Працюючи на високих частотах з використанням mmWave, 5G зробить бездротові технології більш вразливими. Як наслідок, 5G повинен вирішити цю проблему, використовуючи такі технології, як формування променя, MIMO і програмно-визначені мережі (SDN).

Безпека і конфіденційність:

У бездротових системах зв'язку безпека і конфіденційність є двома найбільш важливими аспектами. Вони також є двома найбільш значущими проблемами для системи 5G. 5G буде вміщувати багато підключених пристроїв з високою швидкістю передачі даних і великою ємністю, що викликає занепокоєння з приводу

безпеки і конфіденційності. Як наслідок, 5G повинен забезпечувати і гарантувати наскрізну конфіденційність і безпеку для користувачів. Величезна кількість підключених до мережі 5G пристроїв з величезними обсягами даних, а також проблеми з безпекою і конфіденційністю були двома найважливішими проблемами, з якими зіткнувся 5G. Для захисту даних і конфіденційності користувачів необхідно враховувати безпеку і конфіденційність.

Інтелектуальні транспортні засоби:

Після того, як буде побудовано 5G, стануть доступними самокеровані автомобілі та технології "розумних" автомобілів. Очікується, що "розумні міста" також будуть запущені для підтримки цієї програми. 5G дозволить "розумним" транспортним засобам підключатися і служити центром обробки даних для зв'язку з дорожньою інфраструктурою та іншими службами. З огляду на критичні для безпеки випадки використання і швидкозмінну архітектуру автомобільних мереж, розгортання технологій "розумних" автомобілів вимагає мереж зі значно меншою затримкою і надзвичайно високою надійністю. Як наслідок, мережа 5G повинна бути спроектована таким чином, щоб відповідати суворим вимогам до якості обслуговування систем "розумних" автомобілів.

Доступність спектру:

Частотний спектр є дефіцитним і наразі перенасиченим. Існуючі мобільні технології використовують частоти в діапазоні від 300 МГц до 3 ГГц. Тим не менш, для 5G досліджуються нові частотні діапазони. 5G використовує низькі і високі частоти, а також дуже високі частоти. Зазвичай низькі частоти (< 1 ГГц) і високі частоти (1-6 ГГц) використовуються для мобільного зв'язку. З іншого боку, дуже високі частоти (30-300 ГГц) є новою опцією спектру для 5G. У Європі, Японії, Південній Кореї та США інтервали між 3,5 і 4,5 ГГц, а також 28 ГГц включають зарезервовані або виділені ліцензовані та неліцензовані смуги. Крім того, діапазон 39 ГГц зазвичай використовується для 5G в США і Канаді. Смуга 39 ГГц може бути корисною, оскільки вона не насичена і тому доступна для мобільного зв'язку. На рисунку 3.14 показано радіоспектр 5G.

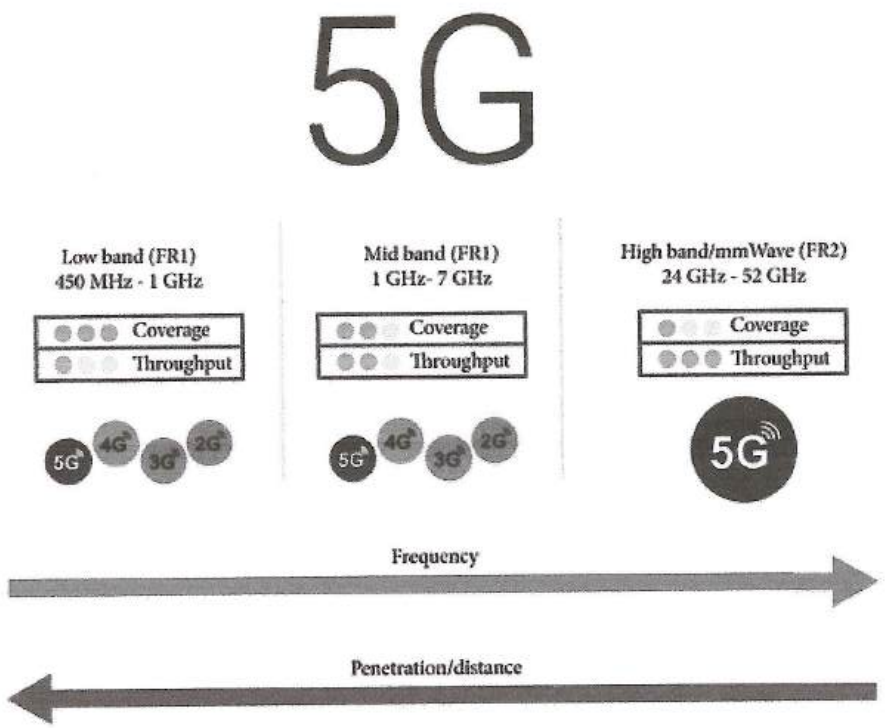


Рис. 3.14. Радіочастотний спектр 5G

Повітряний інтерфейс:

Через високі вимоги 5G необхідно розробити новий повітряний інтерфейс. Тому нові повітряні інтерфейси, відомі як NR, створюються відповідно до схем модуляції, які розробляються, виходячи з масштабу майбутніх систем мобільного зв'язку, оскільки 5G, що використовує технологію mmWaves, яка має коротку довжину хвилі, потребуватиме невеликих розмірів антен. Іншими словами, 5G використовує багато маленьких антен. Використання технології формування променя спрямовує сигнали антени в певному і бажаному напрямку, збільшуючи швидкість передачі даних і підвищуючи рівень сигналу з низьким рівнем перешкод. Однак 5G має подолати виклики, пов'язані з розробкою апаратного забезпечення, енергоспоживанням, точністю маршрутизації, а також аналого-цифровими і цифро-аналоговими процесами.

