ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МЕРЕЖ 5G/6G»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)

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

_____ Євген КАРПІНСЬКИЙ
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

Виконав: здобувач вищої освіти гр. _ТСДМ-62_
Євген КАРПІНСЬКИЙ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник: Вікторія КОРЕЦЬКА
к.п.н., доцент *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ*

Рецензент: _____
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут Телекомунікацій

Кафедра ___Телекомунікаційних систем та мереж_____
Ступінь вищої освіти __магістр_____
Спеціальність ___172 Електронні комунікації та радіотехніка _____
Освітньо-професійна програма _____Телекомунікаційні системи та мережі_____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри __ТСМ_____
_____ Віктор ЗАЇКА
«____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Карпінському Євгену Леонідовичу
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Підвищення пропускної здатності мереж 5G/6G_____
керівник кваліфікаційної роботи Вікторія КОРЕЦЬКА, к.п.н., доцент
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «30» 10. 2025 р. № 467

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «___» _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. 6G.
   2. Стандарти систем зв'язку.
   3. Практичне застосування 6G.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
   1. Розвиток технологій.
   2. Розвиток стандартів систем зв'язку на прикладі 6G.
   3. Ключові особливості 6G.
   4. Практичне застосування 6G. Стандартизація, енергоефективність та використання повного дуплексу.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: ___презентація на ____слайдах_____

6. Дата видачі завдання «___» _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір та аналіз науково-технічної літератури	13.10.2025	Викон.
2	Розробка першого розділу	20.10.2025	Викон.
3	Розробка другого розділу	24.10.2025	Викон.
4	Розробка третього розділу	29.10.2025	Викон.
5	Розробка четвертого розділу	19.11.2025	Викон.
6	Висновки, вступ, реферат	28.11.2025	Викон.
7	Розробка презентації	12.12.2025	Викон.

Здобувач вищої освіти _____ Євген КАРПІНСЬКИЙ
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Вікторія КОРЕЦЬКА
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій
ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Карпінський Є.Л. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)
за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)
на тему: «Підвищення пропускної здатності мереж 5G/6G»

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

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

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Карпінський Євген Леонідович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти новими комп'ютерними технологіями, користуватися навчальною, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які були поставлені керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до наукової роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу здобувача Карпінського Євгена Леонідовича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Вікторія КОРЕЦЬКА
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Карпінський Є.Л. допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри телекомунікаційних систем та мереж _____ Віктор ЗАЇКА
(назва) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну роботу
на здобуття освітнього ступеня магістра

здобувача вищої освіти Карпінського Євгена Леонідовича
(прізвище, ім'я, по батькові)
на тему «Підвищення пропускної здатності мереж 5G/6G»

Актуальність.
Тема роботи є актуальною, тому що розвиток телекомунікаційних систем та мереж є однією з ключових рушійних сил цифрової трансформації сучасного суспільства. Від перших аналогових технологій до мереж п'ятого покоління мобільні комунікації пройшли шлях від забезпечення лише голосових дзвінків до комплексної платформи для мультимедійних сервісів, Інтернету речей, автономного транспорту та індустріальної автоматизації. Кожне нове покоління супроводжувалося зростанням швидкості передавання даних, зменшенням затримок, підвищенням надійності та інтеграцією нових видів сервісів.

Позитивні сторони.
1. Робота висвітлює розвиток антенних технологій від Massive MIMO у 5G до Extreme MIMO у 6G, підкреслюючи їх роль у підвищенні пропускної здатності та якості зв'язку..
2. У роботі досліджено інтеграцію супутникових систем і наземних мереж (NTN), що є одним із ключових напрямів розвитку 6G.

Недоліки.
1. В роботі не достатньо розглянута практична реалізація дослідження.
2. Економічна доцільність впровадження 6G розглянута поверхово.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку магістерської кваліфікаційної роботи

Висновок: *кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра заслуговує оцінку "відмінно", а здобувач Карпінський Євген Леонідович заслуговує присвоєння кваліфікації: магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.*

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

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 73 стор., 27 рис., 1 табл., 22 джерела.

Мета роботи – розробити та обґрунтувати підходи до підвищення пропускної здатності телекомунікаційних систем наступних поколінь (5G/6G) шляхом використання нових діапазонів частот, антенних технологій та інтеграції супутникових і наземних мереж.

Об’єкт дослідження – телекомунікаційні системи та мережі п’ятого і шостого поколінь мобільного зв’язку.

Предмет дослідження – методи, технології та технічні рішення, що забезпечують підвищення пропускної здатності, енергоефективності та надійності мереж 5G/6G, включно з використанням терагерцового діапазону, багатоелементних антенних решіток (MIMO/XMIMO) та інтеграції з супутниковими системами.

Короткий зміст роботи: В роботі розглянуто сучасний стан впровадження 5G, проблеми і перспективи 6G. Наведено план стандартизації, очікувані можливості нового покоління (терабітні швидкості, наднизькі затримки, інтеграція з IoT, штучним інтелектом і квантовими мережами), а також основні виклики. Також розглядаються ключові технічні особливості 6G: використання терагерцового діапазону, Extreme MIMO, інтеграція наземних і супутникових сегментів, застосування штучного інтелекту, а також нові можливості точного позиціонування й зондування. Проаналізовано закономірності розвитку спектрів та вплив їх освоєння на пропускну здатність мереж.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МОБІЛЬНІ МЕРЕЖІ, 5G, 6G, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, ТЕРАГЕРЦОВИЙ ДІАПАЗОН, MIMO, EXTREME MIMO, СУПУТНИКОВИЙ ЗВ’ЯЗОК, ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (IOT), УЛЬТРАНИЗЬКІ ЗАТРИМКИ.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 73 pages, 27 figures, 1 table, 22 sources.

The purpose of the work is to develop and substantiate approaches to increasing the throughput of next-generation telecommunication systems (5G/6G) by using new frequency ranges, antenna technologies, and integrating satellite and terrestrial networks.

Object of the research is telecommunication systems and networks of the fifth and sixth generations of mobile communications.

Subject of the research is methods, technologies, and technical solutions that ensure increased throughput, energy efficiency, and reliability of 5G/6G networks, including the use of the terahertz range, multi-element antenna arrays (MIMO/XMIMO), and integration with satellite systems.

Summary of the work: The paper reviews the current state of 5G implementation, problems, and prospects for 6G. The standardization plan, expected capabilities of the new generation (terabit speeds, ultra-low latency, integration with IoT, artificial intelligence, and quantum networks), and the main challenges are presented. The key technical features of 6G are also considered: the use of the terahertz range, Extreme MIMO, integration of terrestrial and satellite segments, the use of artificial intelligence, as well as new capabilities for precise positioning and sensing. The patterns of spectrum development and the impact of their development on network throughput are analyzed.

KEYWORDS: MOBILE NETWORKS, 5G, 6G, BANDWIDTH, TERAHERTZ RANGE, MIMO, EXTREME MIMO, SATELLITE COMMUNICATION, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, INTERNET OF THINGS (IOT), ULTRA-LOW LATIVATES.

ЗМІСТ

ВСТУП 9
РОЗДІЛ 1 РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЙ 11
1.1 Розвиток інтернет зв’язку 11
1.2 Розвиток G стандартів 13
1.3 Поетапний розвиток 17
РОЗДІЛ 2 РОЗВИТОК СТАНДАРТІВ СИСТЕМ ЗВ’ЯЗКУ НА ПРИКЛАДІ 6G 23
2.1 Системи зв’язку нашого часу 23
2.2 Розробка та план впровадження 6G 26
2.3 Вимоги 6G зв’язку 30
РОЗДІЛ 3 КЛЮЧОВІ ОСОБЛИВОСТІ 6G 36
3.1 6G з технічної точки зору 36
3.2 Дослідження спектрів 39
3.3 Проблема зменшення зони покриття 44
3.4 Використання антенних решіток (XMIMO - Extreme MIMO) 48
РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ 6G. СТАНДАРТИЗАЦІЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ВИКОРИСТАННЯ ПОВНОГО ДУПЛЕКСУ 54
4.1 Стандартизація 3GPP 54
4.2 Енергоефективність систем 58
4.3 Повний дуплекс у системах 6G 62
4.4 Використання 6G 66
ВИСНОВКИ 72
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 74
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 76

ВСТУП

Розвиток телекомунікаційних систем та мереж є однією з ключових рушійних сил цифрової трансформації сучасного суспільства. Від перших аналогових технологій до мереж п’ятого покоління мобільні комунікації пройшли шлях від забезпечення лише голосових дзвінків до комплексної платформи для мультимедійних сервісів, Інтернету речей, автономного транспорту та індустріальної автоматизації. Кожне нове покоління супроводжувалося зростанням швидкості передавання даних, зменшенням затримок, підвищенням надійності та інтеграцією нових видів сервісів.

Мережі п’ятого покоління (5G) відкрили можливість масового підключення мільйонів пристроїв на квадратний кілометр, забезпечили гнучку підтримку критично важливих застосувань із наднизькими затримками та створили умови для розвитку цифрових сервісів нового типу. Проте зростаючі вимоги індустрії, науки та користувачів вимагають подальшого розвитку. Саме тому у світі активно ведуться дослідження й підготовка до впровадження систем шостого покоління (6G).

Особливістю 6G є орієнтація не лише на підвищення пікових швидкостей до сотень гігабіт чи навіть терабіт за секунду, а й на розширення функціональності. У центрі уваги опиняються такі напрями, як голографічний інтернет, тактильні комунікації, цифрові двійники, інтеграція з квантовими мережами та повне супутниково-наземне покриття. Очікується, що 6G забезпечить не лише значно кращі характеристики якості обслуговування, а й стане універсальною платформою для розвитку інтелектуальних міст, промислових систем та глобальної цифрової економіки.

Одним із головних чинників підвищення пропускної здатності виступає розширення спектра частот. Якщо 4G обмежувалося діапазоном до 2,5 ГГц, а 5G розширило його до 3,5 ГГц та вперше залучило міліметрові хвилі до 60 ГГц, то 6G планує активне використання нових смуг — від 7–13 ГГц до субтерагерцових частот. Це створює значні перспективи, але водночас породжує виклики, пов’язані

з високими втратами сигналу, складністю поширення хвиль і потребою у нових антенних технологіях.

Перспективним рішенням у цьому напрямі є застосування багатоелементних антенних решіток та технології MIMO, що вже довела свою ефективність у 5G. Подальший розвиток цієї концепції — Extreme MIMO (XMIMO) — передбачає використання тисяч антенних елементів, що дозволить формувати надвузькі промені, обслуговувати десятки користувачів у межах одного каналу та навіть виконувати функції зондування.

Не менш важливими стають завдання енергоефективності. Для кінцевих користувачів важливо продовжити автономність смартфонів, а для Інтернету речей перспективними є сенсори, що працюють без батарей, отримуючи енергію з довкілля. У комплексі з інтеграцією наземних і супутникових систем (NTN) це дозволить створити універсальне комунікаційне середовище, здатне задовольнити як потреби окремого користувача, так і вимоги цілих галузей.

Таким чином, дослідження методів підвищення пропускної здатності мереж 5G/6G має стратегічне значення. Воно дозволяє не лише окреслити технологічні напрями розвитку телекомунікацій, але й визначити, яким чином ці мережі впливатимуть на економіку, науку та соціальну сферу у найближчі десятиліття.

1 РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Розвиток інтернет зв’язку

Першим кроком до революції у сфері телекомунікацій стало створення волоконно-оптичної технології. Близько півстоліття тому (рівно 55 років тому, у 1970 році) вчені компанії Corning — Роберт Маурер та Дональд Кек — здійснили прорив у галузі оптичних матеріалів. У результаті тривалих досліджень вони розробили оптичне волокно з рекордно низьким рівнем затухання, який на початковому етапі становив близько 16 дБ/км. Уже через декілька років цей показник вдалося знизити до 4 дБ/км, що стало основою для практичного застосування оптоволокна у сфері передачі інформації.

Спершу новітні розробки використовувалися переважно у військових цілях, адже саме армія потребувала надійних і захищених каналів зв’язку. Однак згодом технологія вийшла за межі військової інфраструктури та була інтегрована у цивільні телекомунікаційні системи. Саме цей перехід став відправною точкою для глобального поширення волоконно-оптичних ліній зв’язку, які поступово витіснили традиційні мідні кабелі завдяки значно вищій пропускній здатності та мінімальним втратам сигналу на великі відстані.

Не менш важливою віхою розвитку інформаційних технологій стало створення стандарту Ethernet у 1973 році, що відкрило можливості для побудови локальних обчислювальних мереж (LAN). Ця технологія забезпечила ефективний спосіб обміну даними між комп’ютерами в межах обмеженої території — офісу, кампусу чи підприємства. З появою Ethernet почалося формування нової ери цифрової комунікації, яка заклала підґрунтя для подальшого розвитку мережевих архітектур, протоколів і глобальної інтеграції телекомунікаційних систем.

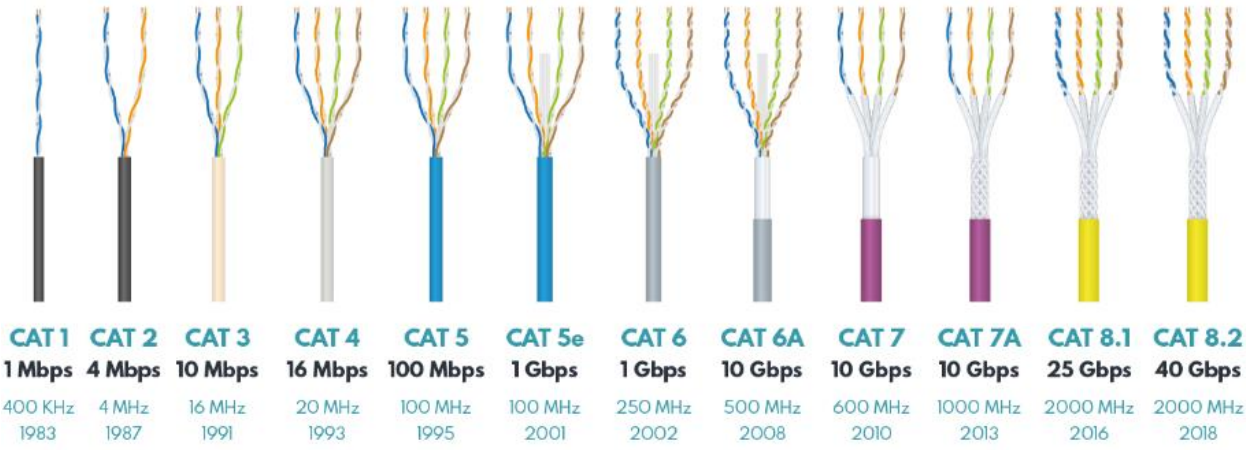


Рис. 1.1 Розвиток Ethernet

Перші практичні реалізації технології Ethernet були створені у 1973 році в дослідницькому центрі Xerox Palo Alto Research Center (PARC). Над проєктом працювали Роберт Меткалф та Девід Боггс, які заклали основи формування одного з найважливіших стандартів комп'ютерних мереж. Початковий варіант використовував тонкий коаксіальний кабель, що відповідав вимогам специфікації 10BASE2. Така конструкція забезпечувала передачу даних у локальних обчислювальних мережах із відносно низькою собівартістю та прийнятними параметрами надійності. Цей етап став відправною точкою для подальшої еволюції Ethernet та його поширення в цивільних і промислових системах.

У той самий час, наприкінці 1970-х та на початку 1980-х років, було представлено стандарт MIL-STD-1553, який відігравав роль попередника Ethernet у сфері аерокосмічної та оборонної промисловості. Він базувався на використанні подвійної резервованої лінії з витої пари для обміну даними між бортовими системами авіоніки. Такий підхід забезпечував підвищену відмовостійкість і безперервність функціонування, що було критично важливим для військових і космічних застосувань.

З розвитком авіаційних і космічних технологій потреба у збільшенні пропускної здатності каналів зв'язку та підвищенні швидкості передавання даних ставала дедалі більш актуальною. Ethernet, завдяки гнучкості стандартів і можливості масштабування, поступово витіснив попередні рішення та

перетворився на ключову технологію не лише у комерційних і корпоративних мережах, але й у високотехнологічних галузях.

На сучасному етапі Ethernet досяг надзвичайних показників розвитку: від перших мегабітних швидкостей він еволюціонував до систем, здатних функціонувати з пропускними можливостями у десятки та сотні гігабіт за секунду. Це робить його базовою інфраструктурною технологією, яка вдало інтегрується навіть у космічні та оборонні проєкти, де вимоги до надійності й ефективності є максимально високими.

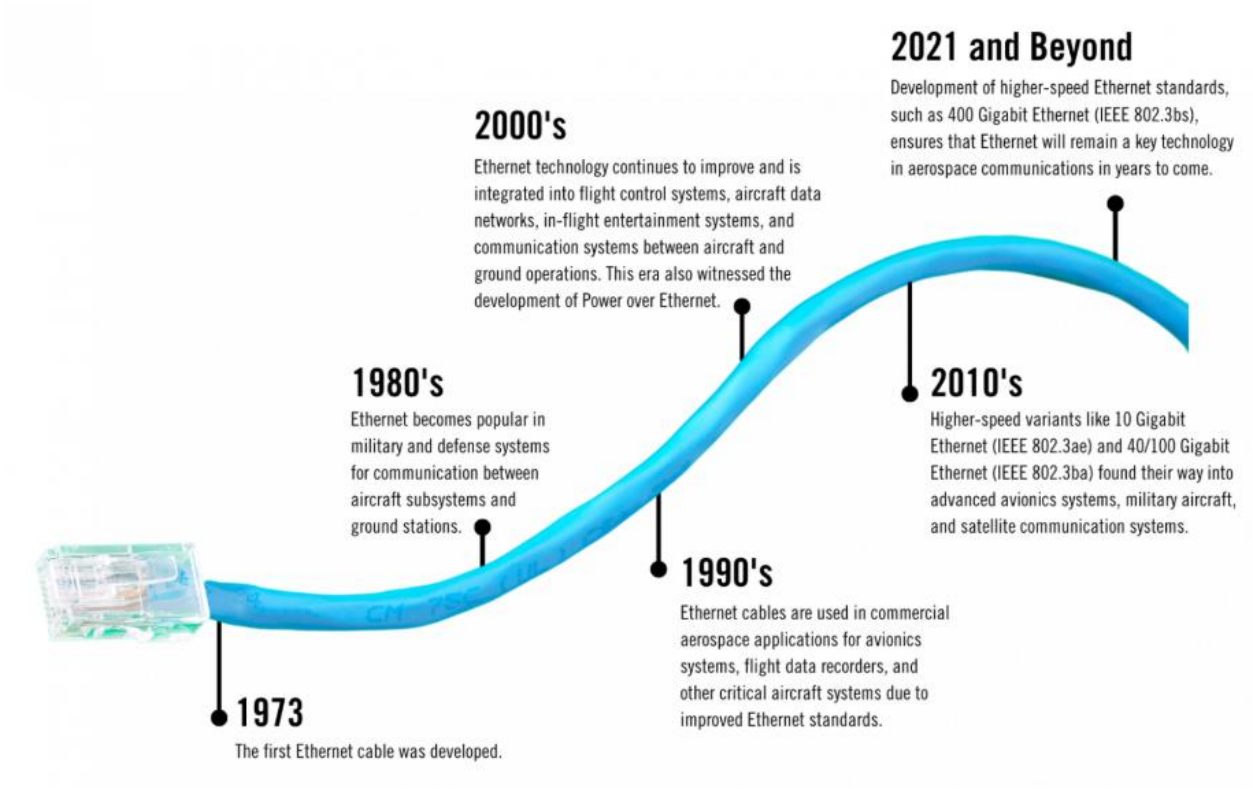


Рис. 1.2 Розвиток кабелів Ethernet

1.2 Розвиток G стандартів

Покоління 1G

Перше покоління мобільного зв’язку було суто аналоговим і мало низку обмежень, які сьогодні виглядають критичними. Технології AMPS, NMT та TACS реалізовували принцип множинного доступу з розділенням каналів за частотою (FDMA), коли кожному абоненту виділялася окрема вузька смуга спектра. Це

робило мережі мало масштабованими, адже додавання нових користувачів вимагало все більшої кількості частот.

Головною особливістю 1G була відсутність цифрової обробки сигналів: мовний сигнал передавався безпосередньо у вигляді аналогової хвилі. Це зумовлювало низьку якість зв'язку — у розмовах часто спостерігалися шуми, перешкоди та обриви. Телефонні апарати були громіздкими, з великою антеною та масивними акумуляторами. Фактично вони нагадували портативні радіостанції. Шифрування не застосовувалося, що робило розмови абсолютно відкритими для прослуховування.

Швидкість передавання становила лише близько 2,4 кбіт/с, що вистачало виключно для голосових дзвінків. Будь-яка передача даних у такій архітектурі була неможливою. Попри це, саме 1G довів, що мобільний телефон може стати практичним засобом комунікації. Це покоління було радше демонстрацією потенціалу технології, ніж повноцінною масовою інфраструктурою.

Покоління 2G

Друге покоління стало якісним стрибком, адже відбувся перехід від аналогових до цифрових технологій. Стандарти GSM, CDMAOne та D-AMPS запровадили використання цифрових кодеків, які стискали мовний сигнал і передавали його у вигляді бітових потоків. Це одразу дало кілька переваг:

- зменшення кількості помилок та підвищення чіткості голосу;
- використання алгоритмів шифрування, які забезпечили базовий рівень захисту;
- підвищення ефективності використання спектра завдяки мультиплексуванню;
- збільшення ємності базових станцій, що дозволило обслуговувати більше абонентів.

Початкові швидкості 2G становили 9–14 кбіт/с, але впровадження GPRS підняло цей показник до приблизно 144 кбіт/с, а EDGE — до 384 кбіт/с. Це означало народження мобільного інтернету. З'явилися SMS і MMS, які швидко стали

масовим засобом комунікації. З'явилися перші прості мобільні сервіси — WAP, завантаження рингтонів, доступ до коротких номерів.

Для операторів 2G стало справжньою революцією: зросла масштабованість мереж, з'явилися механізми роумінгу між країнами, а також економічно ефективні моделі розгортання інфраструктури. Якщо 1G можна вважати етапом «експериментального» мобільного зв'язку, то 2G перетворив його на масову технологію, доступну мільйонам користувачів.