Адаптація спеціальних протоколів 5G:

Нещодавні дослідження були зосереджені на використанні спеціальних протоколів для поліпшення специфікацій бездротової мережі 5G, таких як швидкість передачі даних, перевантаження мережі і безпека. Застосування

мережевого кодування, кооперативних мереж, гібридних мереж тощо є важливим методом досягнення бажаного поліпшення.

Відповідно, застосування мережевого кодування і кооперативних мереж призвело до так званого кооперативного мережевого кодування (CoNC), яке покращило швидкість передачі даних, перевантаження мережі, безпеку, коефіцієнт пакетних помилок (PER) і коефіцієнт бітових помилок (BER), в той час як використовувала гібридну мережу для збільшення дальності передачі і поліпшення PER. Крім того, широко пропонуються вдосконалення додатків фізичного рівня, а додатки 5G все більше охоплюють медичну сферу.

3.4 Методи модуляції та кодування в мережах 5 покоління

Швидкість передачі даних є найважливішим аспектом системи бездротового зв'язку 5-го покоління. Основним завданням забезпечення швидкості передачі даних у гігабітному діапазоні для систем бездротового зв'язку п'ятого покоління є пошук ідеальної схеми модуляції та кодування. Схеми модуляції використовуються різними способами. Наприклад, для користувачів, які знаходяться ближче до базової приймально-передавальної станції (BTS), використовується метод модуляції QAM (квадратурна амплітудна модуляція). Це пов'язано з тим, що він може забезпечити високу швидкість передачі в разі високого SNR (відношення сигнал/шум), оскільки SNR є високим ближче до BTS. А схема модуляції QPSK використовується для користувачів, які знаходяться ближче до краю стільника, оскільки там SNR низький (схема модуляції QPSK забезпечує високу швидкість передачі даних при низькому SNR). Для збільшення швидкості передачі даних за рахунок зменшення BER (коефіцієнт бітових помилок), дослідникам потрібно знайти відповідну схему кодування.

Для порівняння з турбокодуванням було використано кодування Вітербі, яке складається зі згорткового кодування та декодування Вітербі. Це порівняння показує, що ефективність кодування Вітербі перевершує схему турбо-кодування. Було також проведено дослідження методів модуляції BPSK для різних типів

кодування. Згодом було також проаналізовано коефіцієнт бітових помилок (BER) для різних методів кодування.

Згорткове кодування та декодування Вітербі:

Згортковий код частіше всього описується трьома параметрами, які позначаються через (n, k, m). У цьому прикладі n є кількістю бітів, які створюються на виході, k є кількістю бітів, які надходять на вході, і m є кількістю бітів у регістрі зберігання. Ефективність згорткового коду можна визначити за допомогою певної комбінації значень як k/n. (n, k, L) використовується деякими виробниками замість (n, k, m), де n і має те саме значення, але L - це довжина граничної області коду, тому її називають довжиною граничної області і тут L=m+1 [11, 12]. Згорточний кодер показано на наступному рисунку.

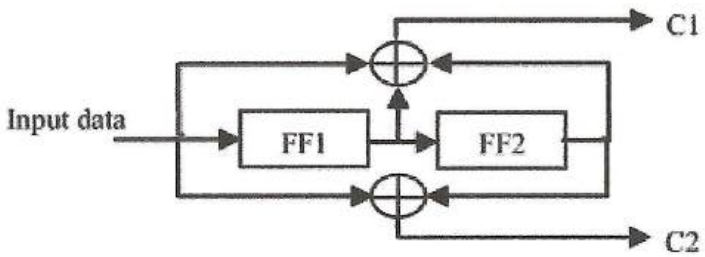


Рис. 3.15. Блок-схема згорткового кодера

Тут FF1 і FF2 є регістрами зсуву і діють як регістри зберігання. Метод вибору бітів, які додаються для формування вихідних бітів, називається поліномом генерації вихідних бітів. Генеруючі поліноми, такі як C1 і C2 використовуються для 2-розрядного суматора за модулем. C1 і C2 показують (111, 101), де C1 = mod2 (FF1 + FF2 + вхідний біт). C2 = mod2 (FF2 + вхідний біт). Неперевершену якість захисту виражається поліномом. На рисунку 3.16 показано кодер зі швидкістю кодування ½, що означає, що з кожного вхідного біта кодується 2 вихідних біта. Тут L дорівнює трьом. Вихідна швидкість кодера C1 C2 C1 C2 C1 C2 тощо. Якщо цей потік не відстежувати, то не буде вихідного сигналу з виправленими помилками, тому важливо підтримувати синхронізацію бітів. Тут ми припускаємо, що вхідні біти отримуються декодером синхронно. Графічні методи представлення згорткового кодування пояснюються нижче.

Діаграма станів:

Рисунок 3.17 представляє діаграму станів згорткового кодера. Таким чином двійковий вміст регістрів зберігання FF1 та FF2 відносять чотири стани, які ми бачимо на рис. 3.16. Лінії, що з'єднують стани, показують перехід, зумовлений подачею на вхід інформаційного біта, який дорівнює одиниці. Штрихові лінії представляють одиниці вхідного біта, а "0" перехідного біта вираженими пунктирними лініями.