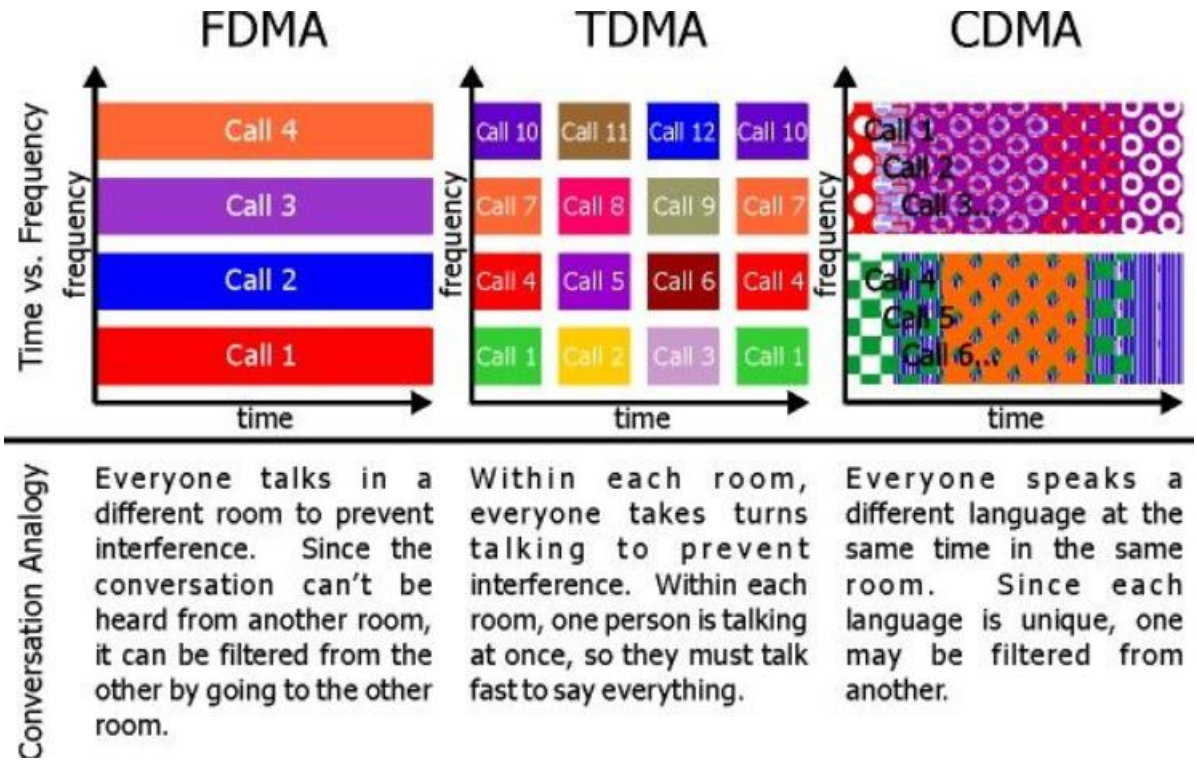


Рис. 1.3 Розвиток технологій FDMA, TDMA та CMDA

Покоління 3G

Третє покоління знаменувало перехід до справжніх широкосмугових мобільних технологій. Завдяки стандартам UMTS, CDMA2000 та HSPA з'явилася можливість передавати дані на швидкостях у мегабіти за секунду. Уперше мобільні мережі почали підтримувати сервіси, які раніше були доступні лише у фіксованих мережах:

- мобільний доступ до веб-сайтів та електронної пошти;
- потокове відтворення аудіо та відео;
- мобільні відеодзвінки;

- інтеграція з корпоративними системами.

Технологічною основою 3G стала ширша смуга радіоканалів та впровадження більш складних методів модуляції (QPSK, 16QAM), що забезпечило значно вищу спектральну ефективність. Крім того, у мережах 3G застосовувалися вдосконалені механізми корекції помилок та управління ресурсами радіоінтерфейсу.

Для користувачів це покоління означало по-справжньому «мобільний інтернет». Смартфони набули нових функцій: завантаження програм, обмін мультимедійним контентом, доступ до онлайн-ігор. 3G також заклало основу для формування нових економічних моделей — ринок мобільних додатків і мобільних сервісів почав активно розвиватися.

Покоління 4G

Четверте покоління можна вважати переломним моментом, адже саме воно перетворило мобільний зв’язок на основу сучасної цифрової інфраструктури. Ключовим стандартом став LTE, який повністю відмовився від комутації каналів і перейшов до пакетної архітектури на основі IP. Це означало, що навіть голосові виклики передавалися у вигляді IP-пакетів, що дало змогу різко підвищити ефективність.

4G забезпечив швидкості у десятки мегабіт за секунду та знизив затримку до рівня, достатнього для потокового відео високої чіткості, онлайн-ігор, хмарних сервісів та інтерактивних застосунків. Основні технічні новації включали:

- використання OFDMA (ортогонального частотного мультиплексування), яке дозволило гнучко розподіляти спектр між користувачами;
- застосування багатопроменевих антенних систем MIMO, що підвищили стійкість сигналу та пропускну здатність;
- адаптивну модуляцію та кодування, які автоматично підлаштовували якість каналу залежно від умов поширення сигналу.

На цьому етапі смартфони стали повноцінними комп’ютерами з доступом до соціальних мереж, мультимедійних сервісів та професійних застосунків. 4G фактично інтегрував мобільний зв’язок з інтернетом і заклав основу для

інноваційних цифрових сервісів — від мобільного банкінгу до інтернет-телебачення.

Покоління 5G

П’яте покоління стало новим етапом, що орієнтується не лише на швидкість, але й на низьку затримку, масштабованість і універсальність. Використання надширокихсмуг спектра, включно з міліметровими діапазонами, дозволяє досягати швидкостей у десятки гігабіт за секунду. Затримка знижена до рівня мілісекунд, що робить можливими сервіси реального часу.

5G включає три основні напрямки:

- eMBB (enhanced Mobile Broadband) — надшвидкий мобільний інтернет;
- mMTC (massive Machine-Type Communications) — підтримка мільярдів пристроїв IoT;
- URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications) — сервіси з гарантованою якістю для критичних застосувань (медицина, транспорт, промисловість).

Технології масивного MIMO, сегментації мережі (network slicing) та віртуалізації функцій дозволяють створювати мережі з різними параметрами для різних сценаріїв використання. Це означає, що одна й та сама інфраструктура може обслуговувати і потокове відео, і автономні транспортні засоби, і сенсорні системи «розумних міст».

Таким чином, 5G та 6G перетворює мобільний зв’язок на універсальну платформу для цифрової економіки, де мобільна мережа стає не лише засобом доступу до інтернету, а й інфраструктурою для розвитку штучного інтелекту, автоматизації виробництва, медицини нового рівня та інших ключових сфер.

1.3 Поетапний розвиток

Трансформації 2000-х

Період 2000-х років можна вважати відправною точкою для масової цифрової революції, оскільки саме тоді відбувся перехід від вузькосмугових комутованих

каналів до широкосмугового доступу, який став доступним мільйонам домогосподарств. У цей час формувалося нове інформаційне суспільство, а телекомунікації перетворювалися з допоміжної технології на базову інфраструктуру сучасного життя.

1. Технологічний контекст.

Ранні 2000-ті асоціюються із комутованим доступом у мережу на швидкостях до 56 кбіт/с, який забезпечувався за допомогою аналогових модемів. Такий доступ блокував телефонну лінію, був повільним і ненадійним. Проте він створив фундамент для переходу до технологій нового рівня. Масове впровадження ADSL змінило ситуацію: користувачі отримали можливість постійного доступу до інтернету з початковими швидкостями до 1–2 Мбіт/с, що у десятки разів перевищувало попередні показники.

2. Масове поширення широкосмугового інтернету.

У країнах Західної Європи та Азії розпочалося стрімке підключення домогосподарств. ADSL та ADSL2+ забезпечували швидкість до 24 Мбіт/с, а технології VDSL/VDSL2 дозволяли отримувати понад 50 Мбіт/с на коротких відстанях. Мідна інфраструктура почала досягати фізичних обмежень, тому оператори поступово інтегрували оптоволоконні рішення у магістральні сегменти та архітектури типу FTTx. У Японії масове впровадження ADSL призвело до справжнього технологічного буму: мільйони абонентів отримали доступ до швидкого інтернету за невисокою ціною, що створило новий стандарт очікувань для ринку.

3. Нові сервіси для користувачів.

Завдяки постійному з’єднанню інтернет перестав бути розкішшю і став щоденним інструментом. З’явилися нові сервіси, які формували цифрову екосистему:

- Інтернет-банкінг, який радикально змінив фінансову сферу.
- Перші соціальні мережі (Friendster, MySpace, пізніше Facebook), що заклали основу нової форми комунікацій.
- YouTube, який започаткував епоху масового відеоконтенту.

- Skype, що зробив VoIP-телефонію доступною для масового користувача.
- Технології обміну файлами (BitTorrent), які змінили підхід до розповсюдження мультимедіа.

4. Трансформація інфраструктури операторів.

Для телекомунікаційних компаній 2000-ті стали етапом радикальної модернізації. Магістральні мережі поступово переходили на оптичні системи, здатні забезпечувати сотні мегабіт і навіть гігабіт на секунду. У доступових мережах мідь залишалася домінуючою, проте з обмеженням у вигляді затухання сигналу. Це стимулювало розгортання оптичних рішень «останньої милі».

У сфері обчислювальних ресурсів відбувся перехід від невеликих серверних кімнат до спеціалізованих дата-центрів. Виникли модульні та контейнерні рішення, що дозволяли гнучко масштабувати інфраструктуру. Одним із ключових нововведень стала віртуалізація: VMware ESX започаткувала нову епоху управління ресурсами. Це дало змогу ефективніше використовувати обладнання та знизити витрати.

5. Початок хмарної ери.

Поява перших хмарних сервісів (AWS, Salesforce, Google Cloud) заклала основу для IaaS, PaaS і SaaS. Гіпермасштабовані дата-центри почали будуватися з урахуванням економічності, швидкості та масштабованості. Саме у цей час сформувалися моделі, які сьогодні визначають хмарні технології.

6. Орієнтація на енергоефективність.

Наприкінці десятиліття увага почала приділятися енергоефективності ЦОДів. Було впроваджено показник PUE (Power Usage Effectiveness), що став стандартом для оцінки ефективності використання електроенергії у дата-центрах. Це стало початком ери «зелених» IT.

Десятиліття 2010-х

Наступне десятиліття стало часом, коли цифрові технології остаточно інтегрувалися у життя суспільства. Якщо у 2000-х інтернет був переважно інструментом для роботи та навчання, то у 2010-х він перетворився на універсальне середовище для спілкування, розваг, бізнесу і науки.

1. Для користувачів.

У 2010-х роках смартфон став головним персональним пристроєм. Завдяки розвитку мобільних операційних систем (iOS, Android) і магазинів додатків користувачі отримали доступ до тисяч застосунків. Відбулася міграція більшості сервісів у мобільний формат.

Стримінгові платформи змінили модель споживання контенту: YouTube, Netflix, Spotify, Twitch стали частиною повсякденності. Парадигма «володіння» медіа змінилася на парадигму «підписки», що вплинуло на індустрію музики, кіно, телебачення і культури загалом.

Мобільний інтернет четвертого покоління (LTE Advanced, WiMAX 2) забезпечив швидкості, які дозволили використовувати смартфон як повноцінний комп'ютер.

2. Для операторів.

У цей час почалася нова хвиля розвитку інфраструктури. З'явилися гіпермасштабовані дата-центри від Amazon, Google, Microsoft, Alibaba із потужністю понад 100 МВт. Це дало можливість обробляти колосальні обсяги даних і забезпечувати роботу глобальних хмарних платформ.

Ключовим нововведенням стала контейнеризація: Docker і Kubernetes перетворили дата-центри з фізичних інсталяцій на гнучкі програмно-керовані платформи. Це дозволило ефективніше управляти навантаженням, швидше розгортати сервіси та масштабувати їх.

Активно розвивалася концепція Edge Computing — перенесення обчислень ближче до користувачів. Це стало основою для CDN, MEC у 5G і розвитку IoT.

3. Еволюція мережевих технологій.

Почало поширюватися використання 100Gbps Ethernet у магістралях. У дата-центрах стандартом стало 10GbE.

Коаксіальні рішення майже зникли, зберігшись лише у телебаченні, тоді як кабельні оператори перейшли на DOCSIS 3.1.

Широко впроваджувалися SDN (Software Defined Networking) та NFV (Network Function Virtualization), які зробили управління мережею гнучким і програмованим.

MPLS залишався стандартом магістральних мереж, але його активно доповнювали EVPN/VXLAN, що масово впроваджувалися у дата-центрах.

IPv6 нарешті став мейнстрімом і почав активно використовуватися у провайдерських мережах.

4. Безпека і надійність.

Зросли вимоги до SLA і відмовостійкості. Стандарти Uptime Tier III та IV почали активно реалізовуватися на практиці, забезпечуючи рівень доступності до 99,999 %. Це стало критично важливим для бізнесу, який дедалі більше залежав від безперервного функціонування мережевих і серверних систем.

Для операторів зв’язку цей період характеризувався появою нової хвилі гіпермасштабних дата-центрів від Amazon, Google та Microsoft потужність яких перевищувала 100 МВт.

- З розвитком контейнеризації (Docker з 2013 року) та Kubernetes (2014) дата-центри почали розглядатися не як місце для розміщення обладнання, а як універсальна платформа.
- Поширилася концепція Edge Computing, яка передбачала перенесення обчислень ближче до кінцевого користувача — через CDN, 5G MEC та регіональні вузли.
- Мережеві технології стрімко еволюціонували: з 2011 року у магістралях почав застосовуватися 100Gbps Ethernet, а у дата-центрах відбувся перехід на 10GbE.
- Коаксіал поступово втрачав актуальність і залишився лише в сегменті традиційного телебачення, тоді як кабельний інтернет перейшов на DOCSIS 3.1.
- Широкого поширення набули SDN (Software Defined Networking) та NFV (Network Function Virtualization), завдяки чому управління мережею стало програмованим.

- Архітектура мереж також зазнала змін: MPLS зберігався як стандарт магістральних рішень, проте його активно доповнювали EVPN/VXLAN (спершу у промислових впровадженнях 2014–2016 років, а згодом у масовій експлуатації в дата-центрах).
- IPv6 поступово увійшов у мейнстрім.
- Відбувся суттєвий прорив у сфері безпеки та відмовостійкості: стандарти надійності дата-центрів Uptime Tier III та IV (SLA до 99,999 %), які раніше існували лише формально, почали активно застосовуватися на практиці з 2010 та 2015 років відповідно.

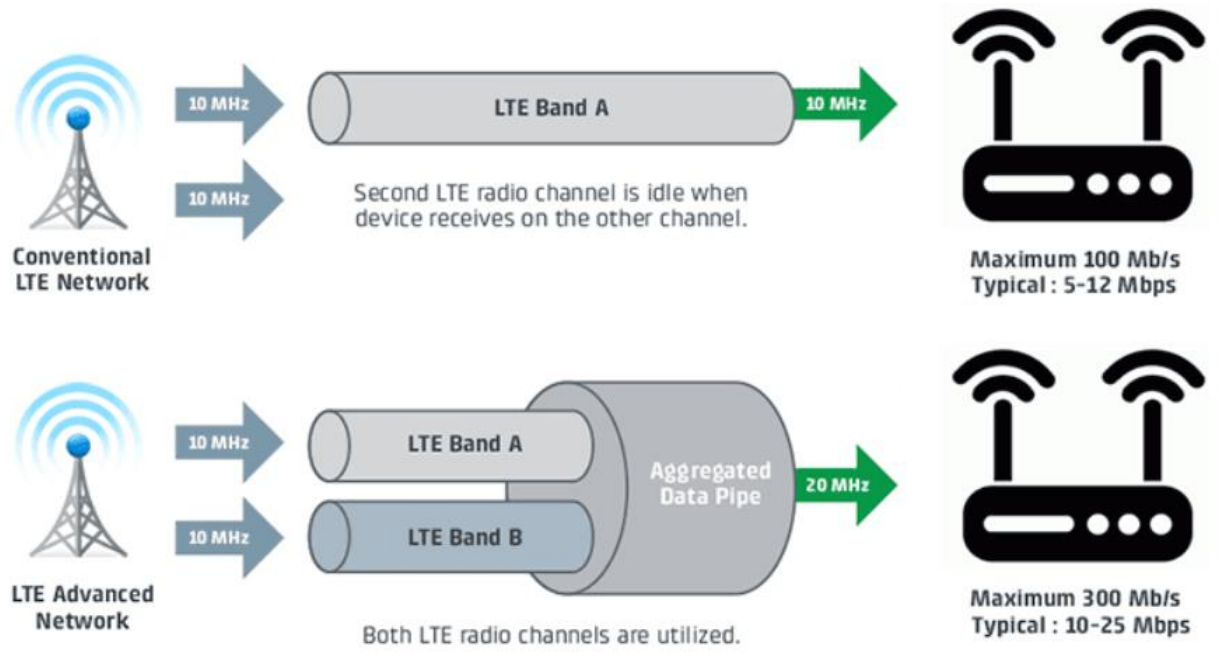


Рис. 1.4 Схематичне зображення розвитку мережевих технологій

Таким чином, десятиліття 2000-х заклало фундамент для цифрової економіки, забезпечивши масовий доступ до широкосмугового інтернету, розвиток оптичних і мобільних технологій, появу хмарних сервісів. Десятиліття 2010-х стало етапом інтеграції цифрових рішень у повсякденне життя, поширення смартфонів, стрімінгових платформ, програмно-керованих мереж і гіпермасштабованих дата-центрів. Ці два періоди сформували сучасний вигляд глобальної телекомунікаційної інфраструктури та створили умови для впровадження 5G і подальшого розвитку 6G.

2 РОЗВИТОК СТАНДАРТІВ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ НА ПРИКЛАДІ 6G

2.1 Системи зв'язку нашого часу

Стан та перспективи впровадження 5G у Європі та світі

Попри суттєві зусилля операторів і виробників обладнання, впровадження 5G у Європі розгортається повільніше, ніж прогнозувалося на початкових етапах. Хоча технологія офіційно стандартизована та доступна для використання, її поширення поки що обмежене насамперед великими містами, промисловими зонами та транспортними коридорами. Це пов'язано з низкою технічних, фінансових і регуляторних бар'єрів.

Технічні аспекти

Основна проблема полягає у спектрі. 5G в усьому світі розгортається у кількох діапазонах:

- Sub-6 GHz (C-діапазон 3,4–3,8 ГГц): найбільш поширений і оптимальний для поєднання покриття та пропускної здатності;
- Міліметрові хвилі (24–40 ГГц): забезпечують надвисоку швидкість, але мають малий радіус дії та вимагають густої інфраструктури базових станцій;
- Нижчі частоти (700–800 МГц): підходять для широкого покриття у сільських регіонах, але не забезпечують високої пропускної здатності.

У європейському контексті C-діапазон є базовим для впровадження, проте його перерозподіл супроводжується труднощами. Частина частот використовується супутниковими службами та військовими системами. Ліцензування вимагає рішень на рівні міждержавних органів і потребує часу. Водночас оператори стикаються з технічними викликами при переході до міліметрових діапазонів — необхідністю встановлення тисяч нових малопотужних базових станцій у містах.

Економічні виклики

Фінансова складова є визначальною. За підрахунками провідних європейських консалтингових компаній, для повного розгортання 5G в масштабах середньої країни потрібно інвестувати десятки мільярдів євро. У великих

мегаполісах вартість впровадження сягає сотень мільярдів гривневого еквіваленту. При цьому прогнозована окупність становить 20–30 років. Це викликає закономірні побоювання серед операторів, адже за такого горизонту інвестицій існує ризик низької рентабельності.

Навіть у країнах із розвиненою економікою зростання доходів від нових послуг відбувається повільніше, ніж очікувалося. Користувачі в основному сприймають 5G як «швидший інтернет», тоді як додаткові сервіси (AR/VR, масовий IoT, хмарні ігри, дистанційна медицина) лише починають впроваджуватися.

Інфраструктурні трансформації

- Впровадження 5G потребує радикальної перебудови всієї телекомунікаційної інфраструктури. Для повноцінної роботи мережі необхідні:
- оптоволоконні магістралі високої пропускної здатності, які з’єднують базові станції та ядро мережі;
- щільне розгортання малих сот, особливо у великих містах, що підвищує витрати на будівництво та обслуговування;
- системи віртуалізації та хмарної оркестрації (NFV, SDN), які дозволяють управляти ресурсами гнучко та програмно;
- технологія network slicing, яка створює віртуальні сегменти мережі для різних сценаріїв — від потокового відео до керування транспортом.

Соціально-економічні наслідки

Очікується, що 5G стане базовою технологією для цифрової економіки. Вона відкриває нові можливості у таких сферах, як:

- автономний транспорт (зв’язок між автомобілями, інтелектуальне керування дорожнім рухом);
- розумні міста (керування інфраструктурою в режимі реального часу);
- телемедицина (операції та консультації на відстані завдяки наднизьким затримкам);
- промисловий інтернет речей (IIoT) (автоматизація виробництва, роботизовані системи);

- освіта та наука (VR/AR, віддалені лабораторії, інтегровані навчальні платформи).

Проте масштабне впровадження стримується високою вартістю інфраструктури та відсутністю готових бізнес-моделей, які б забезпечили швидку окупність.

Перспективи 6G

Станом на 2025 рік 6G перебуває на концептуальному етапі. Міжнародні дослідницькі організації, університети та галузеві альянси (наприклад, 6G Flagship у Фінляндії, Next G Alliance у США, окремі програми ЄС і Японії) працюють над формуванням вимог до нового стандарту.

Офіційних специфікацій поки немає. Очікується, що до 2030 року відбудеться перший етап стандартизації, після чого почнеться створення дослідних прототипів обладнання.

Очікувані можливості

Попри ранній етап, у наукових і популярних публікаціях активно обговорюються потенційні можливості 6G:

- терабітні швидкості (~1 Тбіт/с);
- наднизька затримка (<0,1 мс), що відкриє шлях до повноцінних систем реального часу;
- штучний інтелект у керуванні мережею, що забезпечить автоматизацію та самовідновлення;
- терагерцовий діапазон частот для обслуговування величезних обсягів даних;
- голографічний зв’язок і цифрові двійники для індустрії, науки та освіти;
- синергія з квантовими мережами та інтеграція з AI-системами.

Виклики

Реалізація подібних можливостей потребуватиме повної перебудови інфраструктури зв’язку. Використання терагерцових частот вимагатиме принципово нових матеріалів для антен та елементів обладнання, оскільки ці хвилі мають високе затухання. Крім того, необхідна буде глибока інтеграція з квантовими та AI-системами, що потребує величезних інвестицій.

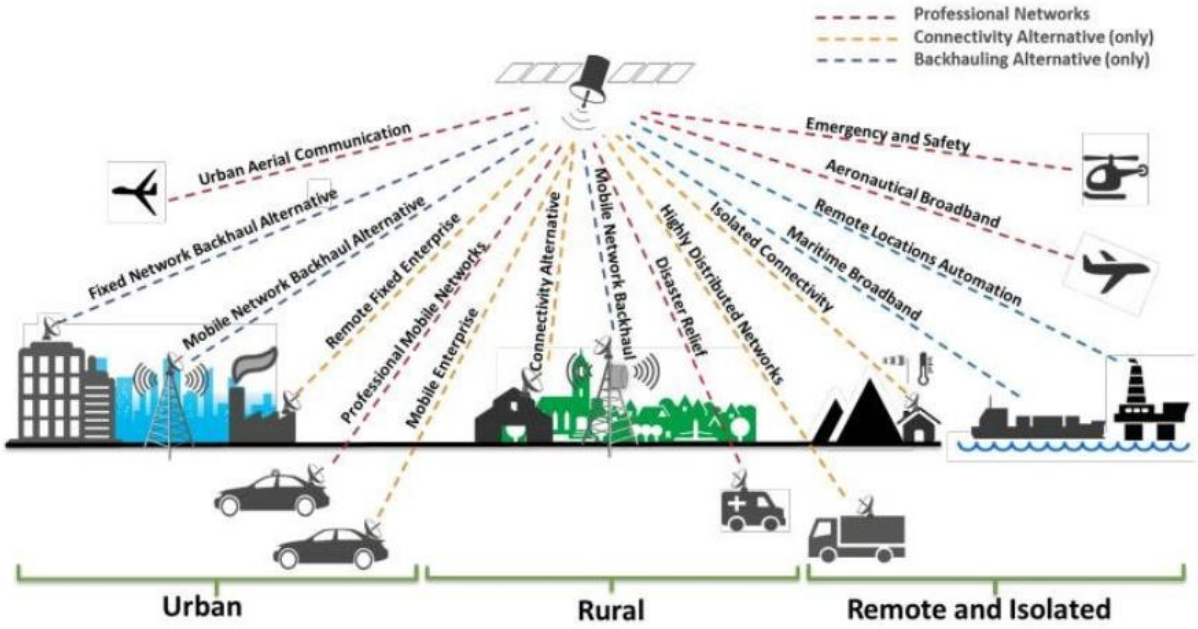


Рис. 2.1 Глобальні інтернетні послуги

Очікується, що масове впровадження 6G стане можливим не раніше середини 2040-х років, тоді як у 2030-х воно залишатиметься на рівні експериментів і обмежених тестових зон.

Технологія 5G є важливим кроком у розвитку мобільних мереж, однак її впровадження у Європі та світі зіштовхується з технічними, економічними та інфраструктурними бар'єрами. Вона вже відкриває нові можливості для цифрової економіки, але вимагає масштабних інвестицій. 6G, у свою чергу, обіцяє ще радикальніші зміни, проте на практичному рівні залишатиметься концепцією протягом наступних десятиліть.

2.2 Розробка та план впровадження 6G

Передусім слід зазначити, що станом на сьогодні технологія мобільного зв'язку **6G** ще не існує у комерційному чи навіть завершеному нормативному вигляді. Її розробка перебуває на етапі концептуального планування й стандартизації в рамках діяльності міжнародного комітету **3GPP** (3rd Generation Partnership Project). Попередній план виглядає наступним чином:

- **2023 рік.**

На цьому етапі робота над стандартом 6G офіційно ще не розпочалася. Комітет 3GPP зосереджував зусилля на подальшій еволюції мереж п’ятого покоління. Було завершено низку релізів системи 5G, де уточнювалися технічні вимоги до архітектури, механізмів спектральної ефективності, методів віртуалізації та інтеграції інтернету речей. Цей рік став перехідним етапом, коли закладалися концептуальні підвалини для майбутньої роботи з 6G.

- **2024 рік.**

  Розпочалися попередні обговорення основних вимог і ключових показників ефективності майбутніх систем зв’язку. На цьому етапі формулювалися перші технічні орієнтири: пропускна здатність у терабітному діапазоні, затримки менше ніж 0,1 мс, використання терагерцових частот, масштабна підтримка інтернету речей, інтеграція штучного інтелекту для управління мережею. Фактично йшлося про створення базових сценаріїв використання 6G, які надалі стануть орієнтиром для виробників обладнання.

- **2025 рік.**

  На цьому етапі триває аналіз можливих технічних рішень, які можуть увійти до майбутньої специфікації. Серед них розглядаються:

  - застосування масивних антенних решіток у терагерцовому діапазоні;
  - використання технологій голографічного зв’язку та цифрових двійників;
  - поєднання 6G із квантовими мережами та системами штучного інтелекту;
  - нові підходи до архітектури мережі, зокрема глобальна інтеграція edge-computing і повсюдне network slicing.

    Це етап теоретичних досліджень, пілотних моделей та лабораторних експериментів.

- **2027 рік.**

  Саме в цей час планується фактичний початок нормативної роботи над специфікаціями 6G. 3GPP разом з іншими міжнародними організаціями (ITU,

ETSI, IEEE) мають формалізувати набір технічних вимог. Ці вимоги стануть базою для початку розробки обладнання, здатного відповідати новим стандартам. Цей період стане визначальним для уніфікації глобального бачення технології та уникнення фрагментації ринку.

- **2028 рік.**

  Очікується публікація першого релізу систем шостого покоління. Він буде радше стартовим, ніж остаточним, і включатиме базові специфікації для основних сценаріїв використання: надшвидкий мобільний інтернет, масовий інтернет речей, а також сервіси з наднизькою затримкою. Поява цього релізу відкриє шлях для виробників до створення перших дослідних зразків обладнання та запуску експериментальних мереж у масштабах окремих регіонів чи міст.

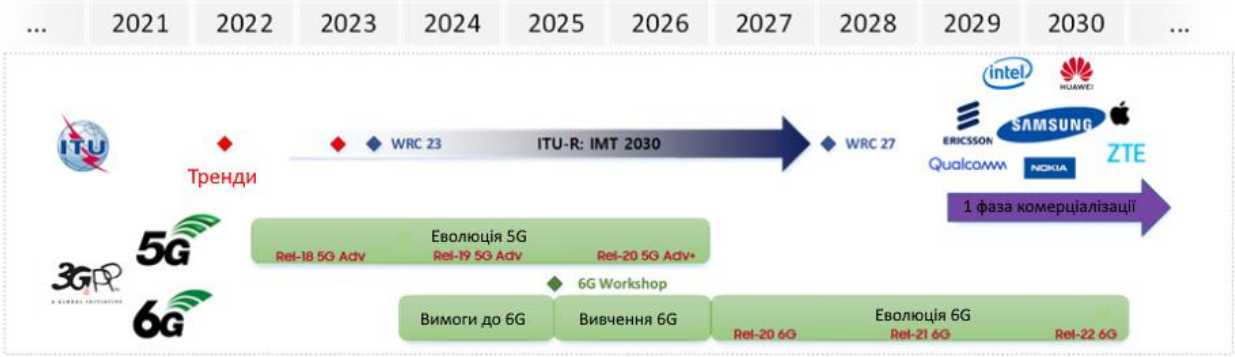


Рис. 2.2 Еволюція G стандартів

Якщо відраховувати часовий інтервал від моменту появи першого релізу системи зв’язку п’ятого покоління у 2017 році й до запланованого виходу першого офіційного релізу 6G у 2028 році, то можна побачити закономірний приблизно десятирічний цикл появи нового покоління мобільних технологій. Така періодичність є цілком природною для телекомунікаційної сфери: з одного боку, вона відображає швидкість науково-технічного прогресу, а з іншого — час, необхідний для проведення масштабних досліджень, розробки специфікацій, тестування обладнання та поступового впровадження у реальні мережі.

Сьогодні ми перебуваємо на початковому етапі формування технології шостого покоління. Хоча остаточних специфікацій ще не існує, уже зараз провідні компанії галузі — виробники обладнання, оператори зв’язку, постачальники

програмних рішень — активно представляють власні концепції та бачення того, якими функціями має володіти 6G. Вони пропонують сценарії застосування, прогнозують ключові характеристики (швидкості на рівні терабіт за секунду, затримки в межах мікросекунд, інтеграцію з терагерцовим діапазоном, штучним інтелектом і квантовими технологіями), а також розробляють дорожні карти для комерційного використання. Це свідчить про те, що, попри відсутність готових стандартів, ринок заздалегідь готується до масштабної трансформації.

Надзвичайно важливу роль у цьому процесі відіграє Міжнародний союз електрозв'язку (ITU, MCE) — організація, створена в межах системи ООН. Її завдання виходять далеко за межі простого технічного регулювання. Серед ключових функцій ITU:

- глобальне узгодження питань розподілу спектра для різних систем мобільного зв'язку;
- формування базових вимог до систем наступних поколінь;
- визначення ключових показників ефективності (KPI), які мережа повинна забезпечити, щоб отримати статус нового покоління;
- розробка методологій тестування й перевірки відповідності обладнання та технологій цим вимогам.

Фактично саме ITU має повноваження визначати, чи відповідає нова технологія критеріям певного покоління. Наприклад, саме ця організація офіційно визнала LTE-Advanced і WiMAX 2 стандартами четвертого покоління (4G), сформулювала вимоги для 5G (IMT-2020), а у найближчі роки ухвалюватиме рішення щодо систем 6G. Тобто без відповідних рішень ITU навіть найсучасніші технологічні розробки не можуть бути формально класифіковані як 6G.

Слід підкреслити, що значення ITU полягає не лише у технічній стандартизації. Це також майданчик для глобального діалогу між державами, операторами та виробниками. Розподіл частотного ресурсу, що є обмеженим і надзвичайно цінним, вимагає узгоджених рішень на світовому рівні. Без міжнародної координації існував би ризик фрагментації ринку, несумісності обладнання та відсутності єдиного підходу до розвитку технологій.

Таким чином, інтервал у десять років між появою 5G і прогнозованим першим релізом 6G не є випадковим, а є результатом складного поєднання науково-технічного прогресу, потреб ринку й діяльності міжнародних організацій, які забезпечують гармонізований розвиток телекомунікацій у глобальному масштабі. 6G на сучасному етапі — це ще лише набір концепцій, досліджень і попередніх вимог, але вже зараз очевидно, що саме міжнародна співпраця визначить темпи і формат його впровадження у найближчі десятиліття.

2.3 Вимоги 6G зв’язку

На сучасному етапі стандарти мобільного зв’язку шостого покоління (6G) ще не визначені Міжнародним союзом електрозв’язку (ITU), однак вже сьогодні можна окреслити загальні напрями, у яких формуватимуться майбутні вимоги. Для цього доцільно спиратися на попередній досвід розвитку мобільних систем зв’язку та аналіз вимог, висунутих до попередніх поколінь.

Варто пригадати, що мобільні системи зв’язку третього покоління (3G) проєктувалися відповідно до концепції **IMT-2000**, розробленої ITU. Основним завданням тоді було забезпечення якісного голосового зв’язку при збереженні можливості передавання даних на швидкостях, які на той час вважалися інноваційними, — кілька мегабіт за секунду. Це відкривало шлях до нових сервісів: доступу до мобільного інтернету, мультимедійних повідомлень та відеодзвінків.

Таким чином, 3G стало своєрідним компромісом між традиційною голосовою комунікацією та новими цифровими послугами. Вимоги ITU в межах IMT-2000 визначали ключові показники ефективності (KPI), серед яких були:

- забезпечення надійної передачі голосу з низьким рівнем затримки;
- підтримка мобільності користувачів у широкому діапазоні швидкостей;
- здатність до інтеграції з різними радіоінтерфейсами;
- можливість передавання даних на швидкостях у кілька мегабіт на секунду в умовах масового навантаження.

Якщо розглянути наступні покоління (4G і 5G), можна простежити чітку закономірність: кожне нове покоління формувало вимоги, які суттєво розширювали спектр можливостей попереднього. Наприклад:

- **4G (IMT-Advanced)** зосередилося на передачі даних на швидкостях у десятки і сотні мегабіт за секунду, на переході до повністю пакетної архітектури та інтеграції IP-сервісів.
- **5G (IMT-2020)** уже включало три ключові напрями: eMBB (enhanced Mobile Broadband), URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications) та mMTC (massive Machine-Type Communications), які охоплюють широкий спектр застосувань — від потокового відео й віртуальної реальності до інтернету речей і критично важливих сервісів.

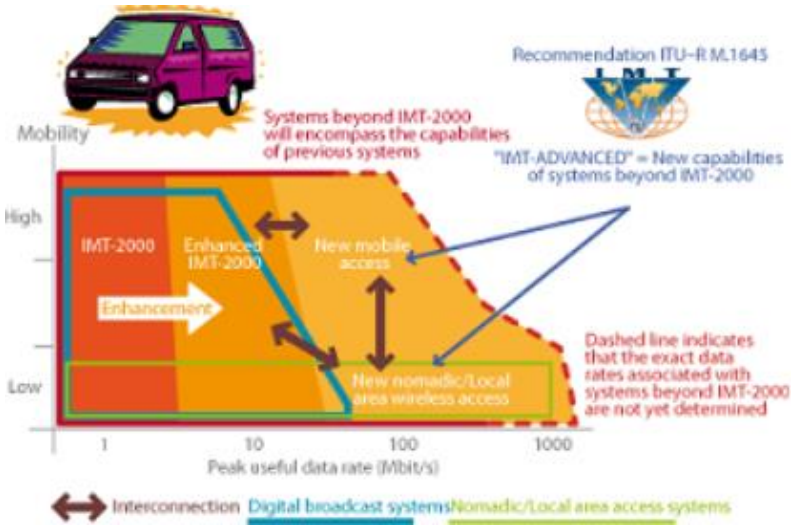


Рис. 2.3 Концепція IMT-Advanced (для 4G) отримала назву The Van Diagram через схожість з автомобілем

Виходячи з цієї логіки розвитку, можна очікувати, що вимоги до системи 6G включатимуть:

- швидкості передавання даних у діапазоні терабіт за секунду;
- затримку на рівні менше ніж 0,1 мс для підтримки сервісів реального часу;
- використання терагерцового діапазону для розширення спектральних можливостей;
- глибоку інтеграцію штучного інтелекту для оптимізації управління мережею;

- підтримку голографічних комунікацій, цифрових двійників та розширеної реальності;
- стійкість і надійність при обслуговуванні мільярдів пристроїв одночасно.

Отже, хоча офіційні вимоги до 6G ще не визначені, аналіз попередніх поколінь дозволяє прогнозувати, що майбутній стандарт орієнтуватиметься на радикальне підвищення ключових параметрів системи: швидкості, затримки, масштабованості, інтелектуалізації управління та інтеграції з новітніми технологіями. Це робить 6G не просто наступником 5G, а фундаментом для цифрової інфраструктури майбутнього.

Минуло приблизно десятиліття від моменту затвердження вимог до систем мобільного зв’язку третього покоління, і на глобальному рівні було сформовано нову концепцію розвитку — IMT-2020. Саме в її рамках розпочалася масштабна робота над створенням стандарту мобільного зв’язку п’ятого покоління. Цей етап став логічним продовженням еволюції від 3G та 4G, але його завдання були значно амбітнішими: передбачалося забезпечити надвисокі швидкості передавання даних, мінімальні затримки, підтримку критично важливих сервісів та масове підключення пристроїв інтернету речей.

У результаті багаторічних досліджень, технічних дискусій і роботи міжнародних організацій з’явилася нова архітектура системи, яка отримала назву 5G New Radio (NR). Перший офіційний реліз цієї специфікації було опубліковано у 2017 році. Він заклав основу для розгортання комерційних мереж 5G і визначив набір ключових технологій, серед яких: використання широких смуг спектра, застосування міліметрових хвиль, масивних антенних систем MIMO, технологій beamforming та повсюдної віртуалізації мережевих функцій.

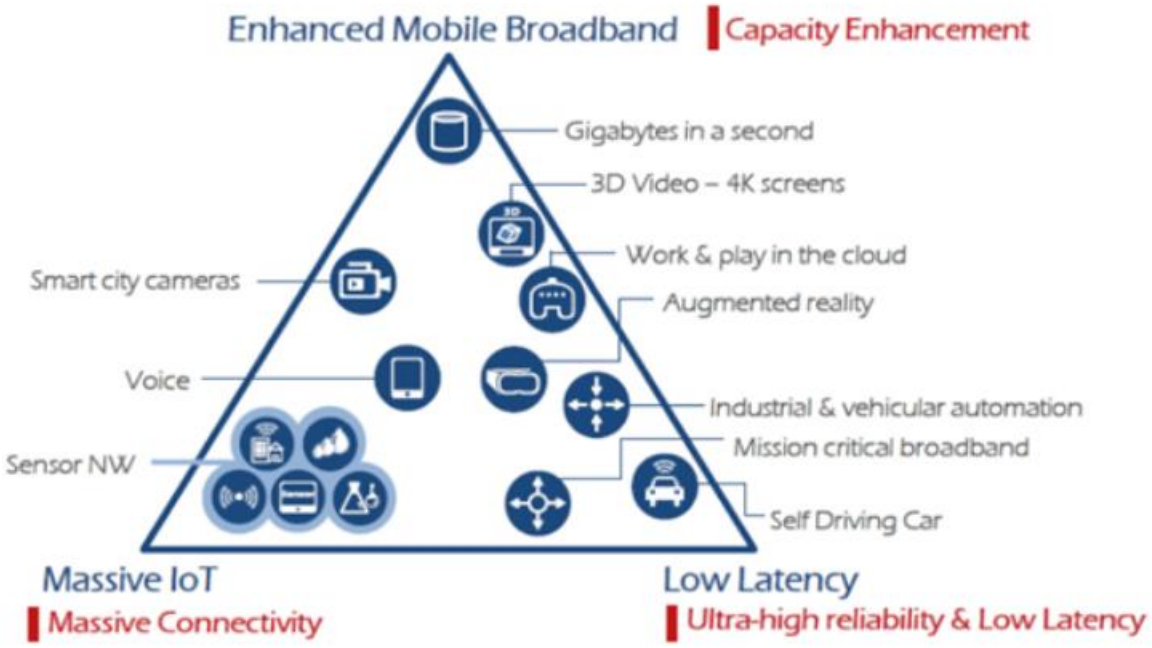


Рис. 2.4 Концепція IMT-2020 для 5G

Розвиток стандартів мобільного зв'язку від покоління до покоління супроводжується зростанням вимог як до швидкісних параметрів системи, так і до її функціональних можливостей. Якщо у 3G ключовим завданням було забезпечення мобільної передачі голосу та базових послуг передачі даних, а у 4G — повноцінна інтеграція IP-мереж із високими швидкостями та мультимедійними сервісами, то у 5G (концепція IMT-2020) спектр вимог значно розширився. Вперше були чітко визначені різні напрями використання, які мали відрізнятися за ключовими показниками ефективності (KPI).

Основні напрями IMT-2020

1. Enhanced Mobile Broadband (eMBB).

   Цей сценарій орієнтований на широкосмуговий мобільний інтернет і мультимедійні сервіси. Вимога — забезпечення швидкості передавання даних у кілька гігабіт за секунду. Це дозволяє підтримувати потокове відео у форматі 4K/8K, використання AR/VR-застосунків, хмарні ігри та інші ресурсоємні сервіси.
2. Massive Machine-Type Communications (mMTC).

Вперше було сформульовано вимогу до масштабного підключення пристроїв Інтернету речей. Для простих сенсорів і пристроїв з низьким енергоспоживанням ключовим показником стала здатність мережі підтримувати до 1 мільйона з'єднань на 1 км². Це критично важливо для «розумних міст», індустріальних систем моніторингу, екологічних сенсорних мереж тощо.

3. Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC).

   Для промислових рішень та критично важливих застосувань (керування виробничими процесами, автономний транспорт, дистанційна медицина) було висунуто вимогу до ультранадійного зв'язку з наднизькою затримкою. Йдеться про ймовірність помилки на фізичному рівні не більше ніж 0,001 % та затримку близько 1 мс. Такі параметри забезпечують можливість віддаленого управління роботизованими системами та обмін даними у режимі реального часу.

Різноманіття пристроїв у мережах 5G

На відміну від попередніх поколінь, 5G було спроєктовано як універсальну платформу, здатну обслуговувати дуже різні типи користувачів і пристроїв: від смартфонів і ноутбуків до промислових сенсорів, безпілотного транспорту та медичного обладнання. Саме ця гнучкість стала ключовою характеристикою мереж п'ятого покоління.

Прогнозовані вимоги для IMT-2030 (6G)

Якщо екстраполювати тенденції розвитку до майбутньої концепції IMT-2030, яку розробляє ITU для систем шостого покоління (6G), можна очікувати суттєвого посилення існуючих параметрів:

- Швидкість передачі даних. Очікується зростання пікових швидкостей у десятки разів порівняно з 5G — до рівня терабіт на секунду, що дозволить обслуговувати нові застосунки, як-от голографічний зв'язок, повноцінна доповнена та віртуальна реальність, інтеграція із системами штучного інтелекту.

- Кількість з’єднань для IoT. Якщо 5G орієнтується на мільйон пристроїв на квадратний кілометр, то 6G передбачатиме ще більшу щільність — до кількох мільйонів пристроїв. Це дасть змогу створювати «гіперщільні» сенсорні мережі для моніторингу довкілля, транспорту, промислових об’єктів.
- Затримка та надійність. У 6G вимоги до URLLC стануть ще жорсткішими: затримка може знизитися до десятків мікросекунд, а рівень надійності передавання даних наблизиться до «п’яти дев’яток» (99,999 %). Це відкриє шлях до повністю автономних транспортних систем і надскладних промислових сценаріїв.
- Інтеграція нових технологій. Очікується, що до переліку вимог увійдуть нові сценарії, яких раніше не було: підтримка голографічних комунікацій, цифрових двійників, взаємодії з квантовими мережами та повномасштабна інтеграція штучного інтелекту у процес управління мережею.