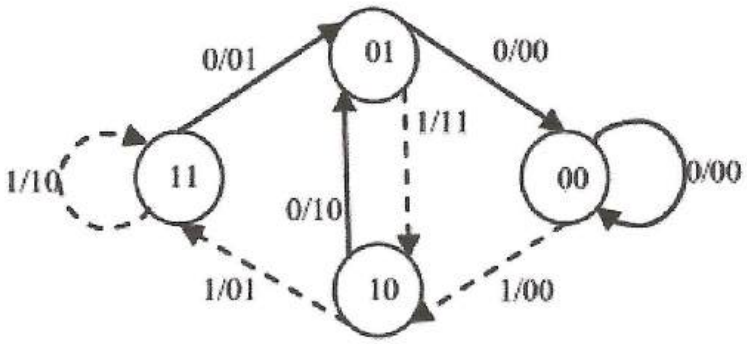


Рис. 3.16. Діаграма станів коду (2,1,3)

Згідно з алгоритмом Вітербі, полягає в тому, що декодування базується на припущенні, що воно має найвищу ймовірність правильності. Декодування Вітербі вперше було продемонстровано Геллером як практичний і продуктивний техніку декодування для малих обмежень короткої довжини. Найбільш імовірним кандидатом який описав Форні є алгоритм Вітербі. Для розрахунку метрики шляху та розгалуження сигналу, який може передаватися з одержаного сигналу. На рисунку 3.18 проілюстрована концепція сіткової діаграми. На вертикальній осі y - відкладено можливі стани, а на горизонтальній осі x - дискретний час. Додатковим фактором, який впливає на кількість станів, є довжина обмеження енкодера. Враховуючи, що L – це довжина обмеження яка дорівнює трьом, а отже є чотири можливих стани. T є довжиною зворотного ходу, яка містить довжину ліміту в 5-6 разів довшу. Декодування алгоритму починається у стані 0. Перша передана послідовність зазвичай перевіряється, коли канал отримує дані. Сітка є підходящою платформою для демонстрації цього методу. Бульбашки використовуються для

позначення станів у кожному часовому інтервалі. Суцільною лінією зображено вхідний біт "0", що з'єднує точки, які ілюструються на схемі, а пунктирною лінією представлено вхідний біт "1".

Структура турбокодера та декодера:

Універсальна структура турбокодера зображено на рисунку 3.19. Щоб закодувати вхідні біти застосовуються два коди. Це схоже на двокомпонентний код, але між кодувальниками розміщується інтерлейвер. Код компонента частіше всього застосовує рекурсивні систематичні згорткові коди (РСК), але використання структури, показаної на рисунку, з іншими допоміжними компонентами має бути задовільною реалізацією. Код блокування Хагенауера, Папке, Офферта, та Піндіа є відповідною ілюстрацією цього коду. BCH, який є наслідком цього ефекту, широко обговорювався в категорії турбо. Найбільшу увага ми будемо приділяти традиційній конструкції турбо-кодера, яка застосовує два RSC-коди.

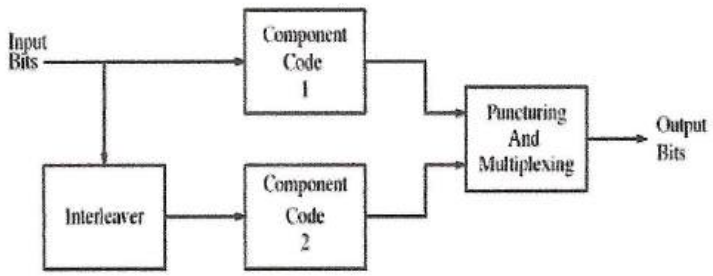


Рис. 3.17. Схема турбокодера, Berrou та інші

На рисунку 3.20 показано типову схему конфігурації ітеративного турбо-декодера. Конфігурація типу кодера передбачає чергування інтерфейсів між декодерами. Декодер має три входи. Вихідні біти каналу закодовуються цілком ретельно, біти парності передаються від кодера до компонента, який з ним пов'язаний, а інформація про значення бітів, які, ймовірно, пов'язані, передається від інших компонентів декодера. Апріорі - це термін, який використовується для опису цієї інформації. Апріорна інформація – це комбінація інформації з каналу, яку використовує компонентний декодер.

Коефіцієнт бітових помилок (BER) різноманітних схем модуляції та методів кодування є предметом нашого дослідження. Було розглянуто такі методи модуляції: BPSK, QPSK а також QAM, і дві схеми кодування: турбокодування та згорткове кодування.

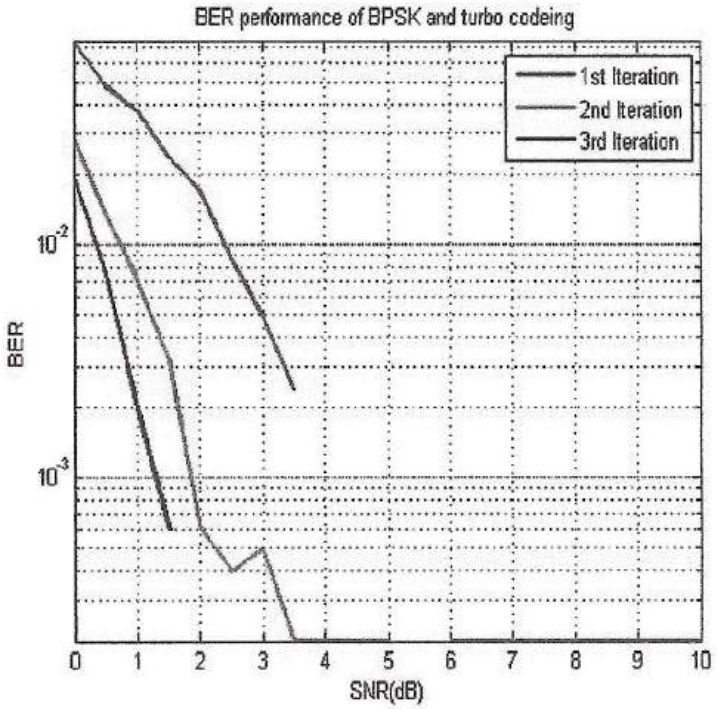


Рис. 3.18. Аналіз ефективності BER для BPSK і турбокодування

Рисунок 3.18 ілюструє, для першої ітерації при використанні методів турбокодування і BPSK модуляції BER становить $10_{-2,9}$ для SNR 3,5 дБ. Однак для ітерацій високих порядків BER суттєво менший у порівнянні меншого SNR. Проте таке значення BER недоцільне, тому стандартним значенням BER є $< 10_{-9}$.