Таким чином, IMT-2020 задало основу для трьох головних напрямів розвитку мобільних систем (eMBB, mMTC, URLLC), які вже сьогодні визначають можливості 5G. Наступна концепція IMT-2030 для 6G, найімовірніше, стане ще масштабнішою: вона поєднає у собі вимоги до екстремально високих швидкостей, мікросекундних затримок, гігантської щільності підключень і повсюдної інтеграції інтелектуальних технологій. Іншими словами, 6G має стати не просто еволюцією 5G, а універсальною платформою, здатною обслуговувати будь-які типи пристроїв у найрізноманітніших умовах та підтримувати сервіси, які нині ще здаються футуристичними.

3 КЛЮЧОВІ ОСОБЛИВОСТІ 6G

3.1 6G з технічної точки зору

На сучасному етапі 6G розглядається радше як сукупність перспективних ідей та технічних концепцій, ніж як завершений стандарт. У науково-технічній спільноті активно обговорюється широкий спектр можливих рішень, які можуть увійти до майбутніх специфікацій. Показовим є приклад досліджень, проведених компанією **SK Telecom** (Південна Корея), яка представила у своїх матеріалах бачення потенційних напрямів розвитку технології шостого покоління.

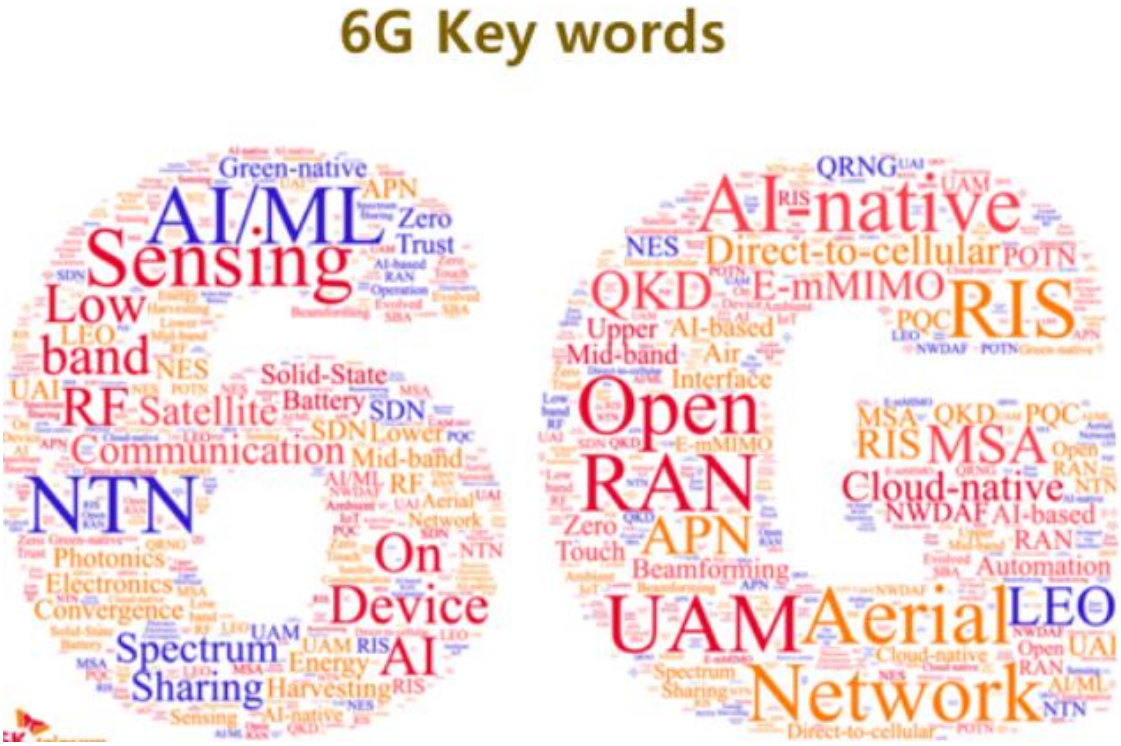


Рис. 3.1 Ключові слова концепції 6G

Потенційні технічні рішення для 6G

1. **Інтеграція штучного інтелекту та нейронних мереж.**

   На відміну від 5G, у якому програмно-керовані мережі (SDN) та віртуалізація функцій (NFV) стали важливим кроком уперед, у 6G передбачається набагато глибша інтеграція технологій штучного інтелекту. Нейронні мережі зможуть забезпечувати автоматизоване керування ресурсами, прогнозування навантажень, адаптивну маршрутизацію та навіть самовідновлення мережі

після збоїв. Це дозволить підвищити ефективність використання спектра та забезпечити високий рівень надійності й гнучкості.

2. **Нові діапазони частот.**

   Одним із ключових напрямів є перехід до використання терагерцового діапазону (100 ГГц – 1 ТГц). Такі частоти відкривають доступ до надширокихсмуг пропускання, що дозволяє досягати пікових швидкостей передавання даних на рівні терабітів за секунду. Проте використання цих частот пов’язане з рядом викликів: високим затуханням сигналу, необхідністю нових матеріалів для антен і розробкою принципово нових схем модуляції.

3. **Інтеграція супутникових систем зв’язку.**

   6G передбачається як універсальна платформа, яка поєднає наземні та космічні сегменти. Завдяки інтеграції з низькоорбітальними супутниковими системами (LEO) можна буде забезпечити глобальне покриття навіть у віддалених районах, океанічних просторах чи малонаселених територіях. Це зробить 6G базовою технологією для реалізації концепції «єдиного глобального інтернету».

4. **Нові типи пристроїв і способів передачі інформації.**

   Якщо 5G уже обслуговує смартфони, IoT-сенсори, промислове обладнання та автономний транспорт, то 6G має підтримувати ще ширший спектр пристроїв. Йдеться про медичні імпланти, мікросенсорні системи для біомоніторингу, роботизовані комплекси нового покоління, а також пристрої, здатні працювати у реальному часі з голографічними зображеннями й цифровими двійниками. Для таких сценаріїв потрібні не лише високі швидкості, а й надзвичайно низькі затримки та гарантована якість сервісу.

5. **Розширена функціональність: точна локалізація та зондування.**

   На відміну від традиційних систем мобільного зв’язку, де основна мета — передавання даних, 6G має включати додаткові функції, пов’язані з позиціонуванням і навігацією. Використання нових методів зондування сигналу дозволить забезпечити точність локалізації об’єктів до сантиметрів або навіть міліметрів. Це відкриє нові можливості для безпілотного

транспорту, «розумних» фабрик, логістики, медицини та військових застосувань.



Рис. 3.2 Спектр можливих технічних рішень в 6G

Таким чином, 6G уявляється як багатовимірна екосистема, у якій поєднуються:

- надвисокі швидкості передавання даних (до терабітів за секунду);
- ультранизькі затримки (менше 0,1 мс);
- гнучка інтеграція наземних і супутникових сегментів;
- масштабна підтримка мільярдів пристроїв різного типу;
- повсюдна присутність штучного інтелекту у керуванні мережею;
- нові можливості, пов’язані з точним позиціонуванням і зондуванням середовища.

Фактично, 6G можна розглядати не просто як еволюцію 5G, а як фундамент для створення універсальної цифрової інфраструктури майбутнього, здатної підтримувати всі види комунікацій — від побутових до глобально-космічних, від

простих сенсорних систем до високотехнологічних квантово-штучноінтелектуальних платформ.

3.2 Дослідження спектрів

Одним із фундаментальних чинників, що визначає еволюцію систем мобільного зв'язку, є ефективне використання радіочастотного спектра. Саме спектр виступає головним ресурсом, від якого залежить пропускна здатність мережі, максимальні швидкості передавання даних та якість обслуговування користувачів. Відомо, що цей ресурс є обмеженим, і тому будь-який перехід до нового покоління технологій супроводжується освоєнням нових діапазонів частот, які у попередніх стандартах залишалися недоступними.

Теоретичні основи пропускної здатності

$$C = B \cdot \log_{\{2\}(1 + SNR)} \quad (3.1)$$

Ще Клод Шеннон сформулював математичний вираз, який визначає максимально можливу пропускну здатність каналу зв'язку. У його формулі враховуються два основні параметри:

- **SNR (Signal-to-Noise Ratio)** — відношення сигнал/шум, яке безпосередньо впливає на здатність системи коректно приймати інформацію в умовах завад;
- **B (Bandwidth)** — смуга пропускання каналу, яка входить у формулу у вигляді лінійного коефіцієнта.

Пропускна здатність визначає верхню межу швидкості передавання даних, яку теоретично можливо досягти в заданих умовах. Згідно з рівнянням Шеннона, підвищення SNR дозволяє збільшувати цю швидкість. Проте у практичних системах цей підхід має обмеження:

- потужність передавача не можна довільно збільшувати через технічні й регуляторні обмеження;
- поширення сигналу у реальних умовах супроводжується загасанням, багатопроменевими відбиттями, інтерференцією та шумами, що знижують ефективність.

З огляду на це, єдиним ефективним способом масштабного збільшення пропускної здатності для всіх користувачів є розширення смуги пропускання сигналу, тобто використання ширших спектральних діапазонів. Саме тому кожне нове покоління мобільних технологій пов'язане з відкриттям та стандартизацією нових діапазонів частот.

Еволюція використання спектра

- **1G та 2G.** Системи аналогового та раннього цифрового зв'язку працювали переважно у діапазонах нижче 1 ГГц. Це забезпечувало відносно великий радіус дії базових станцій, але обмежувало пропускну здатність і можливості передачі даних.
- **3G.** У рамках концепції IMT-2000 було освоєно діапазони 2 ГГц, що дозволило підняти швидкість передачі даних до рівня кількох мегабіт за секунду та підтримати мультимедійні сервіси.
- **4G.** Стандарт IMT-Advanced використовував ширші смуги у діапазонах до 3,5 ГГц, що забезпечило швидкості у сотні мегабіт і навіть гігабіт на секунду в оптимальних умовах.
- **5G.** У концепції IMT-2020 відбулося масштабне розширення спектра: від діапазонів нижче 1 ГГц для покриття великих територій до С-діапазону (3,4–3,8 ГГц) і міліметрових хвиль (24–40 ГГц) для надвисоких швидкостей. Це дозволило підтримати три ключові сценарії — eMBB, mMTC та URLLC.

Очікується, що у майбутній концепції IMT-2030, яка визначатиме вимоги до систем 6G, спектральні вимоги стануть ще суворішими. Планується активне використання терагерцового діапазону (100 ГГц – 1 ТГц). Саме цей спектр здатний забезпечити терабітні швидкості передавання даних, однак він висуває нові технічні виклики:

- сильне затухання сигналу, яке обмежує радіус дії;
- потреба у надщільному розгортанні базових станцій;
- розробка нових антенних технологій та матеріалів;
- необхідність ефективного використання технологій MIMO та beamforming для компенсації втрат.

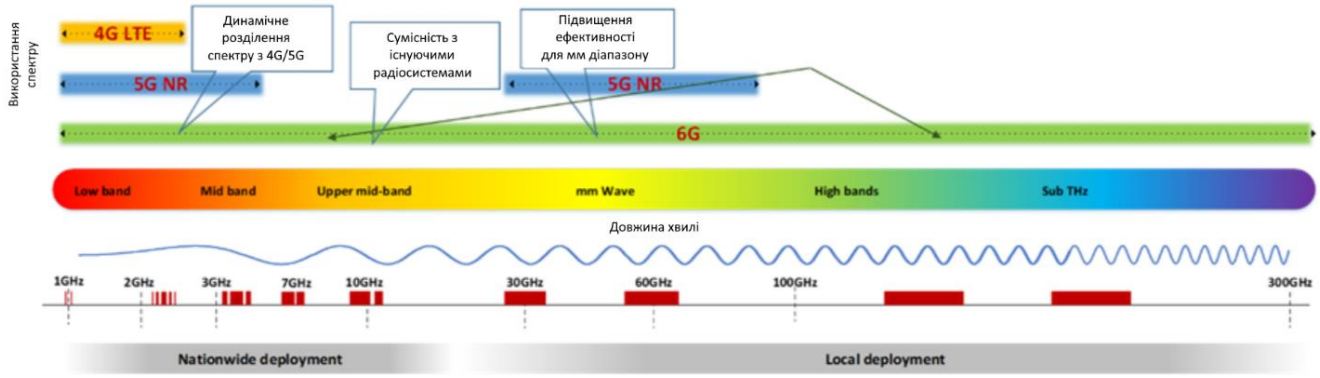


Рис. 3.3 Приблизні діапазони частот, які використовувалися різними поколіннями систем зв'язку

Таким чином, основним фактором еволюції мобільних систем зв’язку є освоєння нових діапазонів частот і розширення спектра, що безпосередньо впливає на можливість підвищення пропускної здатності мережі. Саме здатність ефективно використовувати радіочастотний ресурс визначає якісний перехід від одного покоління до іншого — від 1G до 5G і далі до 6G. Нові спектральні можливості відкривають шлях до сервісів майбутнього: голографічної комунікації, цифрових двійників, глобального інтернету речей та інтеграції наземних і космічних систем зв’язку.

Еволюція мобільних систем зв’язку завжди була тісно пов’язана з питанням ефективного використання радіочастотного спектра. Саме вибір робочих частот і доступної смуги пропускання визначає ключові параметри системи — максимальну швидкість передавання даних, ємність мережі, якість обслуговування та можливість масштабування.

Особливості спектра у 4G

Системи четвертого покоління (4G) були спроєктовані переважно для роботи у сантиметровому діапазоні з частотами від 1 до 2,5 ГГц. У цьому діапазоні доступні канали з шириною смуги порядку кількох десятків мегагерц, чого вистачало для забезпечення швидкостей у сотні мегабіт за секунду, що на той час вважалося революційним проривом. Проте цей спектр мав суттєві обмеження:

- він був фрагментованим, тобто безперервні ділянки смуги пропускання були невеликими;

- доступність спектра залежала від регіональних ліцензій та перерозподілу частот;
- зростаючий попит на мобільні послуги швидко вичерпав можливості смуги у 1–2,5 ГГц.

Таким чином, для задоволення нових вимог потрібне було розширення спектра й пошук додаткових частотних ресурсів.

Розширення спектра у 5G

У системах п’ятого покоління (5G) це завдання було вирішено шляхом відкриття доступу до нових діапазонів. Зокрема:

- у сантиметровому діапазоні верхня межа піднялася до 3,5 ГГц, що дозволило використовувати канали шириною до 100 МГц;
- уперше було впроваджено підтримку міліметрових хвиль (30–60 ГГц), де доступні канали зі смугою до 1 ГГц.

Завдяки цьому стало можливим забезпечення швидкостей у кілька гігабіт за секунду та реалізація нових сценаріїв — від потокового відео у форматі 8K до масового інтернету речей та автономного транспорту. Проте використання міліметрового діапазону мало неоднозначний результат: з одного боку, він забезпечує унікально високу пропускну здатність, з іншого — має серйозні обмеження через сильне затухання сигналу, малий радіус дії та потребу у прямій видимості. Це вимагає надзвичайно щільного розгортання базових станцій, що підвищує вартість інфраструктури.

Ще одним викликом для 5G стала необхідність співіснування з попередніми технологіями. У великих містах навіть в одному мікрорайоні можуть одночасно працювати пристрої, що підтримують 4G, 5G, а в майбутньому — і 6G. Тому було розроблено рішення під назвою динамічне розділення спектра (Dynamic Spectrum Sharing, DSS). Воно дозволяє одночасно використовувати одну і ту ж смугу частот різними поколіннями систем, автоматично перерозподіляючи ресурс залежно від поточного навантаження.

Перспективи спектра у 6G

У концепції IMT-2030, яка визначає напрями розвитку шостого покоління (6G), планується подальше розширення спектральних можливостей. Основні нововведення включають:

- підтримку діапазону 7–13 ГГц (upper mid band). Його головна перевага полягає у тому, що цей спектр може бути використаний із мінімальною модернізацією наявної інфраструктури. Базові станції, які вже працюють у сусідніх частотах, потенційно здатні підтримувати ці діапазони без значного збільшення кількості нових об’єктів. При цьому у 7–13 ГГц доступні додаткові ділянки неперервного спектра шириною кілька сотень мегагерц, що відкриває можливість для суттєвого підвищення пропускної здатності системи. Однак цей діапазон уже частково використовується іншими службами (радіолокаційними, супутниковими чи спеціалізованими системами передавання даних), тому виникатиме проблема сумісності.
- впровадження субтерагерцового діапазону (sub-THz). Тут доступні смуги шириною у кілька гігагерц, що відкриває шлях до швидкостей на рівні терабіт за секунду. Водночас суб-THz має суттєві обмеження: високі втрати під час поширення сигналу, чутливість до атмосферних умов і потреба у прямій видимості. Це означає, що його застосування буде переважно локальним — наприклад, у межах кампусів, промислових підприємств чи транспортних вузлів.

Основні виклики для 6G

1. **Співіснування з попередніми поколіннями.** Необхідність забезпечення одночасної роботи 5G і 6G у спільних діапазонах.
2. **Економічна ефективність.** Висока вартість інфраструктури у міліметровому й субтерагерцовому діапазонах потребує пошуку балансованих моделей впровадження.
3. **Сумісність із іншими системами.** У діапазонах 7–13 ГГц уже працюють інші служби, що вимагає координації спектра на глобальному рівні.

4. **Технічні обмеження.** Високе загасання у міліметрових та субтерагерцових хвилях вимагає нових антенних технологій (масивні MIMO, beamforming) та матеріалів для ефективного поширення сигналу.

Еволюція від 4G до 6G демонструє чітку тенденцію: кожне нове покоління мобільного зв'язку насамперед відкриває доступ до нових спектральних діапазонів, що дозволяє суттєво підвищити пропускну здатність і розширити функціональні можливості мережі. Якщо 4G обмежувалося смугами у десятки мегагерц, то 5G вже працює із сотнями мегагерц та гігагерцовими каналами. 6G, у свою чергу, відкриє доступ до частот від 7–13 ГГц і субтерагерцових діапазонів, що стане фундаментом для сервісів майбутнього — голографічного зв'язку, цифрових двійників, масового інтернету речей і глобальної інтеграції наземних та супутникових систем.

3.3 Проблема зменшення зони покриття

Складнощі використання нових високочастотних діапазонів. Для цього зазвичай застосовують формулу Фріса, яка визначає потужність прийнятого сигналу у вільному просторі залежно від параметрів системи:

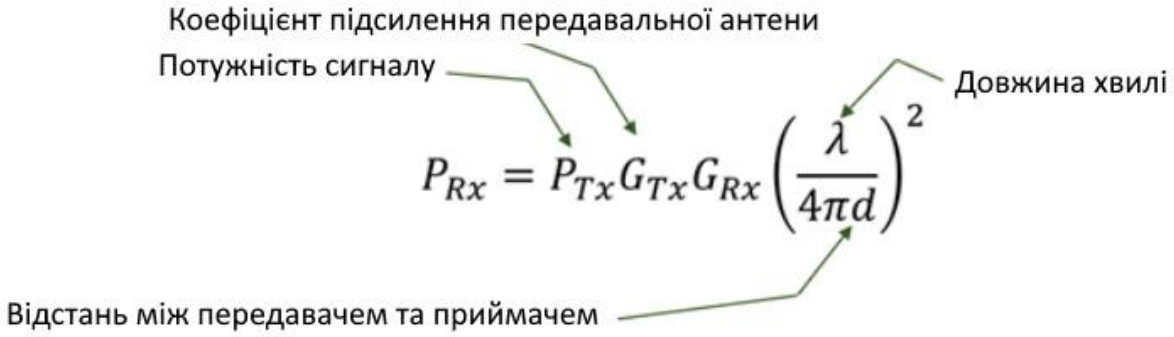


Рис. 3.4 Формула Фріса

З формули випливає, що рівень прийнятого сигналу зменшується зі збільшенням відстані між передавачем і приймачем ddd. Найважливіше ж полягає в тому, що потужність сигналу також різко падає зі зменшенням довжини хвилі λ\lambdaλ, тобто зі зростанням несучої частоти. Це означає, що робота у міліметровому чи терагерцовому діапазонах відкриває великі можливості для

швидкісної передачі даних, але водночас потребує нових технічних рішень для компенсації втрат сигналу.

Використання діапазонів із коротшою довжиною хвилі відкриває можливість залучати додатковий спектр і тим самим збільшувати пропускну здатність мережі. Проте така перевага має і суттєвий недолік: чим менша довжина хвилі, тим сильніше зменшується радіус дії однієї базової станції, і зона покриття стає значно обмеженішою навіть за умов відкритого простору без перешкод. Це створює додаткові вимоги до щільності розгортання мережі та збільшує витрати на інфраструктуру.

Разом із тим для операторів важливим завданням є максимальне використання наявної інфраструктури — веж, щогл і будівель, на яких уже встановлено обладнання попередніх поколінь. Це дозволяє знизити витрати, прискорити впровадження нових технологій і забезпечити поступовий перехід від 4G і 5G до мереж шостого покоління.

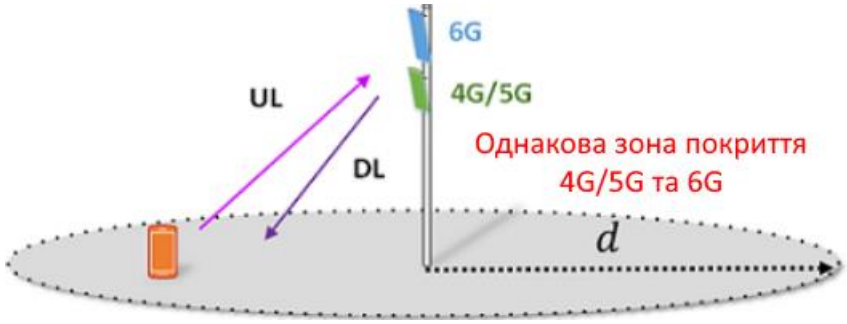


Рис. 3.5 Зони покриття 4G/5G та 6G

Однією з найсерйозніших проблем для сучасних систем мобільного зв’язку є обмеженість зони покриття. Стандартна топологія мережі передбачає, що якість і стабільність зв’язку визначаються розташуванням базових станцій, щільність яких прямо залежить від кількості користувачів у конкретному регіоні.