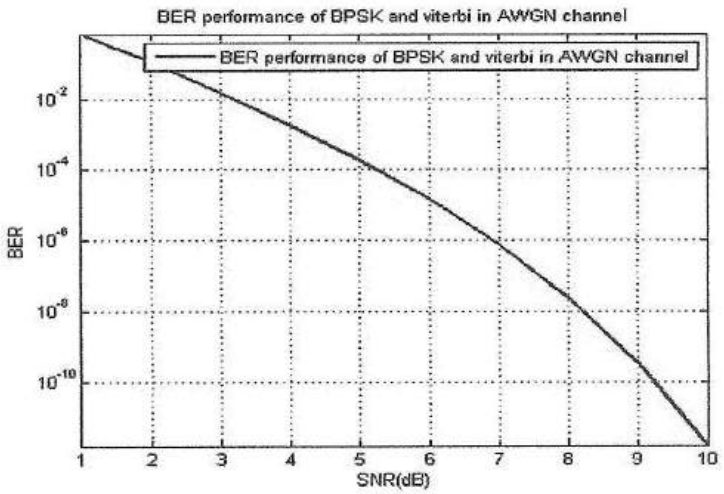


Рис. 3.19. Аналіз ефективності BER для BPSK та згорткового кодування

Згідно ілюстрації 3.19, коли мова йде про BPSK і згорткове кодування BER буде < 10_{-10} для SNR 10 дБ. Це відображає доволі обгрунтований результат схеми модуляції і згорткового кодування.

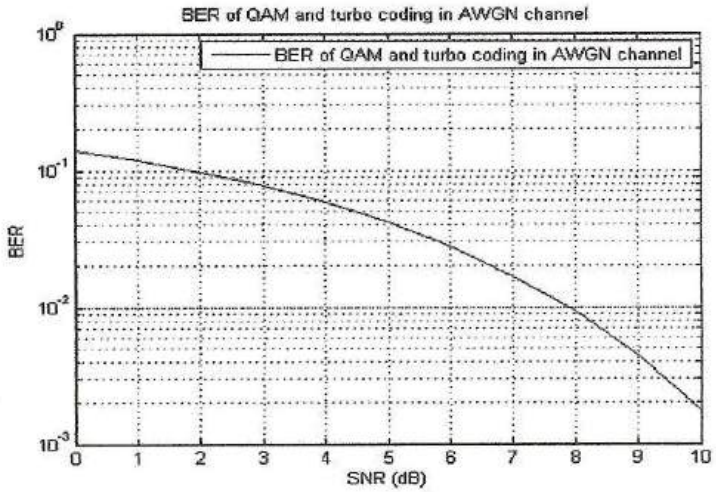


Рис. 3.20. Аналіз ефективності BER для QAM і турбо-кодування

Продемонстровано схему 3.20, що у разі QAM і турбо-кодування BER буде < $10_{-2,8}$ для SNR 10 дБ. Однак значення BER значно більше порогового рівня (<10_{-9}).

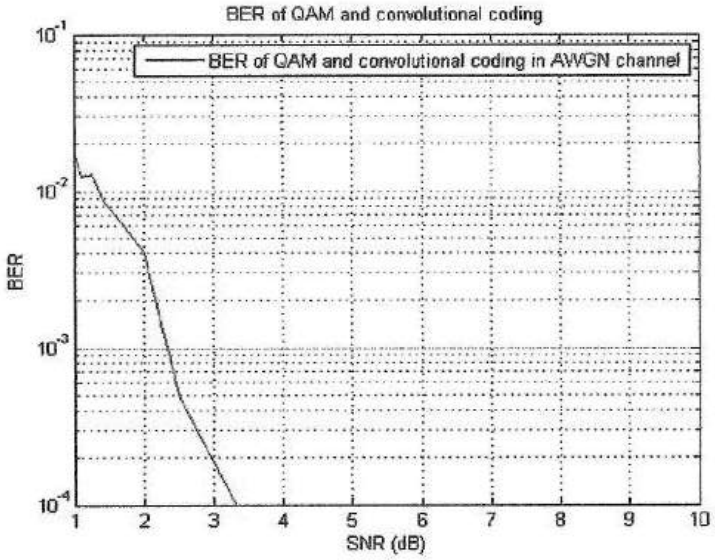


Рис. 3.21. Аналіз показників BER для QAM і згорткового кодування

Продемонстровано схему 3.21, що у разі QAM і турбо-кодування BER буде < 10_{-4} для SNR 3,2 дБ. Для схем модуляції QAM і згорткового кодування це є цілком прийнятним результатом. Однак значення BER менше порогового рівня.