У містах, де концентрація абонентів висока, оператори активно інвестують у розвиток інфраструктури, завдяки чому зона покриття є якісною і надійною.

Проте у сільській місцевості чи в регіонах із низькою щільністю населення ситуація суттєво відрізняється.

Розгортання нових базових станцій там стає малоефективним через високу капіталоємність, потребу у додатковій інфраструктурі (енергопостачанні, транспортних шляхах, магістральних каналах зв’язку) та відсутність достатнього числа користувачів, які б могли забезпечити швидку окупність інвестицій. У результаті великі площі залишаються без якісного мобільного інтернету, і навіть базові послуги зв’язку доступні там лише частково або з низькою якістю.

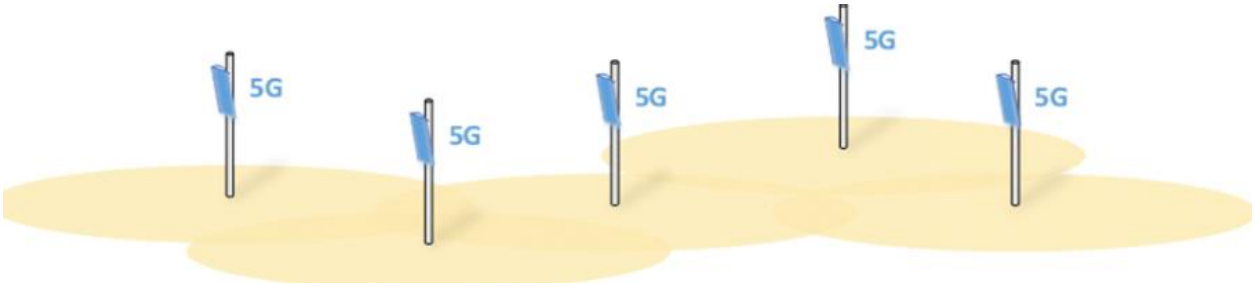


Рис. 3.6 Стандартна зона покриття базових станцій

Вирішенням цієї проблеми поступово стає інтеграція супутникових систем зв’язку. Їх основна перевага полягає у тому, що вони здатні забезпечувати глобальне покриття незалежно від рельєфу, щільності населення чи розвиненості інфраструктури. Супутниковий зв’язок може виступати базовим рівнем для надання послуг у віддалених районах, тоді як у містах та індустріальних центрах функції високошвидкісної передачі покладаються на наземні базові станції. Таким чином, наземні та супутникові системи не конкурують між собою, а створюють взаємодоповнюючу інфраструктуру, де одна технологія компенсує слабкі місця іншої. Прикладом такої реалізації є глобальні супутникові проєкти на кшталт Starlink від компанії SpaceX, які вже довели практичну доцільність цього підходу.

У контексті розвитку шостого покоління мобільних систем (6G) роль супутникових технологій стає ще більш значущою. Концепція Non-Terrestrial Networks (NTN), що активно розробляється у межах міжнародних стандартів, передбачає повноцінну інтеграцію супутникових сегментів у мобільні мережі. Це означає, що користувачі зможуть отримувати доступ до послуг зв’язку, використовуючи універсальне обладнання, яке підтримуватиме як наземні, так і супутникові канали. Відпаде потреба в громіздких терміналах чи спеціалізованих антенах, як у випадку з нинішніми системами на кшталт Starlink. Для абонентів це

означає зниження витрат і зручність користування, а для операторів — спрощення експлуатації мережі.

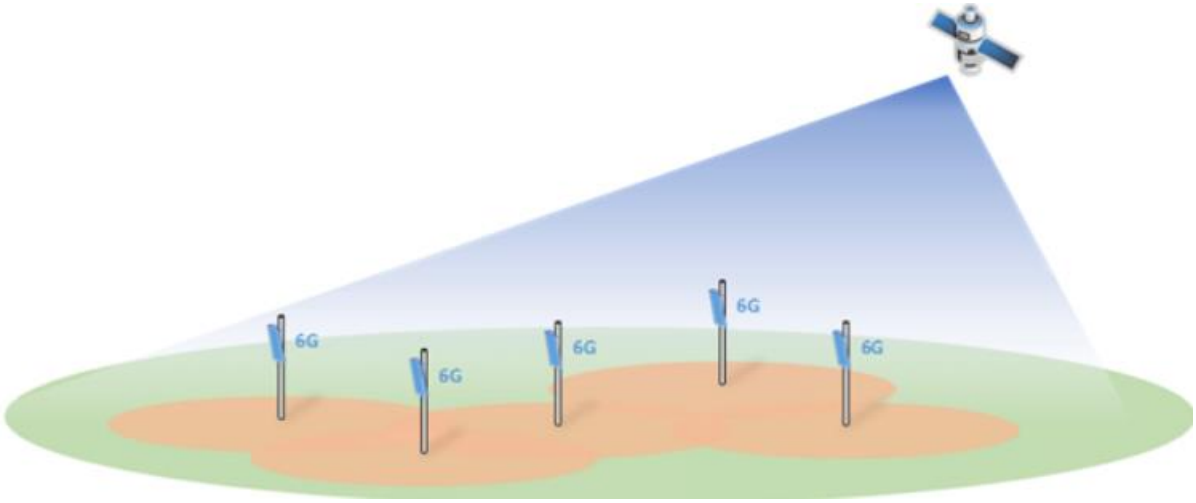


Рис. 3.7 Концепція Non-Terrestrial Networks (NTN)

Ще однією ключовою перевагою стане можливість безшовного покриття, коли система автоматично перемикатиме користувача між супутниковим і наземним каналом залежно від умов поширення сигналу. Це дозволить уникати зон «мертвого покриття» і забезпечить стабільний доступ до мережі незалежно від географії. Також важливим аспектом є оптимізоване використання спектра: у майбутніх мережах очікується гнучке перерозподілення частотних ресурсів між наземними та супутниковими системами, що підвищить загальну ефективність і пропускну здатність мережі.

Проте інтеграція супутникового сегмента у 6G супроводжується низкою технічних проблем. Для геостаціонарних супутників, які перебувають на великій висоті відносно поверхні Землі, характерними є низькі рівні прийнятого сигналу та значні затримки, зумовлені тривалим часом поширення сигналу. Це робить їх придатними лише для обмеженого кола застосувань, де затримка не є критичною. Натомість низькоорбітальні супутники (LEO) дозволяють знизити затримки майже до рівня наземних мереж, але створюють нову проблему — необхідність компенсації допплерівського зсуву, який виникає через високу швидкість руху супутників відносно поверхні Землі. Крім того, управління багатотисячними сузір’ями супутників вимагає складних систем координації та синхронізації.

Незважаючи на ці виклики, сучасні дослідження й експериментальні розробки свідчать, що всі зазначені проблеми поступово знаходять технічні рішення. Уже зараз використовуються адаптивні методи компенсації допплерівського ефекту, нові схеми модуляції та кодування для слабких сигналів, а також інтелектуальні системи управління ресурсами для багатошарових мереж. Саме завдяки таким інноваціям застосування супутникових систем у складі 6G розглядається не як допоміжний елемент, а як рівноправна складова майбутньої інфраструктури зв’язку.

Таким чином, поєднання наземних і супутникових систем у межах єдиної архітектури 6G дозволить забезпечити справді глобальне покриття, яке не залежатиме від місця перебування користувача. Це означає, що доступ до мобільного інтернету стане універсальною послугою, доступною у будь-якій точці світу — від великих мегаполісів до віддалених островів і полярних регіонів. Саме інтеграція супутникових технологій у 6G може стати вирішальним кроком на шляху до створення єдиної глобальної телекомунікаційної екосистеми, що забезпечить сталий розвиток цифрового суспільства у найближчі десятиліття.

3.4 Використання антенних решіток (XMIMO - Extreme MIMO)

1. Основи використання антенних решіток

Застосування багатьох антен, об’єднаних у єдину систему, дозволяє формувати діаграму спрямованості випромінювання, завдяки якій енергія сигналу концентрується у вибраному напрямку. Це явище відоме як beamforming.

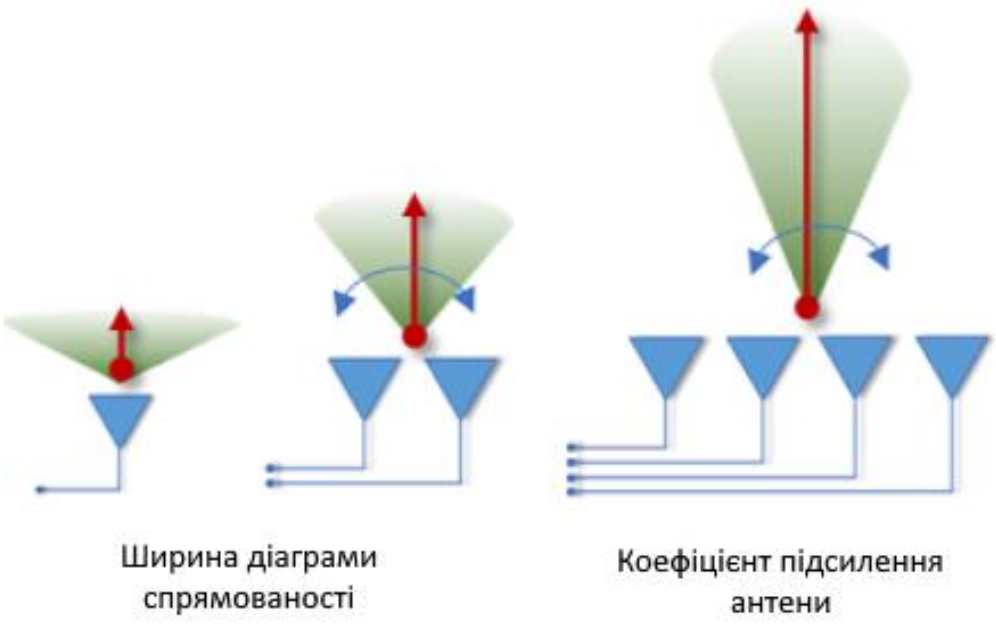


Рис. 3.8 Формування діаграми спрямованості

Використання декількох антенних елементів замість однієї дає низку переваг:

- можливість значно збільшити коефіцієнт підсилення антени (*antenna gain*), що безпосередньо впливає на якість сигналу на приймальному боці;
- звуження головної пелюстки діаграми, яке дозволяє адресно спрямовувати сигнал та знижувати рівень завад;
- гнучке керування напрямком випромінювання залежно від розташування користувача.

Зі зростанням кількості антенних елементів у решітці збільшується підсилення та зменшується ширина променя. Це створює передумови для одночасного обслуговування багатьох користувачів та підвищення ефективності використання спектра.

2. Технологія MIMO

У літературі підхід, коли декілька антен встановлюються і на передавальній, і на приймальній стороні, отримав назву MIMO (Multiple Input Multiple Output). Суть технології полягає у створенні кількох незалежних просторових каналів у межах одного частотного діапазону.

Це має два ключових ефекти:

1. Компенсація втрат при поширенні сигналу на високих частотах, де затухання стає критичним.
2. Множинність каналів зв’язку, що дозволяє одночасно передавати різні потоки даних кільком користувачам або одному користувачу з кратним підвищенням швидкості.

У системах 5G ця технологія набула вигляду Massive MIMO, що означає використання сотень антенних елементів у діапазоні 3,5 ГГц. Це забезпечило значне зростання пропускної здатності та стійкість до завад у порівнянні з традиційними схемами.

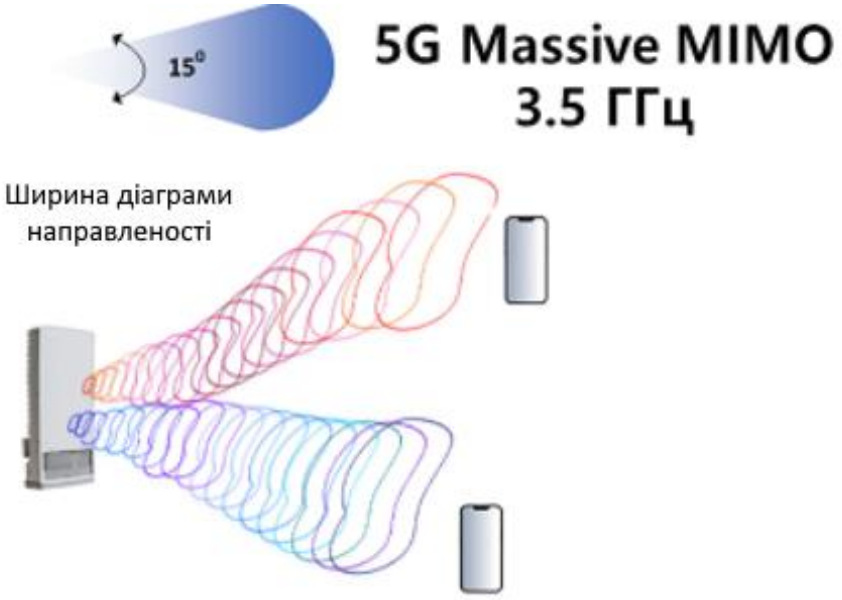


Рис. 3.9 Massive MIMO

3. Вихід у нові діапазони та потреба у XMIMO

Перехід до систем 6G передбачає активне використання діапазонів 7–13 ГГц (так званий upper mid-band) та субтерагерцового спектра. У цих діапазонах довжина хвилі менша, що дозволяє розмістити набагато більше антен у тому самому фізичному корпусі.

Наприклад:

- антенна решітка з 256 елементів (дві поляризації) на частоті 3,5 ГГц;
- антенна решітка з понад 3000 елементів у тому самому корпусі на частоті 13 ГГц.

Таким чином, зі зростанням частоти з’являється можливість суттєво збільшити кількість елементів, підсилення та ефективність антенної системи, що особливо важливо для компенсації втрат сигналу на високих частотах.

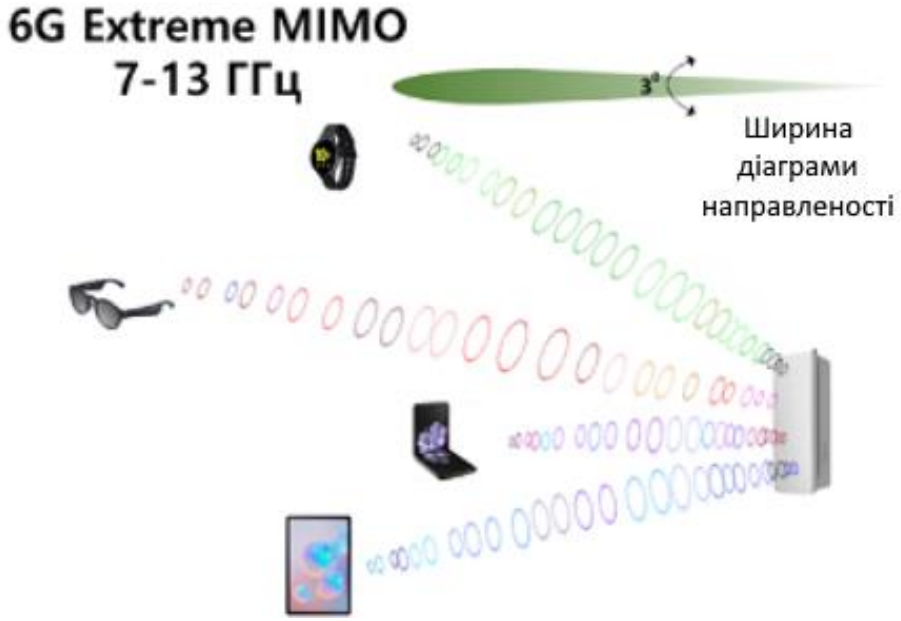


Рис. 3.10 Extreme MIMO (XMIMO)

Цей підхід отримав назву Extreme MIMO (XMIMO), що підкреслює екстремально велику кількість антенних елементів у системі.

4. Переваги XMIMO для 6G

XMIMO забезпечує низку унікальних можливостей:

- Масове обслуговування користувачів. Завдяки вузьким променям можна обслуговувати до 64 і більше пристроїв одночасно у межах одного частотного каналу без суттєвих перешкод.
- Багатопроменева передача для одного користувача. До 16 незалежних просторових каналів для одного пристрою з паралельною передачею даних, що підвищує швидкість у кілька разів (наприклад, з 10 Гбіт/с до 100 Гбіт/с).
- Покращена спектральна ефективність. Використання вузьких променів знижує рівень взаємних перешкод між базовими станціями, що дозволяє повторно використовувати один і той самий частотний ресурс.
- Інтеграція функцій зондування. Великі антенні решітки фактично можуть виконувати функції радара, забезпечуючи високоточну локалізацію об’єктів

із сантиметровою точністю, моніторинг довкілля, транспортних потоків та інфраструктури.

- Компенсація втрат на високих частотах. Завдяки великій кількості антен рівень сигналу на приймачі залишається достатнім навіть при роботі у субтерагерцових діапазонах.

5. Перспективні сценарії використання XMIMO

XMIMO відкриває шлях до реалізації сценаріїв, які неможливо забезпечити на основі традиційних технологій:

- Голографічний зв’язок. Забезпечення каналів у десятки гігабіт/с на користувача для реалістичних тривимірних зображень.
- Тактильний інтернет. Наднизькі затримки (<1 мс) та висока надійність для дистанційної хірургії та роботизованих систем.
- Інтелектуальні транспортні системи. Використання XMIMO для одночасного зв’язку з великою кількістю автомобілів чи дронів у місті без перевантаження спектра.
- Digital twins мережі. Зондування середовища антенними решітками з подальшою інтеграцією даних у цифрові двійники, що дозволяє моделювати поведінку мережі в реальному часі.

6. Формалізація параметрів XMIMO

У спрощеному вигляді коефіцієнт підсилення антенної решітки можна описати формулою:

$$G \approx N \cdot g_0 \tag{3.1}$$

де N — кількість антенних елементів, а g_0 — коефіцієнт підсилення одного елемента.

Ширина головної пелюстки діаграми спрямованості у кутових градусах визначається як:

$$\theta = \frac{\lambda}{D}$$

де λ— довжина хвилі, а D — розмір апертури антенної решітки.

Ці співвідношення демонструють, що зі зменшенням довжини хвилі (тобто зі зростанням частоти) ширина діаграми зменшується, а підсилення зростає, що і використовується у концепції XMIMO.

Extreme MIMO (XMIMO) — це стратегічний напрям розвитку систем 6G, що дозволяє одночасно вирішити кілька проблем: підвищити пропускну здатність, знизити рівень завад, розширити спектр застосувань і компенсувати втрати на високих частотах. Завдяки поєднанню комунікаційних та сенсорних функцій XMIMO стане основою для реалізації таких сервісів, як голографічні комунікації, тактильний інтернет, інтегровані транспортні системи та цифрові двійники.

4 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ 6G. СТАНДАРТИЗАЦІЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ВИКОРИСТАННЯ ПОВНОГО ДУПЛЕКСУ

4.1 Стандартизація 3GPP

Поступово ми переходимо до аналізу процесів стандартизації у межах організації 3GPP, яка відіграє ключову роль у визначенні технічних вимог і специфікацій для мобільних систем зв’язку різних поколінь. Важливо підкреслити, що склад компаній, які беруть участь у цих процесах, змінювався з часом, відображаючи трансформацію ринку телекомунікацій та розвиток нових сфер застосування мобільних технологій.

Під час розробки стандарту LTE, який став основою систем мобільного зв’язку четвертого покоління, провідними учасниками 3GPP були насамперед телекомунікаційні компанії та мобільні оператори. Така структура була цілком логічною, адже основна увага тоді приділялася забезпеченню якісного мобільного інтернету та підтримці звичних для користувачів застосунків, серед яких головними були веб-браузинг, електронна пошта, обмін мультимедійними повідомленнями та потокове відтворення відео. У цей період мобільний зв’язок ще розглядався переважно як інструмент для надання послуг передачі даних фізичним особам, і саме оператори мали вирішальне значення у визначенні вимог до мережі.

Згодом, із розвитком нових сервісів і зростанням попиту на високошвидкісні канали зв’язку, у процес стандартизації почали все активніше залучатися виробники обладнання, постачальники програмних рішень і навіть компанії з інших сфер, для яких мобільний зв’язок ставав основою цифрової трансформації. Але саме на етапі LTE визначальною була роль класичних телекомунікаційних гравців, які задавали вектор розвитку мереж четвертого покоління.

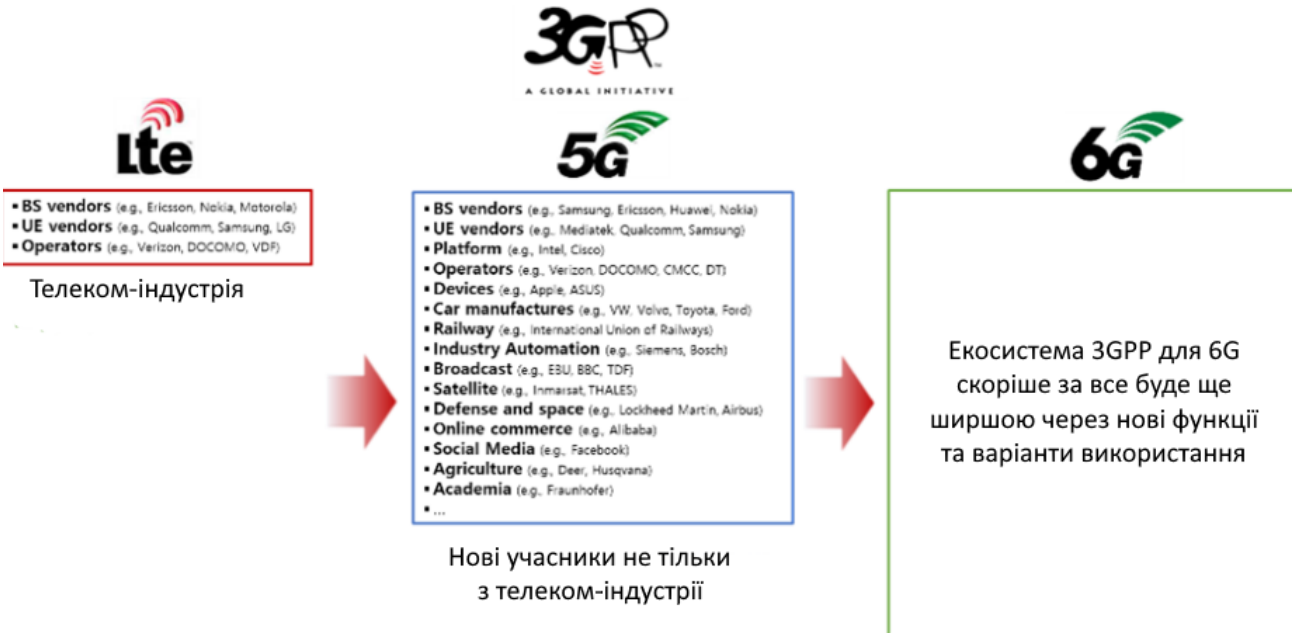


Рис. 4.1 Трансформація екосистеми 3GPP

Коли організація 3GPP перейшла до розробки стандартів мобільного зв'язку п'ятого покоління, ситуація змінилася кардинально. Якщо під час створення LTE коло учасників здебільшого обмежувалося операторами мобільного зв'язку та виробниками телекомунікаційного обладнання, то з появою 5G коло зацікавлених сторін значно розширилося. Це пояснюється тим, що системи п'ятого покоління з самого початку задумувалися як універсальна технологічна платформа, здатна обслуговувати не лише традиційні потреби мобільних користувачів, але й широкий спектр нових сфер. У результаті до роботи над стандартом долучилися компанії з абсолютно інших галузей: виробники автомобілів, авіаційні корпорації, підприємства, що займаються автоматизацією промислових процесів, а також компанії, які розробляють системи для «розумних міст», охорони здоров'я, енергетики та логістики.