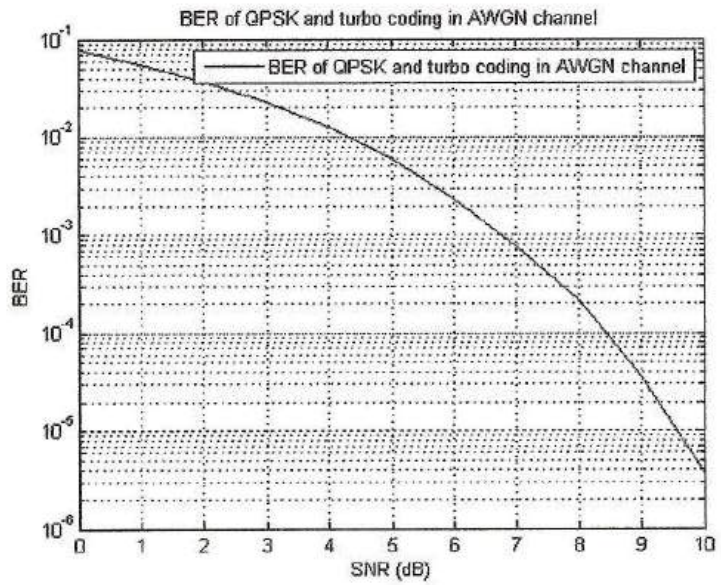


Рис. 3.22. Аналіз BER для QPSK і турбо-кодування

Ілюстрація 3.22 зображає, що у варіанті QPSK і турбо-кодування BER складає < $10_{-5,5}$ для SNR 10 дБ. Однак це значення BER набагато вище порогового рівня (< 10_{-9}).

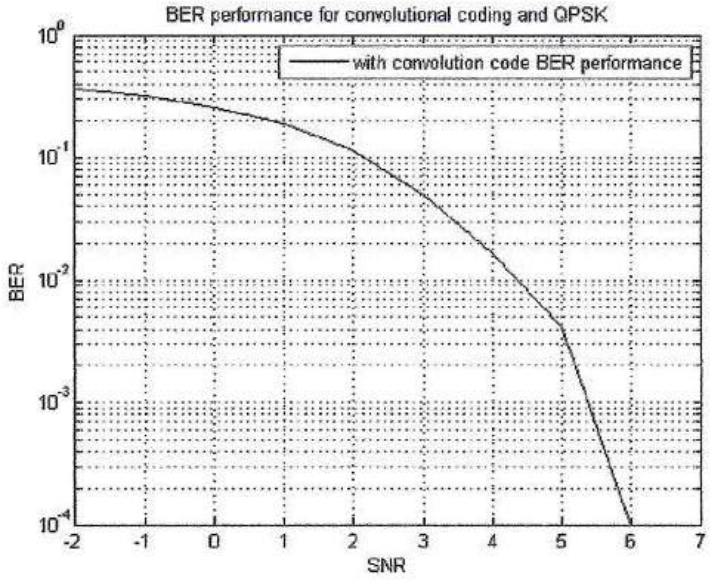


Рис. 3.23. Аналіз ефективності BER для QPSK і згорткового кодування

Зображення 3.23 представлено, що для кодування QPSK і Turbo BER складатиме < 10_{-5} для SNR 6 дБ. Це цілком прийнятний результат для схем модуляції QAM і згорткового кодування. Однак кодування Turbo має більш високе відносне значення BER. Для користувачів поблизу BTS ми пропонуємо QAM, тоді як для тих, хто розташований на межі стільника, рекомендуємо QPSK. Таким чином, для QAM і QPSK згорткове кодування є правильним рішенням як для користувачів короткого, так і для дального діапазону, та надає кращий BER у випадку з малим SNR.

ВИСНОВКИ

Світ бездротових телекомунікацій стрімко розвивається. За останні кілька років бездротова індустрія зазнала безпрецедентного зростання. В результаті цієї безперервної еволюції з'явилися різні покоління. У цій статті ми обговоримо різні покоління та особливості мобільних бездротових технологій. 1G представив перше покоління мобільного зв'язку, яке дозволило здійснювати аналогові голосові дзвінки. 2G принесло цифрову технологію, яка уможливила більш ефективні голосові дзвінки та базові послуги передачі даних. 3G розширило можливості передачі даних і забезпечило доступ до Інтернету та мультимедійних додатків. 4G ще більше підвищило швидкість передачі даних і підтримало високоякісне потокове відео та мобільний широкосмуговий зв'язок. Нарешті, 5G - це останнє покоління, яке забезпечує надшвидкісні швидкості, низьку затримку і масове підключення пристроїв, прокладаючи шлях для передових технологій, таких як Інтернет речей, доповнена реальність і автономні транспортні засоби.

Це дослідження дало вичерпний огляд вимог до технологій 5G та викликів, пов'язаних з їхніми специфікаціями. Воно описує загальну архітектуру мережі 5G та основні вимоги до неї. Також в документі представлені технології 5G, mmWave, масивне MIMO, методи формування променя та інші передові технології. В результаті дослідження було встановлено низку важливих викликів, які необхідно ефективно вирішити, перш ніж технологія 5G зможе стати глобальною. В цьому документі описується стислий та детальний огляд бездротових мереж 5G.

Запропоновано адаптивну схему модуляції для системи бездротового зв'язку 5-го покоління. У цьому дослідженні варіанти схем адаптивної модуляції QPSK і QAM доступні для користувачів, які знаходяться ближче до межі стільника та BTS. Метою цієї роботи було знайти правильну схему кодування для цієї схеми адаптивної модуляції щоб мінімізувати BER та збільшити швидкість передачі даних. Аналізуючи схему кодування Вітербі та схему турбо-кодування для адаптивної схеми модуляції, було доведено, що схема згорткового кодування є

більш ефективною, ніж турбо-кодування у всіх видах схем модуляції з будь-яким SNR (відношення сигнал/шум).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ahmed Y. Recipes for Communication and Signal Processing. Springer Nature Singapore. 2023.

2. Archana K., Prasad V. K., Ashok M., Anantha Raman G. R. Network Architectures and Protocols for Efficient Exploitation of Spectrum Resources in 5G. 5G and beyond. Springer Tracts in Electrical and Electronics Engineering book series (STEEE). 2023.

3. Bouguen Y., Hardouin E., Wolff F.-X. LTE et les réseaux 4G. Eyrolles. 2012.

4. Chitode J. S. Communication Systems – I. UNICORN Publishing Group. 2020.

5. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 5G NR The Next Generation Wireless Access Technology. Elsevier Science. 2020.

6. Djordjevic I. B. Advanced Optical and Wireless Communications Systems. Springer International Publishing. 2022.

7. Frauendorf J. L., de Souza E. A. The Architectural and Technological Revolution of 5G. Springer International Publishing. 2022.

8. Krouk E., Semenov S. Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications. Wiley. 2011.

9. Morais D. H. 5G and Beyond Wireless Transport Technologies. Springer International Publishing. 2021.

10. Rao K. D. Channel Coding Techniques for Wireless Communications. Springer India. 2015.

11. Stallings W. 5G Wireless: A Comprehensive Introduction. Pearson Education. 2021.

12. Tang H., Yang N., Zhang Z., Du Z., Shen J. 5G NR and Enhancements: From R15 to R16. Elsevier. 2021.

13. Wang S., Cai Y., Xu Y., Cai Y. Wireless Communication Network Technology and Evolution. World Scientific Publishing Company. 2022.

14. Zheng K., Xiang W., Shen X. (Sherman). 5G Mobile Communications. Springer International Publishing. 2016.

15. Al Amin A., Basak D., Khadem T., Hossen M. D., Islam M. S. Analysis of modulation and coding scheme for 5th generation wireless communication system. International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA). 2016. DOI: 10.1109/CCAA.2016.7813968

16. Al-Obaidi M. A. M., Ali B. J., Alkindy B. A comparative Study of the Evolution Different Mobile Generations for Wireless Communication. Journal of the College of Basic Education. 2022. DOI:10.35950/CBEJ.V26I109.5352

17. Arunachalam S., Kumar S., Kshatriya H., Patil M. Analyzing 5G: Prospects of Future Technological Advancements in Mobile. International Conference on Innovative and Advanced Technologies in Engineering (ICIATE). 2018.

18. Chataut R., Akl R. Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction. Italian National Conference on Sensors. 2020. DOI: 10.3390/S20102753

19. El-Shorbagy A. 5G Technology and the Future of Architecture. 17th International Learning & Technology Conference (17th L&T Conference). 2021. DOI: 10.1016/J.PROCS.2021.02.017

20. Gupta A., Jha R. K. A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). 2015. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2461602

21. Ibrahim A. J., Hassan A., Disina A. H., Pindar Z. A. The Technologies of 5G: Opportunities, Applications and Challenges. International Journal of Systems Engineering. 2021. DOI: 10.11648/J.IJSE.20210502.12

22. Indoonundon M., Fowdur T. P. Overview of the challenges and solutions for 5G channel coding schemes. Journal of Information and Telecommunication. 2021.

23. Javid I., Khara S. 5G Network: Architecture, Protocols, Challenges and Opportunities. International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS). 2022. DOI: 10.1109/ICCCIS56430.2022.10037605

24. Kumar N., Kedia D., Purohit G. A review of channel coding schemes in the 5G standard. Telecommunication Systems. 2023. DOI: 10.1007/S11235-023-01028-Y

25. Nayak P., R. N. Swathi, Thirtha, A. S. Vaishnavi. Review Paper on 5G Network. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT). 2022. DOI: 10.48175/IJARSCT-7022

26. Patil K., Achar C. The Future of 5G Wireless System. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science (IRJMETS). 2022.

27. Sheikh T. A., Babul R. Evolution of Mobile Communication Networks. National Conference on Recent Trends in Electronics and Communication Engineering (NCRT-ECE). 2020.

28. Singh R. K., Bisht D., Prasad R. C. Development of 5G Mobile Network Technology and Its Architecture. International Journal of Recent Trends in Engineering & Research (IJRTER). 2017. DOI: 10.23883/IJRTER.2017.3475.VMOF0

29. Tidke R. P., Uttarwar P. S., Dandwate D. S., Tupe U. J. A Literature Review On: Wireless Technologies From 0G to 7G. Iconic Research and Engineering Journals (IRE Journals). 2020.

30. Ericsson Mobility Report data and forecasts. URL: https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/dataforecasts (дата звернення (01.10.2023).

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

СЛАЙД 1

Магістерська робота на тему:
«МЕТОДИ МОДУЛЯЦІЇ ТА КОДУВАННЯ В МЕРЕЖАХ 5 ПОКОЛІННЯ»

Виконав: студент 6 курсу, групи АРДМ-61
Багмет Владислав Вікторович

СЛАЙД 2

Актуальність – Однією з ключових причин, що підкреслює актуальність теми, є зростання попита на бездротові з'єднання. Методи модуляції та кодування в мережах 5-го покоління набувають особливої актуальності, оскільки оптимізація передачі даних та підвищення ефективності мереж стають важливими викликами у контексті розвитку мереж 5G та майбутніх поколінь. Швидкість передачі даних є одним із найважливіших аспектів систем бездротового зв'язку 5-го покоління. Основним завданням забезпечення швидкості передачі даних у гігабітному діапазоні для систем бездротового зв'язку п'ятого покоління є пошук ідеальної схеми модуляції та кодування. Схеми модуляції використовуються для перетворення цифрового сигналу в форму, більш зручну для передачі по каналу зв'язку. Схеми кодування використовуються для підвищення ефективності передачі інформації, зменшення впливу шуму та завадів, а також для підвищення безпеки передачі.