Така диверсифікація учасників не була випадковою. 5G став першим поколінням, яке чітко орієнтувалося на підтримку нових сценаріїв застосування: масового інтернету речей (mMTC), критично важливих сервісів із наднизькою затримкою (URLLC), а також удосконаленого мобільного широкосмугового доступу (eMBB). Кожна з цих категорій привертала увагу різних галузей промисловості, адже потенційні можливості технології могли трансформувати транспорт, виробництво, медицину чи навіть сферу розваг. Саме тому розробка 5G

виявилася міждисциплінарною, а 3GPP перетворився на глобальний центр координації інтересів різних секторів економіки. Очевидно, що у випадку 6G ця тенденція лише посилиться, оскільки шосте покоління мобільного зв’язку буде розраховане на ще ширший набір завдань — від голографічних комунікацій і цифрових двійників до повної інтеграції із супутниковими мережами та квантовими технологіями.

Щоб зрозуміти масштаб цього процесу, варто розібратися, що таке 3GPP. Це міжнародна організація, яка об’єднує сотні компаній із різних країн світу: операторів мобільного зв’язку, виробників обладнання, постачальників програмних рішень, наукові центри та навіть представників кінцевих галузей-споживачів. Основною метою 3GPP є створення специфікацій, які охоплюють усю систему мобільного зв’язку — від терміналів користувачів і протоколів радіоінтерфейсу до архітектури базових станцій, транспортної мережі та системи керування.

Структурно 3GPP складається з трьох основних напрямів специфікацій, кожен з яких поділений на робочі групи. Кожна група відповідає за свій рівень і функціональний аспект системи зв’язку. Наприклад, одним із найвідоміших і найбільш впливових підрозділів є RAN1, що займається питаннями фізичного рівня радіодоступу: від параметрів модуляції та кодування до управління багатопроменевими сигналами, антенними решітками й технологіями MIMO. Саме в рамках RAN1 приймаються рішення, які безпосередньо визначають пропускну здатність, спектральну ефективність та енергоефективність майбутніх мобільних систем.

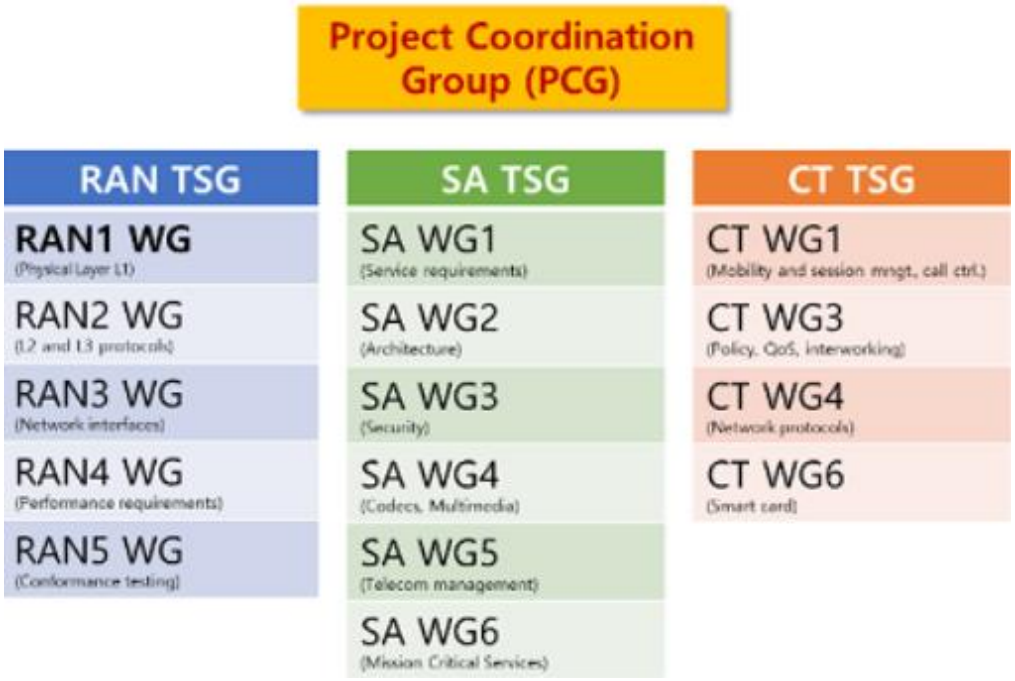


Рис. 4.2 Структура 3GPP

3GPP можна розглядати як унікальний приклад глобальної співпраці, де конкуруючі компанії та різні галузі об’єднують зусилля задля створення єдиного стандарту. У випадку з 5G цей підхід дозволив досягти універсальності та масштабованості системи, а для 6G він стане необхідністю, оскільки нове покоління зв’язку буде спрямоване на інтеграцію ще більшої кількості технологій і сценаріїв використання.

Розробка стандартів у робочих групах 3GPP здійснюється у формі постійного обміну технічними документами, що мають назву *contributions*. Такі матеріали готуються компаніями-учасниками й містять пропозиції щодо нових функцій, удосконалення існуючих механізмів чи виправлення виявлених недоліків. Дискусія навколо цих документів відбувається безпосередньо у робочих групах, де учасники аналізують технічні деталі, моделюють можливі сценарії та оцінюють вплив рішень на всю екосистему. Важливо, що ухвалення рішень у 3GPP базується не на формальному голосуванні, а на принципі консенсусу. Це означає, що остаточне рішення формується на основі глибокого обговорення і врахування інтересів більшості сторін, що гарантує баланс між технічними інноваціями та бізнес-потребами учасників.

Яскравим прикладом активної участі в цьому процесі є компанія Samsung, яка вважається одним із технологічних лідерів у сфері мобільних комунікацій. Представники цієї компанії не лише регулярно подають власні технічні пропозиції, а й займають керівні позиції в окремих робочих групах. Так, на момент підготовки цього матеріалу головою однієї з найважливіших груп — RAN1, що відповідає за фізичний рівень радіодоступу, був співробітник Samsung. Це свідчить про значний вплив компанії на формування ключових параметрів майбутніх стандартів.

Популярність і стратегічна важливість участі у процесах стандартизації пояснюються кількома чинниками. По-перше, компанії отримують реальну можливість визначати напрям розвитку технологій відповідно до власних довгострокових пріоритетів і бізнес-стратегії. По-друге, активна участь у 3GPP дає змогу просувати технічні рішення, які найкраще відповідають інтересам певної компанії, створюючи для неї конкурентну перевагу та одночасно захищаючи бізнес від небажаних рішень конкурентів. По-третє, важливим мотиватором є прибутковість від ліцензування. Багато компаній реєструють патенти на рішення, які пропонуються до включення у стандарт, і після їхнього затвердження ці розробки стають обов’язковими до використання у всіх пристроях, що підтримують дану технологію. Це створює значне джерело доходу, адже ринок мобільного зв’язку охоплює мільярди пристроїв по всьому світу.

Таким чином, участь у 3GPP для компаній — це не лише інструмент впливу на технічний розвиток телекомунікаційної галузі, а й спосіб посилення власних ринкових позицій, захисту інтелектуальної власності та формування нових бізнес-моделей у глобальному масштабі.

4.2 Енергоефективність систем

Витрати на енергоспоживання сьогодні становлять одну з ключових статей операційних витрат мобільних операторів, особливо в тих країнах, де вартість електроенергії є високою або де мережа охоплює великі території з низькою щільністю населення. У цьому контексті енергоефективність розглядається як

стратегічний чинник конкурентоспроможності, і саме тому майбутні системи 6G повинні бути побудовані з урахуванням обов’язкової підтримки алгоритмів енергозбереження.

Йдеться не лише про традиційні методи оптимізації, а й про впровадження принципово нових підходів до управління інфраструктурою. Одним із перспективних напрямів є динамічне керування активністю радіоблоків базових станцій. Наприклад, частина обладнання може відключатися на певних частотах у ті періоди, коли навантаження на мережу є мінімальним. Крім того, сучасні алгоритми з використанням штучного інтелекту дозволяють не тільки реагувати на поточний рівень трафіку, але й прогнозувати його зміни: враховувати розташування користувачів, їхню швидкість пересування та ймовірну траєкторію руху. Це робить можливим попереднє керування енергоспоживанням мережі без зниження якості обслуговування.

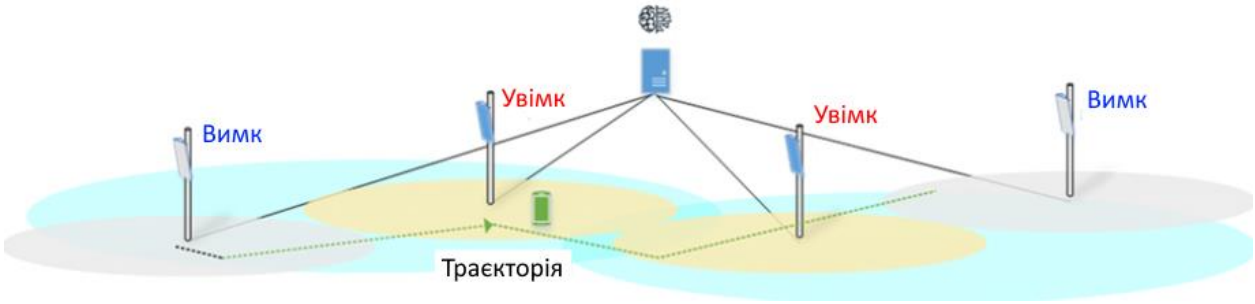


Рис. 4.3 Динамічне керування активністю радіоблоків базових станцій

Не менш важливою є проблема енергоефективності з боку кінцевих пристроїв. У системах шостого покоління особливе значення матиме підтримка роботи пристроїв Інтернету речей нового типу, які відомі як zero-energy або zero-power пристрої. Це надзвичайно прості сенсори, які повинні функціонувати роками без заміни батарейок, а іноді — взагалі без них. Джерелами енергії для таких сенсорів виступатимуть навколишні процеси: радіохвилі від телевізійних і радіосигналів, механічні вібрації будівельних конструкцій чи транспортних засобів, перепади температури, сонячне випромінювання та навіть енергія людського руху. Такий підхід дозволить створювати надщільні сенсорні мережі для «розумних міст», промислових підприємств, систем моніторингу довкілля й охорони здоров’я без необхідності у постійному обслуговуванні пристроїв.

Перед інженерами постає складне завдання розробки архітектур із наднизьким енергоспоживанням. Проблема полягає в тому, що більшість базових функцій сучасних пристроїв — забезпечення мобільності, шифрування даних, обробка сигналів, підтримка протоколів безпеки та маршрутизація — вимагають значних енергетичних витрат. Для досягнення поставлених цілей доведеться створювати абсолютно нові принципи роботи апаратних модулів і протоколів зв’язку, які мінімізуватимуть споживання енергії без шкоди для функціональності.

Проблема енергоефективності є надзвичайно актуальною для сучасних і майбутніх мобільних пристроїв. Одним із ключових напрямів розвитку в межах систем 6G є підтримка роботи пристроїв Інтернету речей нового покоління, які у науковій літературі та стандартизаційних документах часто називають zero-energy або zero-power пристроями. Ідея полягає у створенні простих сенсорів, здатних функціонувати без заміни елементів живлення протягом усього терміну експлуатації. Джерелом енергії для таких сенсорів виступатиме навколишнє середовище: радіохвилі від телевізійних і радіопередавачів, механічні вібрації будівель і транспортних засобів, різкі зміни температури, сонячне випромінювання або навіть рух людини. Це відкриває перспективу побудови надщільних сенсорних мереж, які не потребуватимуть регулярного технічного обслуговування, що є критично важливим для промислових застосувань, розумних міст, систем моніторингу довкілля чи медицини.

Разом із тим створення таких пристроїв ставить перед інженерами складне завдання: розробку архітектури з ультранизьким енергоспоживанням. Адже більшість функцій, які виконуються сучасними пристроями в мобільних мережах — забезпечення мобільності користувача, криптографічний захист даних, обробка та модуляція сигналу, підтримка протоколів безпеки — вимагають суттєвих енергетичних ресурсів. Для досягнення поставлених цілей доведеться не лише вдосконалювати існуючі методи, а й створювати нові підходи до побудови апаратних модулів і протоколів, які дозволять мінімізувати споживання енергії без втрати функціональності.

Проблема енергозбереження залишається актуальною і для звичних нам смартфонів. Хоча більшість користувачів сьогодні вже задоволені швидкістю передавання даних, питання тривалості автономної роботи пристрою часто є набагато важливішим. Саме від ефективності енергоспоживання залежить комфорт використання мобільного інтернету, безперервність роботи застосунків і зручність повсякденного життя. Серед можливих рішень у цій сфері варто відзначити технології динамічного відключення окремих функціональних блоків приймальних модулів залежно від характеру й інтенсивності вхідного трафіку. Це дозволяє зменшити споживання енергії в моменти, коли пристрій не потребує повної продуктивності, зберігаючи при цьому якість обслуговування користувача.

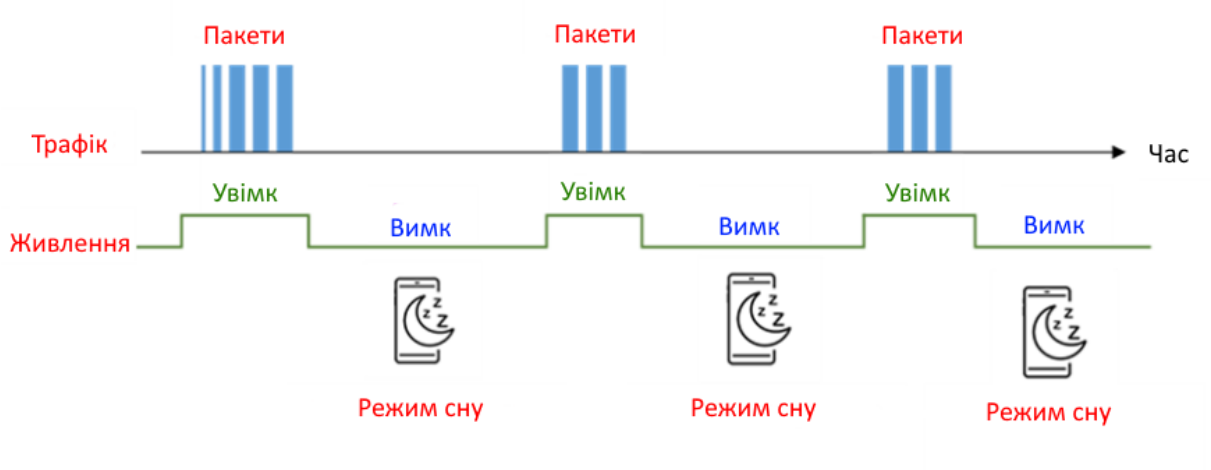


Рис. 4.4 Проблеми енергоефективності для звичайних смартфонів

Таким чином, енергоефективність у 6G стає не просто допоміжним чинником, а стратегічним пріоритетом, який визначатиме економічну доцільність упровадження нових технологій і формуватиме конкурентоспроможність на ринку. Вона охоплює два взаємопов’язані напрями: розробку автономних сенсорних систем, здатних працювати без батарей, та вдосконалення енергоспоживання смартфонів і інших кінцевих пристроїв. Саме баланс між високою продуктивністю та мінімальними енергетичними витратами стане основою масового впровадження технологій шостого покоління.

4.3 Повний дуплекс у системах 6G

Одним із перспективних напрямів розвитку технологій шостого покоління є впровадження механізмів повного дуплексу (Full Duplex), які передбачають одночасну передачу й прийом сигналів на одній і тій самій частоті. Це завдання давно цікавить дослідників, оскільки потенційно дозволяє подвоїти ефективність використання спектра та значно підвищити пропускну здатність мережі.

Щоб зрозуміти новизну такого підходу, варто коротко розглянути принцип роботи існуючих систем. У сучасних мобільних мережах використовується частотне розділення каналів (Frequency Division Duplex, FDD). У цьому випадку низхідний канал (Downlink, DL), який відповідає за передачу сигналу від базової станції до користувача, та висхідний канал (Uplink, UL), що передає інформацію від користувача до базової станції, функціонують одночасно, але у різних частотних діапазонах. Такий поділ дозволяє уникати взаємних перешкод між каналами та забезпечує стабільність зв’язку.

Проте застосування FDD має і свої обмеження. Найважливішим із них є те, що кожна пара частотних діапазонів (для UL та DL) вимагає значних ресурсів спектра, який є обмеженим. Це особливо актуально у контексті зростаючого попиту на високошвидкісні послуги, де кожен мегагерц спектра стає надзвичайно цінним ресурсом.

Саме тут виникає ідея повного дуплексу: якщо навчитися ефективно пригнічувати перешкоди від власного сигналу, що передається, то з’являється можливість одночасної роботи UL та DL у межах одного й того самого частотного каналу. Це дозволить не лише підвищити ефективність використання спектра, але й знизити затримки, покращити якість обслуговування та відкрити нові сценарії застосування, де важлива синхронна двостороння передача даних, наприклад у системах тактильного інтернету, автономному транспорті чи промисловій автоматизації.

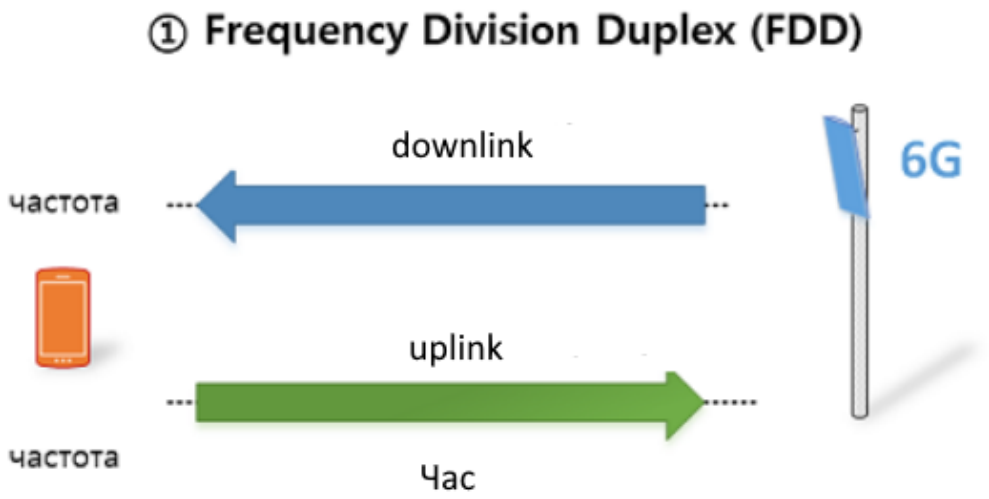


Рис. 4.5 Частотний поділ - Frequency Division Duplex (FDD). Висхідний і низхідний канал використовують різні частоти

Ще одним поширеним прикладом організації дуплексного зв'язку є часове розділення каналів (*Time Division Duplex, TDD*). У цьому випадку низхідна (DL) та висхідна (UL) лінії зв'язку працюють у межах одного й того самого частотного каналу, проте передавання сигналів у різних напрямках здійснюється не одночасно, а почергово, за спеціально визначеним розкладом. Інакше кажучи, частота є спільною для обох напрямків, але час поділяється між ними: певний проміжок використовується для передачі від базової станції до користувача, а наступний — для зворотного сигналу.

Такий підхід дозволяє зекономити цінний спектральний ресурс, адже відсутня потреба у виділенні двох окремих діапазонів для UL і DL, як у випадку з FDD. Проте він має й очевидне обмеження: загальна швидкість передавання даних прямо залежить від того, як саме розподілений час між каналами. Якщо, наприклад, на висхідний канал виділяється менше часу, то його пропускна здатність знижується, що може негативно позначатися на якості сервісів, де важлива передача даних від користувача (наприклад, відеоконференції чи передавання великих обсягів файлів у хмару).

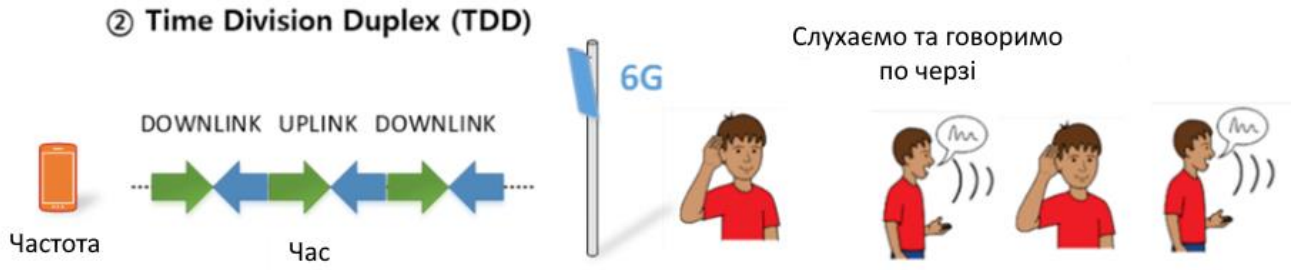


Рис. 4.6 Тимчасовий поділ - Time Division Duplex (TDD). Висхідний і низхідний канал використовують ту саму частоту в різний час

У контексті розвитку систем мобільного зв’язку шостого покоління (6G) дедалі більше уваги приділяється концепції повного дуплексу як додатковому та більш ефективному методу організації передавання даних. Йдеться про те, що висхідна (Uplink, UL) та низхідна (Downlink, DL) лінії зв’язку можуть функціонувати одночасно в межах одного й того самого частотного діапазону без необхідності часових інтервалів або частотного розділення. Це принципово відрізняє повний дуплекс від підходів, які застосовуються нині у більшості мереж (FDD та TDD), де або використовується різне частотне рознесення, або ж канали поділяють час.

Сценарій повного дуплексу можна уявити на прикладі базової станції, яка одночасно виконує дві операції: передає сигнал одному користувачу в низхідному каналі та водночас приймає сигнал від іншого користувача у висхідному. Така технологія теоретично дозволяє значно підвищити ефективність використання спектра, збільшити пропускну здатність системи майже вдвічі та зменшити затримки, що є критично важливим для сервісів майбутнього — від тактильного інтернету та управління автономним транспортом до промислових систем автоматизації.

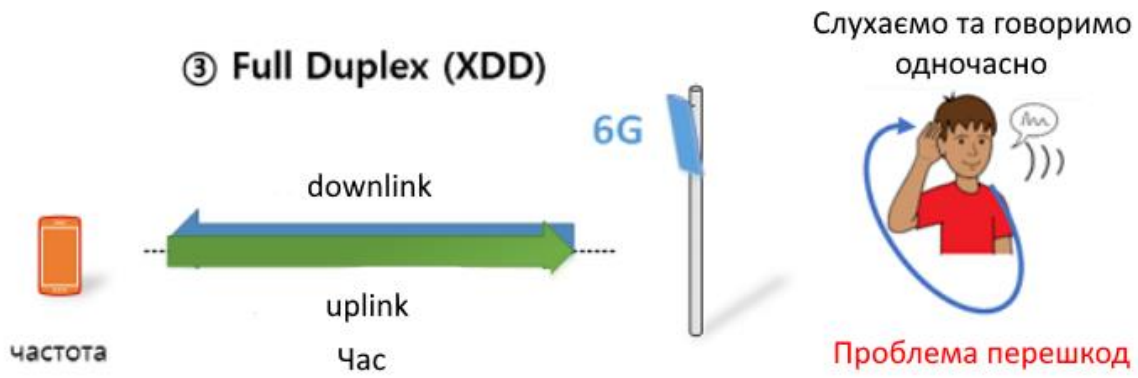


Рис. 4.7 Повний дуплекс

Щоб зробити цю ідею ближчою до повсякденного розуміння, можна провести аналогію зі звичайним спілкуванням: повний дуплекс — це можливість одночасно говорити й слухати співрозмовника, не перериваючи діалог і не очікуючи паузи для відповіді. Це якісно новий рівень взаємодії, який здатен докорінно змінити принципи організації комунікацій.

Однак головним викликом у реалізації повного дуплексу є високий рівень власних перешкод, які створює обладнання під час передавання сигналу. Іншими словами, передавальний тракт базової станції може суттєво заважати роботі приймального тракту, що унеможливлює коректне приймання сигналу. Подолання цього ефекту є ключовою інженерною задачею, від вирішення якої залежить реальне впровадження технології.

Для компенсації цих перешкод розглядається низка підходів:

- просторове рознесення антен — фізичне відділення передавальних і приймальних антен для зниження взаємного впливу;
- спрямоване формування сигналів (beamforming) — використання антенних решіток та алгоритмів керування променем для мінімізації перехресних завад;
- активні алгоритми компенсації завад, подібні до технологій шумопоглинання, що застосовуються у сучасних навушниках, коли небажаний сигнал «гаситься» за рахунок накладання протифази.

Розробка повного дуплексу вимагає поєднання цих підходів та створення нових методів цифрової обробки сигналів, здатних в реальному часі адаптивно

усувати завади. Хоча завдання є надзвичайно складним, його вирішення відкриє шлях до кардинального підвищення ефективності спектра й продуктивності мереж 6G, зробивши їх більш гнучкими та готовими до обслуговування великої кількості нових сервісів.

4.4 Використання 6G

Шосте покоління мобільних систем (6G) стане не просто наступним етапом еволюції після 5G, а фундаментальною платформою для цифрового суспільства майбутнього. Якщо 5G зробило прорив у швидкості, затримках і можливостях масового підключення, то 6G розглядається як технологія, що повинна інтегрувати наземні та супутникові системи, доповнити інтернет речей сенсорними мережами нового рівня та забезпечити появу принципово нових сценаріїв застосування.

1. Удосконалений широкосмуговий доступ

Традиційна модель використання мобільних мереж — передавання інтернет-трафіку для мільярдів користувачів — залишиться актуальною і в епоху 6G. Проте нові системи обіцяють зростання швидкості у сотні разів. Якщо 5G забезпечує пікові швидкості на рівні 10–20 Гбіт/с, то для 6G прогнозується досягнення 0,5–1 Тбіт/с, що фактично відкриє шлях до моментального завантаження будь-яких обсягів даних. Затримка зв’язку при цьому зменшиться до 0,1 мс, що практично наближається до фізичних меж поширення сигналу. Це зробить можливими сервіси, які нині вважаються експериментальними: потокове відео у форматі 16K, повноцінні VR/AR-середовища без локальної обробки та багатокористувацькі онлайн-платформи з мільйонами учасників у реальному часі.

2. Голографічні комунікації

Одним із символів 6G стане голографічний інтернет. Якщо сьогодні ми дивимося відео у 4K чи 8K із швидкістю у сотні мегабіт на секунду, то реалістична голографія потребує від 1 до 4 Гбіт/с на користувача. Це зумовлено необхідністю передавати тривимірні зображення з високою частотою кадрів, великою кількістю кутів огляду та високою просторовою деталізацією. Уявіть конференцію, де всі

учасники представлені у вигляді голограм, які відображають не лише зовнішність, а й міміку та жести в реальному часі. Такі технології відкриють нові можливості у дистанційній освіті, медицині (наприклад, консультації хірургів), шоу-бізнесі та розвагах. Для порівняння: трансляція голографічного концерту у форматі високої якості може потребувати понад 100 Гбіт/с загального каналу.

3. Тактильний інтернет

Ще одним проривом стане розвиток так званого тактильного інтернету. Якщо відео дозволяє бачити, а аудіо — чути, то тактильний інтернет дозволить «відчувати» взаємодію на відстані. Це означає, що лікар зможе здійснювати дистанційні операції, відчуваючи опір тканин під час хірургічного втручання, а інженер — керувати роботом за тисячі кілометрів, отримуючи зворотний тактильний сигнал. Для цього потрібна наднизька затримка — не більше 1 мс і надійність зв’язку рівня 99,9999 % (six nines reliability). Це вимоги, які перевищують можливості навіть найкращих реалізацій 5G. Окрім медицини, тактильний інтернет знайде застосування у сфері автономного транспорту, промислових роботизованих систем та віртуальних середовищ навчання.

4. Розширений Інтернет речей (IoT)

6G має забезпечити підтримку десятків мільйонів пристроїв на квадратний кілометр, тоді як у 5G ця цифра обмежується приблизно 1 млн. Основний акцент робиться на енергоефективності. Йдеться про появу сенсорів zero-power, які взагалі не потребуватимуть батарей, оскільки збиратимуть енергію з довкілля: радіохвиль, сонячного світла, вібрацій, перепадів температури. Наприклад, у «розумному місті» такі сенсори можна буде розмістити у дорожньому покритті, мостах, будівлях чи транспорті — вони будуть відстежувати трафік, стан інфраструктури, якість повітря й передавати дані без жодного обслуговування протягом десятків років. У сільському господарстві zero-power сенсори допоможуть у моніторингу ґрунтів і врожайності на величезних площах, роблячи виробництво більш екологічним і точним.

5. Цифрові двійники та інтелектуальне управління мережею

Окремим напрямом є застосування цифрових двійників (digital twins) телекомунікаційних мереж. Це цифрові копії реальної інфраструктури, які в режимі реального часу отримують дані з тисяч датчиків та аналітичних систем. Поєднання з алгоритмами штучного інтелекту дозволить таким двійникам самостійно моделювати роботу мережі, прогнозувати навантаження, виявляти ризики відмов і приймати рішення щодо оптимізації використання спектра. Наприклад, якщо система прогнозує пікове навантаження у певному районі міста, вона може заздалегідь переналаштувати параметри базових станцій або перенаправити трафік через сусідні вузли. У майбутньому цифрові двійники стануть основою для самоорганізованих мереж (Self-Organizing Networks, SON), де людське втручання буде мінімальним.

6. Нові сценарії застосування

6G також відкриє шлях до реалізації низки футуристичних сценаріїв, серед яких:

- Голографічний транспорт, де автомобілі, літаки чи дрони обмінюватимуться 3D-картами в реальному часі для підвищення безпеки;
- Інтеграція з квантовими комунікаціями, що забезпечить майже абсолютний рівень захисту інформації;
- Глобальне покриття через NTN (Non-Terrestrial Networks), яке об’єднає наземні базові станції, низькоорбітальні супутники та високоплатформні дрони, роблячи зв’язок доступним навіть у найвіддаленіших куточках планети;
- Багатокористувацькі XR-платформи (Extended Reality), які дадуть змогу занурюватися у повністю віртуалізовані простори з тисячами учасників одночасно.

Таблиця 4.1

Порівняльні параметри 5G та 6G

Параметр	**5G**	**6G (очікувано)**
Пікова швидкість передачі	10–20 Гбіт/с	0,5–1 Тбіт/с
Середня затримка	5–10 мс	≤ 0,1 мс
Щільність підключень (IoT)	до 1 млн/км²	десятки млн/км²
Надійність (availability)	99,999 %	99,9999 % і вище
Енергоефективність	оптимізована для смартфонів	zero-power сенсори, ультраекономія
Сценарії використання	мобільний інтернет, IoT, автономний транспорт	голографічні комунікації, тактильний інтернет, цифрові двійники, NTN

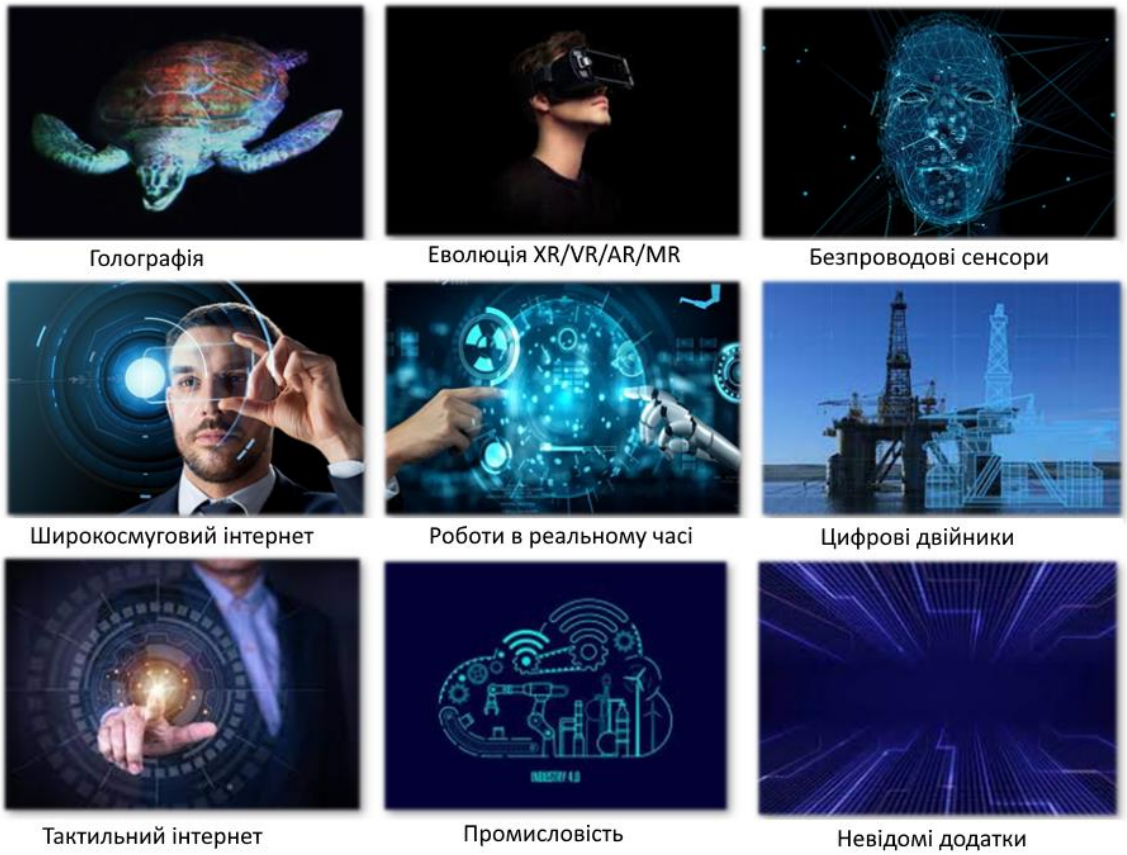


Рис. 4.8 Можливості використання 6G

Якщо розглядати перспективи розвитку в комплексі, стає очевидним, що системи зв’язку 6G повинні відіграти ключову роль у переході найрізноманітніших галузей індустрії до цифрового формату. Це означає не лише удосконалення вже наявних сервісів, а й створення абсолютно нових можливостей для промисловості, транспорту, медицини, енергетики, освіти та сфери розваг. У зв’язку з цим спектр вимог до мереж шостого покоління суттєво розшириться, а їхні кількісні характеристики значно перевищуватимуть показники попередніх технологій.

По-перше, надзвичайно високі вимоги стосуватимуться швидкості передавання даних. Якщо 5G забезпечує пікові швидкості у десятки гігабіт за секунду, то для 6G очікується підтримка пікових значень на рівні сотень гігабіт і навіть терабіт за секунду. Водночас для практичного використання важливими будуть не стільки рекордні показники, скільки стабільні середні швидкості, які реально доступні користувачеві у будь-який час і в будь-якому місці. Саме це стане ключовим фактором для забезпечення якісного користувацького досвіду.

По-друге, зростатимуть вимоги до зони покриття. У перспективі 6G має інтегруватися з супутниковими системами зв’язку та високоплатформними дронами (HAPS), що дозволить забезпечувати радіус покриття у сотні кілометрів. Це критично важливо для віддалених і важкодоступних регіонів, де традиційне наземне розгортання мереж є економічно невигідним або технічно складним.

По-третє, на перший план виходить енергоефективність. Для кінцевих користувачів, які активно споживають широкосмуговий інтернет зі смартфонів, питання тривалості автономної роботи пристрою часто є навіть важливішим, ніж швидкість передавання. Тому 6G повинна забезпечити оптимізацію енергоспоживання як у самих пристроях, так і на рівні мережевої інфраструктури.

По-четверте, значно зростатимуть вимоги до надійності та затримки. Для промислового інтернету речей (Industrial IoT), систем управління транспортом, телемедицини чи енергетичних мереж навіть невелика затримка чи короткочасний збій можуть мати критичні наслідки. У цьому контексті 6G повинна гарантувати затримку на рівні часток мілісекунди та практично безперебійну доступність сервісу на рівні 99,9999 % і вище.

І, нарешті, можна з високою ймовірністю передбачити появу нових вимог або їхніх комбінацій, які не мають аналогів у сучасних системах. Йдеться про підтримку голографічних комунікацій, цифрових двійників, тактильного інтернету, а також інтеграцію з квантовими мережами та штучним інтелектом. Для таких застосувань знадобляться унікальні комбінації параметрів — наприклад, одночасна підтримка надвисокої швидкості, мінімальної затримки та ультранизького рівня енергоспоживання.



Рис. 4.9 Основні аспекти технічних характеристик в 6G

Таким чином, системи зв’язку 6G можна розглядати як технологічну основу для глобальної цифрової трансформації. Вони мають стати універсальною платформою, здатною адаптуватися під потреби як масового користувача, так і промислових секторів, що вимагають найвищого рівня надійності та продуктивності.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи на тему *«ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МЕРЕЖ 5G/6G»* було проведено комплексний аналіз еволюції мобільних систем зв’язку, починаючи з перших аналогових технологій і до сучасних тенденцій у 6G. Показано, що кожне покоління суттєво розширювало можливості мобільних мереж: від передачі голосу у 1G до широкосмугового інтернету у 4G, масового впровадження Інтернету речей та критично важливих сервісів у 5G. Очікується, що 6G забезпечить надвисокі швидкості на рівні сотень гігабіт або навіть терабіт за секунду, наднизькі затримки (до десятих часток мілісекунди) та інтеграцію наземних і супутникових систем.

Особливу увагу приділено аналізу спектра частот. Якщо 4G працювало переважно в діапазоні до 2,5 ГГц, а 5G підняло межу до 3,5 ГГц та міліметрового діапазону до 60 ГГц, то 6G планує використання нових смуг 7–13 ГГц та субтерагерцового діапазону. Це відкриває можливості для значного зростання пропускної здатності, але створює виклики у вигляді високих втрат сигналу та обмеженого радіуса дії.

Важливу роль у подоланні цих проблем відіграють антени з багатьма елементами. У 5G реалізовано технлогію Massive MIMO з використанням сотень антенних елементів, що дозволяє формувати вузькі промені та створювати кілька просторових каналів. У 6G ця концепція переходить у формат Extreme MIMO (XMIMO), який передбачає тисячі антенних елементів на базовій станції. XMIMO забезпечує обслуговування десятків користувачів у межах одного каналу, створення багатьох паралельних потоків для одного пристрою, зниження рівня перешкод і навіть виконання функцій зондування та локалізації.

Встановлено, що інтеграція супутникових систем і наземних мереж (NTN) є одним із ключових напрямів розвитку 6G. Вона дозволить створити глобальне безшовне покриття, особливо у віддалених регіонах, для транспорту й аварійних ситуацій.

Окрему увагу приділено енергоефективності. Для смартфонів важливим є зниження енергоспоживання приймально-передавальних модулів, тоді як для Інтернету речей перспективними є сенсори з нульовим споживанням енергії (zero-power), що отримують живлення від довкілля.

У процесі дослідження розглянуто також роль організації 3GPP у стандартизації. Показано, що розвиток 5G та майбутнього 6G відзначається залученням широкого кола компаній: від операторів зв'язку до автовиробників, авіаційної галузі й підприємств автоматизації. Це підтверджує, що 6G стане універсальною платформою не лише для телекомунікацій, а й для розвитку всієї цифрової економіки.

Таким чином, зроблено такі основні узагальнення:

- підвищення пропускної здатності є результатом комплексного підходу — розширення спектра частот, удосконалення антенних технологій та інтеграції нових архітектурних рішень;
- MIMO і його розвиток у вигляді Extreme MIMO є ключовими методами для роботи у високочастотних діапазонах і забезпечення багатопроменевого зв'язку;
- використання субтерагерцового спектра та NTN забезпечить глобальне покриття й нові сценарії застосування;
- питання енергоефективності та появи zero-power пристроїв набувають стратегічного значення;
- розвиток 6G потребує координації зусиль різних галузей, стандартизації та міжнародної співпраці.

Отже, системи 5G/6G є не лише наступним етапом розвитку мобільних комунікацій, а й платформою для глобальної цифрової трансформації, що визначатиме майбутнє економіки та суспільства у найближчі десятиліття.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Dai, L., Wang, B., Ding, Z., Wang, Z., Chen, S. Non-Orthogonal Multiple Access for 5G and Beyond. Springer, 2020. – монографія, що описує методи NOMA як базу для підвищення пропускної здатності.
2. Zhang, N., et al. 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. Springer, 2021. – книга, що узагальнює технології 6G, серед яких основні методи підвищення ємності.
3. Clerckx, B., Mao, Y., Li, V. Rate-Splitting Multiple Access for 6G Networks. Cambridge University Press, 2023. – систематизоване дослідження RSMA як перспективної технології збільшення пропускної здатності.
4. Sun, S., Chen, S., Ding, Z. 5G and Beyond: Fundamentals and Standards. Springer, 2021. – книга про основні принципи 5G, включно зі спектральною ефективністю.
5. Shaik, R. B. AI/ML-aided Capacity Maximization Strategies for URLLC in 6G. Computer Networks, Elsevier, 2024. – застосування AI/ML для підвищення ємності URLLC.
6. Capacity Enhancement of Flying-IRS Assisted 6G THz Network using Deep Reinforcement Learning. ResearchGate, 2023. – підхід з DRL для оптимізації мереж THz з IRS.
7. Puspitasari, A. A., et al. Emerging Technologies for 6G Communication Networks. Electronics, 2023. – огляд нових технологій для мереж 6G.
8. Li, P., et al. Exploring the Key Technologies and Applications of 6G. iScience, Elsevier, 2025. – аналіз основних технологій і можливостей 6G.
9. Akbar, M. S., et al. On Challenges of Sixth-Generation (6G) Wireless Networks. Computer Networks, Elsevier, 2025. – виклики та перспективи впровадження 6G.
10. Sudhamani, C., et al. A Survey on 5G Coverage Improvement Techniques. Sensors, 2023. – огляд методів покращення покриття 5G.
11. Qadir, Z., et al. Towards 6G Internet of Things: Recent Advances, Use Cases, and Performance Requirements. Digital Communications and Networks, Elsevier, 2023. – IoT у 6G, вимоги до продуктивності.