Тому, теоретичні та практичні дослідження направлені на вирішення даних завдань є актуальними і своєчасними.

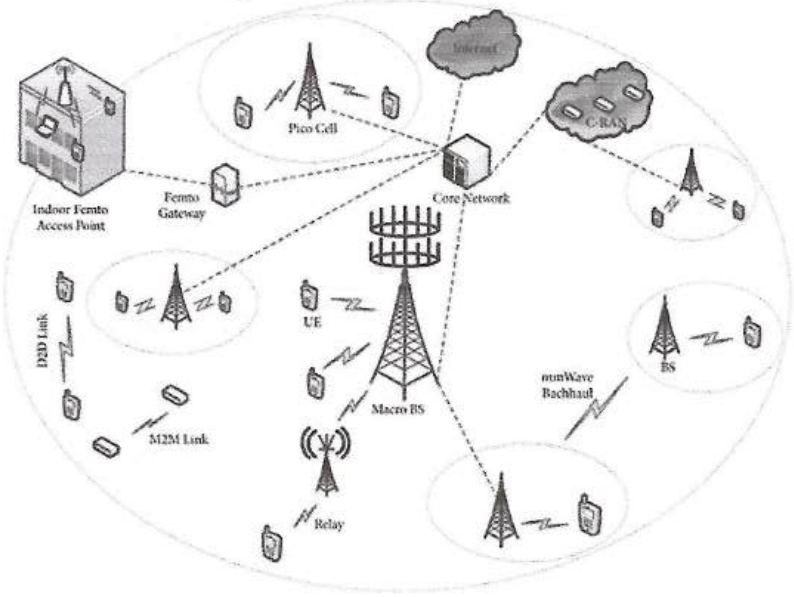
Об'єкт дослідження– мережа 5G та взаємодія методів модуляції та кодування в бездротових мережах 5G.

Предмет дослідження– мережа 5G, методи модуляції та кодування в бездротових мережах 5G.

Мета роботи – визначити ефективну схему кодування для схеми адаптивної модуляції, щоб зменшити коефіцієнт бітових помилок та збільшення швидкості передачі даних.

СЛАЙД 3

Мережа 5 покоління



Архітектура стільникової мережі 5G

СЛАЙД 4

Методи модуляції та кодування

Методи модуляції:

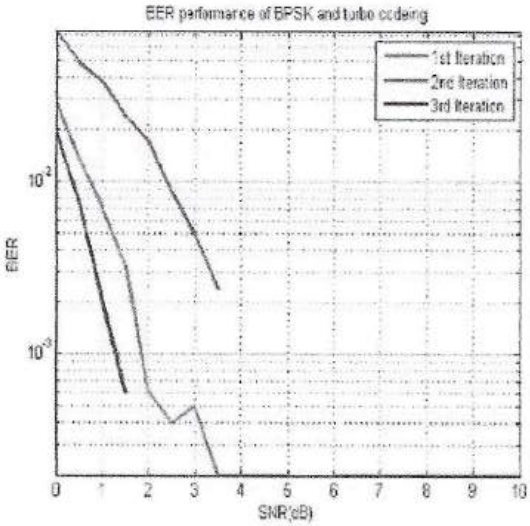
- BPSK
- QAM
- QPSK

Методи кодування:

- TURBO
- CONVOLUTION

СЛАЙД 5

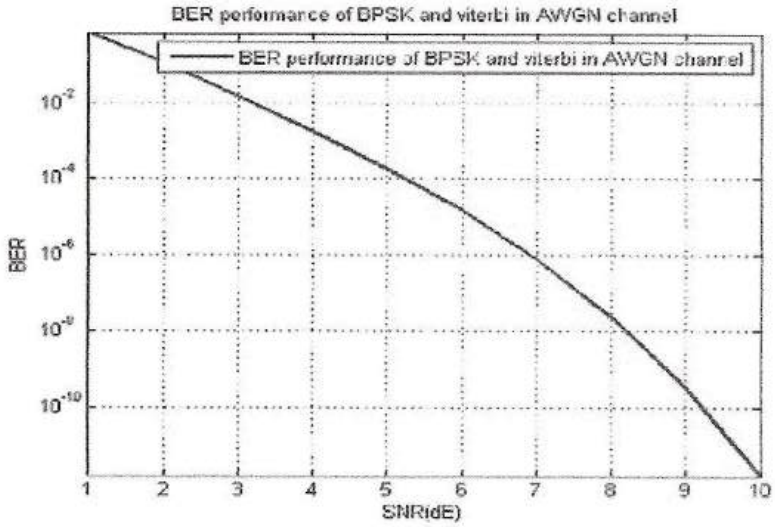
Симуляція та результати



Аналіз ефективності BER для BPSK і турбо-кодування

СЛАЙД 6

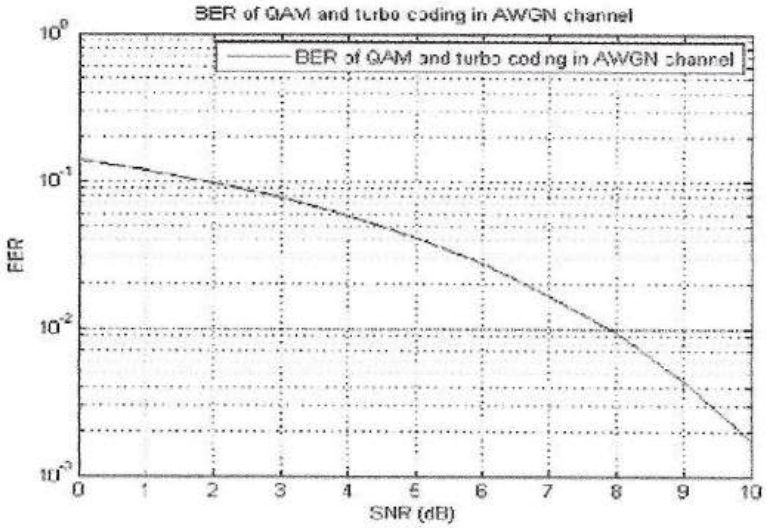
Симуляція та результати



Аналіз ефективності BER для BPSK та згортковогокодування

СЛАЙД 7

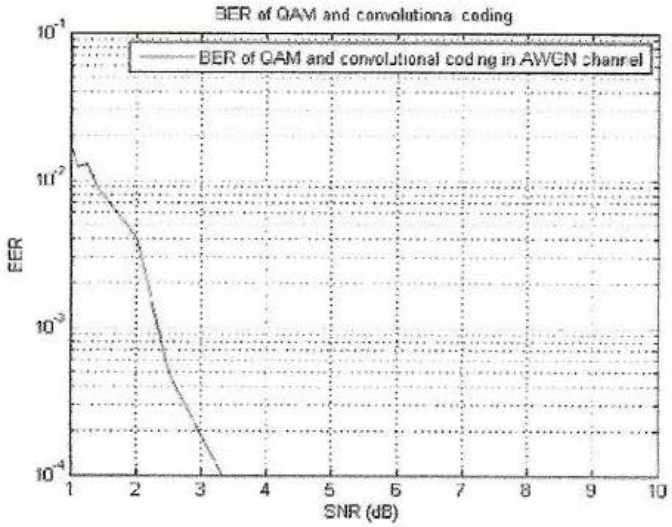
Симуляція та результати



Аналіз ефективності BER для QAM і турбо-кодування

СЛАЙД 8

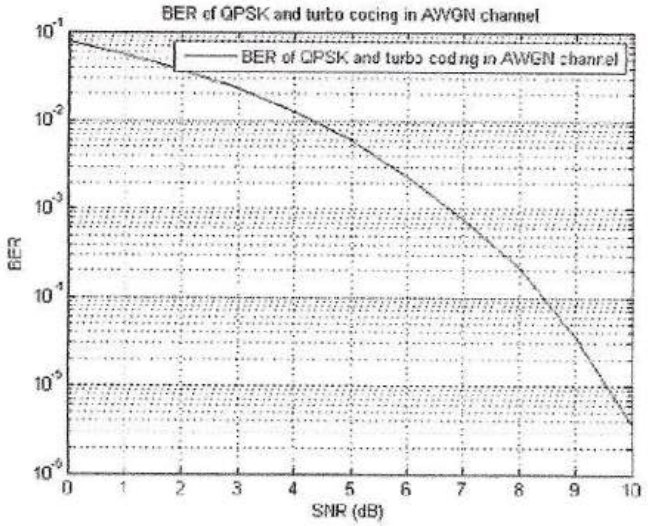
Симуляція та результати



Аналіз показників BER для QAM і згорткового кодування

СЛАЙД 9

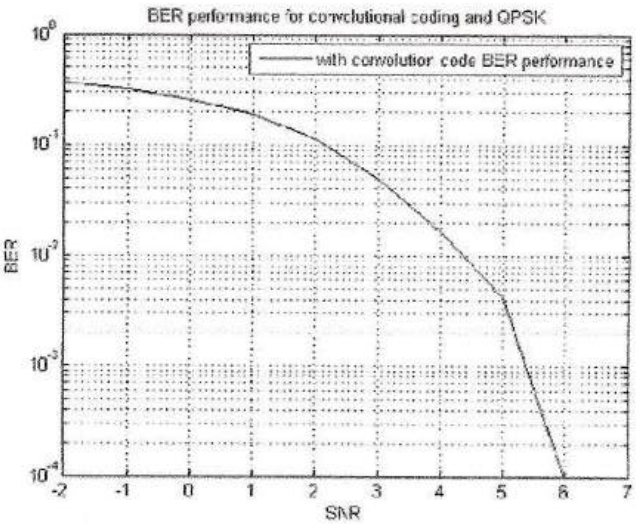
Симуляція та результати



Аналіз показників BER для QPSK і турбо-кодування

СЛАЙД 10

Симуляція та результати



Аналіз продуктивності BER для QPSK і згортковогокодування

СЛАЙД 11

Висновки

Адаптивна схема модуляції була запропонована для системи бездротовогозв'язку 5-го покоління. Для цієї дослідницької роботи доступними варіантами адаптивних схем модуляції є QPSK і QAM для користувачів, що знаходяться ближче до межі стільників і ближче до BTS відповідно. Метою роботи було знайти правильну схему кодування для цієї адаптивної схеми модуляції, щоб зменшити BER, а також збільшити швидкість передачі даних. Порівнюючи схему кодування Вітербі та схему турбо-кодування для системи адаптивної модуляції, було виявлено, що схема згорткового кодування виявляється більш ефективною, ніж турбо-кодування у всіх видах схем модуляції з будь-яким числом SNR (відношення сигнал/шум).

СЛАЙД 12

Апробація результатів магістерської роботи

Основні результати магістерської роботи доповідалися на Науково-практичній конференції «Telecommunication: problems and innovation», Київ: ДУІКТ, 20 грудня 2023 р.

Основні наукові результати магістерської роботи опубліковано в науковому журналі "Наукові записки ДУІКТ, – 2023, – №1".

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Владислав БАГМЕТ

Назва: Методи модуляції та кодування в мережах п'ятого покоління

Координатор: Лариса ДАКОВА

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:0.5

Коефіцієнт подібності 2:0

Тривога: 1

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☐ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

....

Дата *Підпис Наукового керівника*