12. Kamal, M. A., et al. Resource Allocation Schemes for 5G Network: Survey. Sensors, 2021. – огляд схем розподілу ресурсів у 5G.
13. Aldrees, A., et al. Optimization of 6G Resource Allocation Using CyberTwin. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2025. – нові підходи до оптимізації ресурсів у 6G.
14. Jagannath, A., Jagannath, J., Melodia, T. Redefining Wireless Communication for 6G: Signal Processing Meets Deep Learning with Deep Unfolding. arXiv preprint, 2020. – поєднання обробки сигналів і DL для 6G.
15. He, H., Yu, X., Zhang, J., Letaief, K. B. Cell-Free Massive MIMO for 6G Wireless Communication Networks. arXiv preprint, 2021. – концепція Cell-Free Massive MIMO для 6G.
16. Chen, S., Sun, S., Xu, G., Su, X., Cai, Y. Beam-Space Multiplexing: Practice, Theory, and Trends — From 4G TD-LTE, 5G, to 6G and Beyond. arXiv preprint, 2020. – розвиток beam-space мультиплексування.
17. Zhao, J., et al. A Survey of Intelligent Reflecting Surfaces (IRSs): Towards 6G Wireless Communication Networks. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019. – огляд IRS як ключової технології 6G.
18. Emerging Technologies and Challenges to Move Towards 6G. International Journal of Communication Systems, Wiley, 2025. – огляд технологій і викликів 6G.
19. Farhat, S., et al. Unveiling Challenges in Migrating from 5G to 6G. In: Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer, 2023. – виклики переходу від 5G до 6G.
20. Siddiky, M. N. A., et al. A Comprehensive Exploration of 6G Wireless Trends. Computers, MDPI, 2025. – всебічний огляд тенденцій 6G.
21. 5G Americas. The 6G Upgrade in the 7–8 GHz Spectrum Range. 5G Americas White Paper, 2023. – аналітичний звіт про використання діапазону 7–8 ГГц.
22. ITU-R Report M.2516. Future Technology Trends of Terrestrial IMT Systems Towards 2030 and Beyond. ITU, 2022. – офіційний огляд майбутніх трендів IMT-систем.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МЕРЕЖ 5G/6G

ВИКОНАВ:
СТУДЕНТ ГРУПИ ТСДМ-62
ЄВГЕН КАРПІНСЬКИЙ

МЕТА РОБОТИ ТА АКТУАЛЬНІСТЬ

Мета роботи – розробити та обґрунтувати підходи до підвищення пропускної здатності телекомунікаційних систем наступних поколінь (5G/6G) шляхом використання нових діапазонів частот, антенних технологій та інтеграції супутникових і наземних мереж.

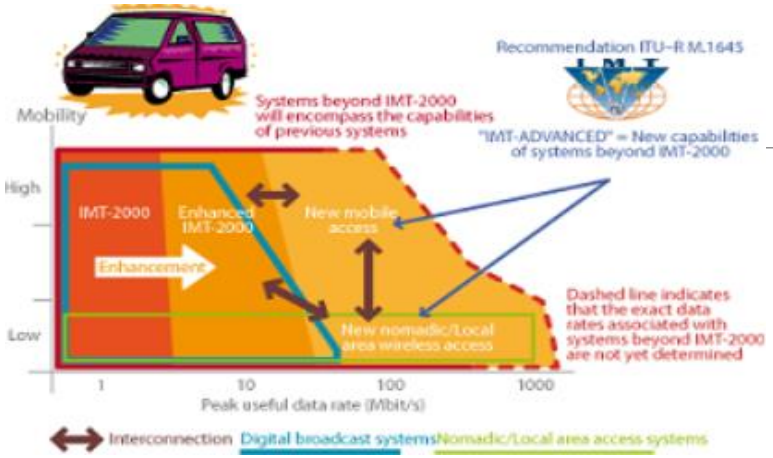
Об’єкт дослідження – телекомунікаційні системи та мережі п’ятого і шостого поколінь мобільного зв’язку.

Предмет дослідження – методи, технології та технічні рішення, що забезпечують підвищення пропускної здатності, енергоефективності та надійності мереж 5G/6G, включно з використанням терагерцового діапазону, багатоелементних антенних решіток (MIMO/XMIMO) та інтеграції з супутниковими системами.

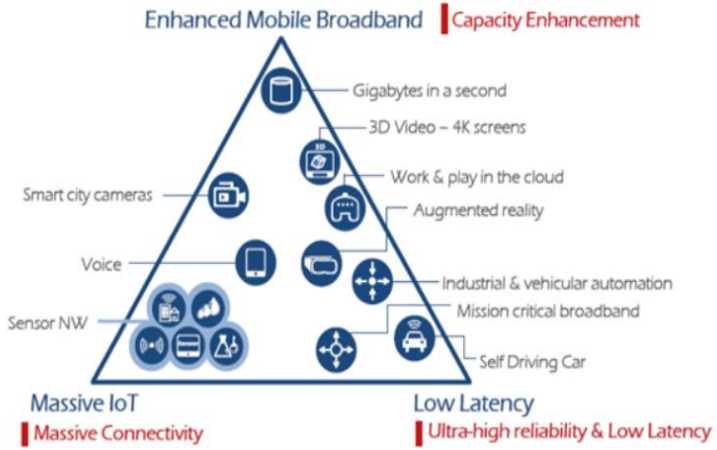
Актуальність:

Тема роботи є актуальною, тому що розвиток телекомунікаційних систем та мереж є однією з ключових рушійних сил цифрової трансформації сучасного суспільства. Від перших аналогових технологій до мереж п’ятого покоління мобільні комунікації пройшли шлях від забезпечення лише голосових дзвінків до комплексної платформи для мультимедійних сервісів, Інтернету речей, автономного транспорту та індустріальної автоматизації. Кожне нове покоління супроводжувалося зростанням швидкості передавання даних, зменшенням затримок, підвищенням надійності та інтеграцією нових видів сервісів.

Вимоги 6G зв’язку



Концепція IMT-Advanced (для 4G) отримала назву The Van Diagram через схожість з автомобілем



Концепція IMT-2020 для 5G

3G (IMT-2000) забезпечило голос та базові мобільні дані.

4G (IMT-Advanced) дало сотні Мбіт/с, повністю пакетну архітектуру та IP-сервіси.

5G (IMT-2020) охопило три сценарії: eMBB, mMTC, URLLC, підтримуючи гігабітні швидкості, мільйони IoT-з’єднань та критично надійний зв’язок.

Очікується, що **6G (IMT-2030)** забезпечить:

- терабітні швидкості та затримку <0,1 мс;
- щільність IoT до кількох мільйонів пристроїв/км²;
- використання терагерцового спектра;
- глибоку інтеграцію ШІ;
- підтримку голографічного зв’язку, цифрових двійників і квантових мереж.

КЛЮЧОВІ ОСОБЛИВОСТІ 6G



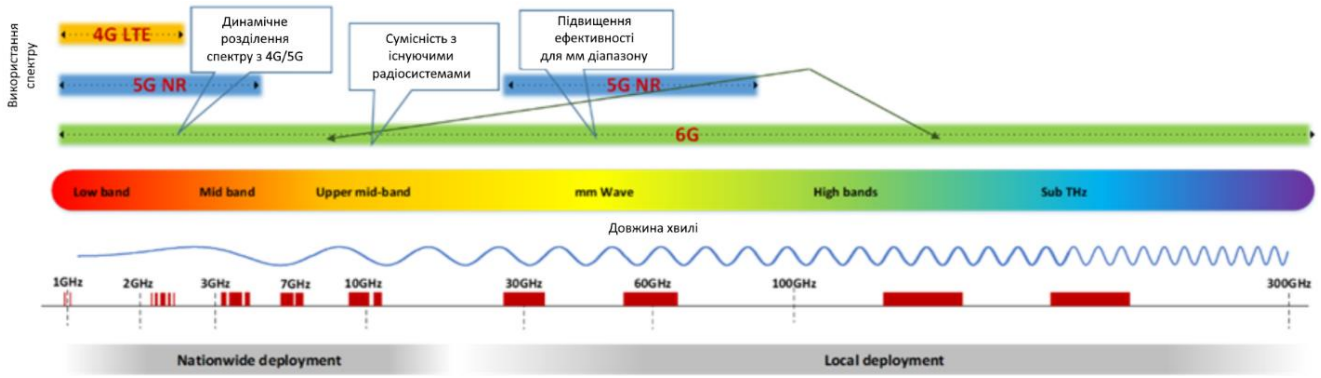
Спектр можливих технічних рішень в 6G

6G нині є набором перспективних концепцій, серед яких ключові напрями:

- **Інтеграція ШІ** для автоматизованого керування, прогнозування й самовідновлення мереж.
- **Нові частоти (100 ГГц – 1 ТГц)**, що забезпечать терабітні швидкості, але потребують нових антен і матеріалів.
- **Супутникова інтеграція (LEO)** для глобального покриття та єдиного інтернету.
- **Нові пристрої**: імпланти, мікросенсори, голографічні та цифрові двійники.
- **Функції локалізації та зондування** з точністю до сантиметрів.

Отже, 6G — це багатовимірна екосистема з надшвидкостями, мінімальними затримками, інтеграцією наземних і космічних систем, масштабною підтримкою пристроїв та всепроникним ШІ, яка стане фундаментом цифрової інфраструктури майбутнього.

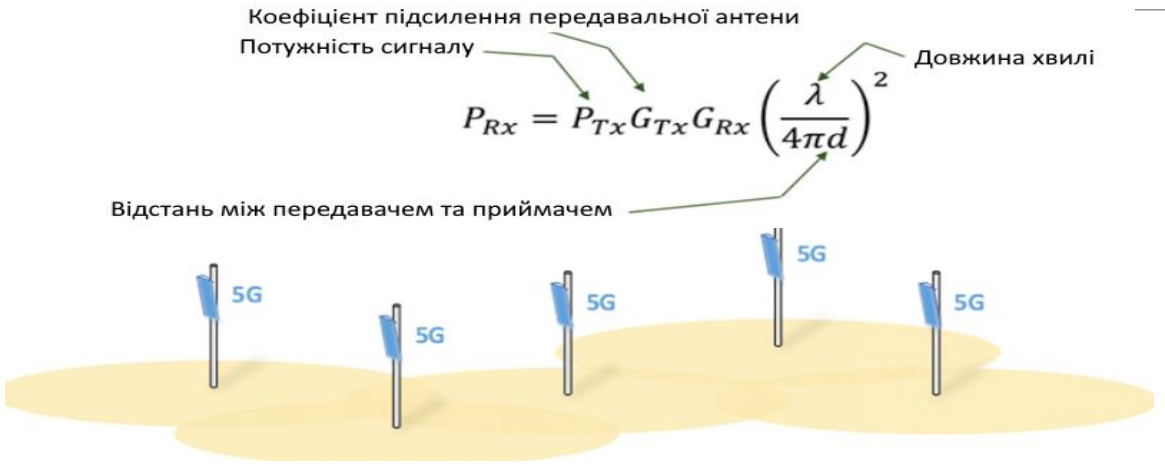
Дослідження спектрів



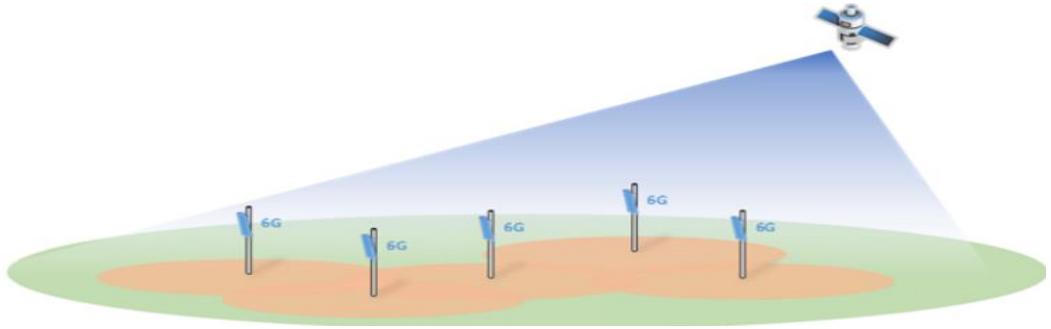
Приблизні діапазони частот, які використовувалися різними поколіннями систем зв'язку

- Еволюція мобільних систем тісно пов’язана з освоєнням нових спектрів. 4G працювало до 3,5 ГГц, 5G додало міліметрові хвилі до 60 ГГц, а 6G використовуватиме 7–13 ГГц і субтерагерцовий діапазон. Це забезпечить терабітні швидкості, але вимагатиме щільної інфраструктури, нових антен і глобальної координації. Нові частоти стануть основою для голографічних комунікацій, IoT та інтеграції з супутниками.

Проблема зменшення зони покриття



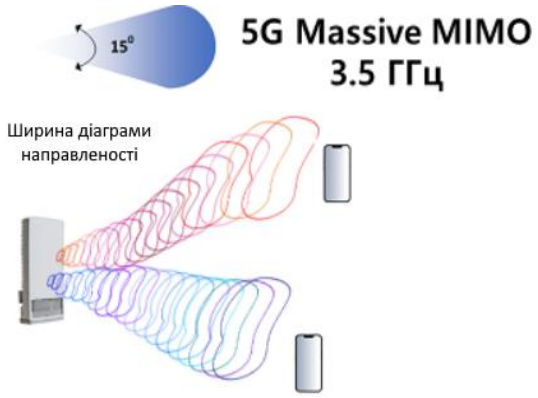
Стандартна зона покриття базових станцій



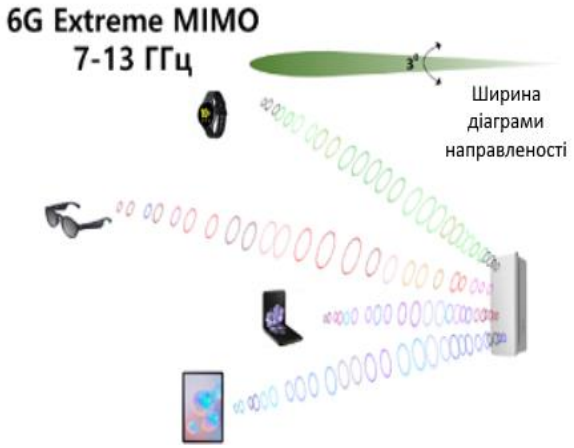
Концепція Non-Terrestrial Networks (NTN)

- Використання високочастотних діапазонів у 6G забезпечує більшу пропускну здатність, але супроводжується сильнішими втратами сигналу й зменшенням радіуса дії базових станцій. Це вимагає щільнішого розгортання мережі, що підвищує витрати, особливо в регіонах із низькою щільністю населення.
- Розв’язанням проблеми стає інтеграція супутникових систем, які забезпечують глобальне покриття незалежно від інфраструктури. Концепція Non-Terrestrial Networks (NTN) передбачає поєднання наземних і супутникових каналів із автоматичним перемиканням користувача та оптимізованим розподілом спектра.
- Хоча виклики залишаються — затримки у геостаціонарних супутниках чи допплерівський зсув у LEO-системах — сучасні технології поступово їх вирішують. У результаті інтеграція NTN у 6G дозволить створити глобальну телекомунікаційну екосистему з універсальним доступом до інтернету.

Використання антенних решіток (XMIMO - Extreme MIMO)



Massive MIMO



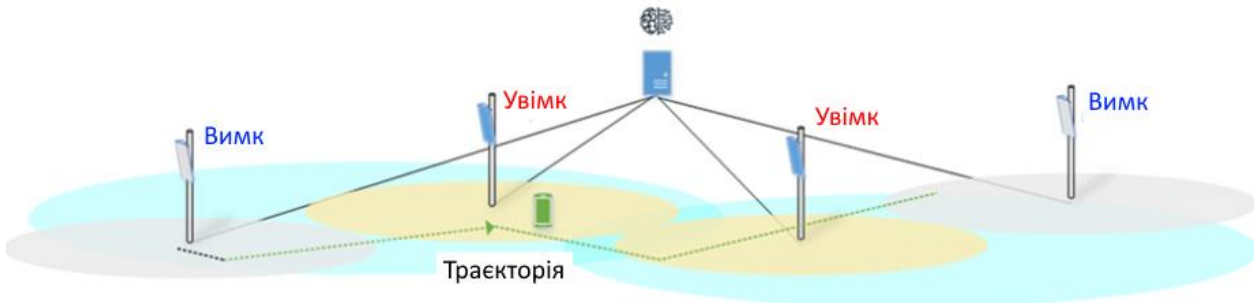
Extreme MIMO (XMIMO)

Антенні решітки дозволяють формувати спрямоване випромінювання (beamforming), підвищуючи підсилення, зменшуючи завади та забезпечуючи гнучке керування сигналом.

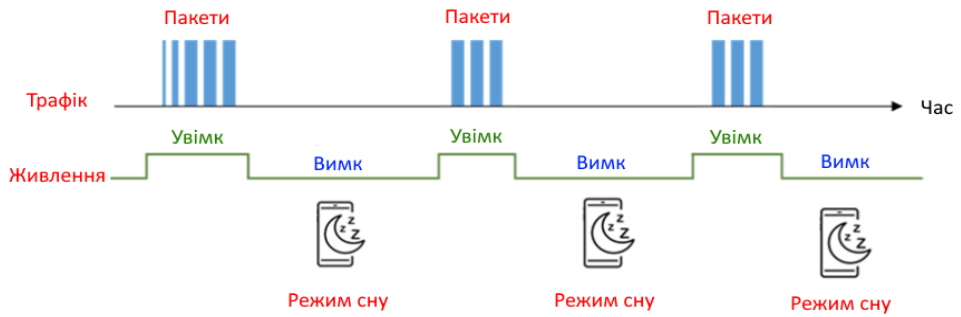
MIMO створює кілька просторових каналів у межах однієї частоти, компенсує втрати на високих частотах і підвищує швидкість. У 5G застосовується **Massive MIMO** з сотнями антен, що значно збільшує пропускну здатність.

У 6G очікується використання **Extreme MIMO (XMIMO)** з тисячами антенних елементів у субтерагерцовому діапазоні. Це забезпечить масове обслуговування користувачів, багатопроменеву передачу для одного пристрою, підвищену спектральну ефективність, інтеграцію функцій зондування та компенсацію втрат сигналу.

Енергоефективність систем



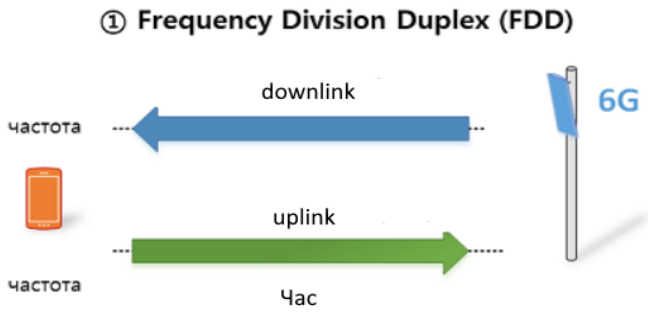
Динамічне керування активністю радіоблоків базових станцій



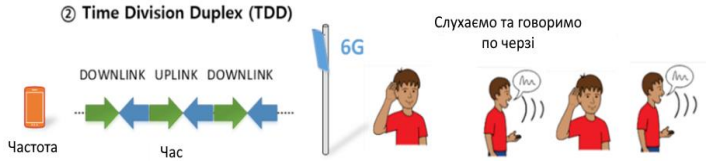
Проблеми енергоефективності для звичайних смартфонів

- Енергоефективність є ключовим фактором для операторів і користувачів, тому в 6G передбачено нові методи енергозбереження. Серед них — динамічне відключення радіоблоків базових станцій і використання ШІ для прогнозування навантаження.
- Важливим напрямом є розвиток zero-power сенсорів, що отримують енергію з навколишнього середовища (радіохвиль, вібрацій, сонця, руху). Це дозволить створювати щільні мережі IoT без заміни батарейок.
- Для смартфонів актуальним залишається зниження енергоспоживання приймальних модулів та оптимізація автономної роботи.
- Отже, енергоефективність у 6G стає стратегічним пріоритетом, що забезпечує баланс між продуктивністю і мінімальними витратами енергії.

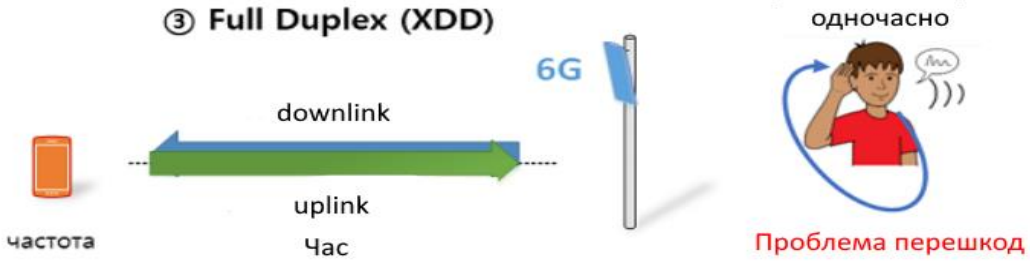
Повний дуплекс у системах 6G



Частотний поділ - Frequency Division Duplex (FDD). Висхідний і низхідний канал використовують різні частоти



Тимчасовий поділ - Time Division Duplex (TDD). Висхідний і низхідний канал використовують ту саму частоту в різний час



Повний дуплекс

- Одним із перспективних напрямів 6G є повний дуплекс (Full Duplex), що дозволяє одночасно передавати й приймати сигнали на одній частоті. Це може подвоїти ефективність використання спектра та зменшити затримки. У нинішніх мережах застосовують FDD (різні частоти для UL/DL) та TDD (спільна частота, але почерговий час), що обмежує ресурси.
- Повний дуплекс усуває ці обмеження: базова станція може одночасно обслуговувати прийом і передачу, що важливо для тактильного інтернету, автономного транспорту й автоматизації. Основна проблема — завади від власного сигналу, які ускладнюють прийом. Для їх подолання використовують просторове рознесення антен, формування променя та алгоритми активної компенсації.
- Реалізація повного дуплексу є складним завданням, але відкриває шлях до істотного зростання пропускної здатності й гнучкості мереж 6G.

ВИСНОВКИ

- Особливу увагу приділено спектру частот: 6G орієнтується на діапазони 7–13 ГГц і субтерагерц, що дає великі можливості, але вимагає нових рішень через високі втрати сигналу. Ключовим інструментом стає Extreme MIMO з тисячами антенних елементів, що забезпечує багатопроменевий зв’язок і функції зондування.
- Встановлено перспективність інтеграції наземних і супутникових мереж (NTN) та розвиток енергоефективних технологій, зокрема zero-power сенсорів. Показано роль 3GPP і міжнародної співпраці у стандартизації.
- Основні висновки: підвищення пропускної здатності досягається завдяки новим спектрам і MIMO; NTN і субтерагерцовий діапазон забезпечать глобальне покриття; енергоефективність і координація зусиль різних галузей є стратегічними факторами. Отже, 5G/6G — це не лише нові технології зв’язку, а й універсальна платформа цифрової трансформації.

Дякую за увагу!

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: Євген КАРПІНСЬКИЙ

Назва: ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МЕРЕЖ 5G/6G

Координатор: Вікторія КОРЕЦЬКА

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:0.12

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*