ВСТУП

Актуальність теми. Поява технології Нового радіо (NR) п'ятого покоління (5G) стала трансформаційним стрибком у сфері бездротового зв'язку, що зумовлено потребою в безпрецедентних швидкостях передачі даних, наднадійних з'єднаннях з низькою затримкою та масовому підключенні пристроїв. Центральним елементом цих досягнень є технологія множинних входів і виходів (MIMO), яка використовує кілька антен як на передавальному, так і на приймальному кінцях для підвищення пропускної здатності системи та спектральної ефективності.

Впровадження масивних антенних систем (Massive MIMO) та методів формування променя (beamforming) дозволяє фокусувати енергію сигналу безпосередньо на користувачах, що значно покращує покриття та ємність мережі. Проте ефективність цих технологій суттєво залежить від конфігурації антен, точності інформації про стан каналу (CSI) та особливостей поширення сигналів у різних діапазонах, зокрема mmWave. Необхідність пошуку оптимальних параметрів MIMO-систем для максимізації пропускної здатності в умовах реального розгортання мереж 5G зумовлює актуальність даної магістерської роботи.

Мета дослідження — провести комплексне дослідження MIMO технологій у мережах 5G та оцінити їхній вплив на збільшення пропускної здатності шляхом математичного моделювання та аналізу різних сценаріїв розгортання.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати архітектуру та технічні характеристики 5G NR, включаючи нумерологію та сценарії використання (eMBB, URLLC, mMTC).
2. Вивчити концепції та класифікацію MIMO-технологій, а також математичні основи функціонування каналів зв'язку.
3. Розробити методику моделювання MIMO-сценаріїв із застосуванням стандартів 3GPP.
4. Дослідити вплив кількості антен, рангу каналу та точності CSI на пропускну здатність мережі.

5. Сформулювати практичні рекомендації щодо оптимізації MIMO-конфігурацій для підвищення ефективності мереж 5G.

Об’єкт дослідження — процеси передачі даних у мобільних мережах п’ятого покоління із застосуванням технологій багатоантенного доступу.

Предмет дослідження — методи просторового мультиплексування, формування променя та конфігурації антенних систем (SU-MIMO, MU-MIMO, Massive MIMO), що визначають пропускну здатність 5G.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використано методи системного аналізу, математичне моделювання бездротових каналів на основі розкладання за сингулярними значеннями (SVD), а також імітаційне моделювання сценаріїв поширення сигналу в діапазонах Sub-6 ГГц та mmWave.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні методики оцінювання ефективності MIMO-сценаріїв для мереж 5G, що враховує динаміку зміни стану каналу та похибки CSI, а також у визначенні оптимальних порогів просторової кореляції для збереження високої пропускної здатності.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці конкретних рекомендацій щодо формування оптимальних антенних решіток (UPA) та визначенні необхідних інтервалів оновлення CSI для різних рівнів мобільності користувачів, що може бути використано при плануванні та оптимізації мереж 5G операторами зв'язку

1. ОСОБЛИВОСТІ ТА АРХІТЕКТУРА МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ (5G)

1.1. Сутність і технічні характеристики 5G NR у контексті пропускної здатності

Поява технології нового радіо (NR) п'ятого покоління (5G) означає трансформаційний стрибок у бездротовому зв'язку, значною мірою зумовлений потребою в безпрецедентних швидкостях передачі даних, наднадійних з'єднаннях з низькою затримкою та масовому підключенні пристроїв. Центральним елементом цих досягнень є концепція пропускної здатності, яка визначає пропускну здатність та ефективність передачі даних у мережі. Розуміння сутності 5G NR та його технічних характеристик, пов'язаних із пропускною здатністю, має вирішальне значення для розуміння того, як ця технологія відповідає різноманітним вимогам сучасних цифрових застосувань. У цьому есе досліджуються фундаментальні принципи 5G NR, його унікальні технічні характеристики, зосереджені на оптимізації пропускної здатності, а також складні методи форми хвилі та модуляції, що лежать в основі його спектральної ефективності [1].

5G NR, або 5G New Radio, – це глобальний стандарт для п'ятого покоління бездротового зв'язку, розроблений для забезпечення гнучких, високопродуктивних та масштабованих мережевих рішень. Він характеризується здатністю адаптуватися до широкого спектру сценаріїв розгортання, починаючи від щільного міського середовища і закінчуючи сільською місцевістю, використовуючи різноманітні діапазони частот та спектральні ресурси. Пропускна здатність – ширина частотного спектру, виділеного для передачі – відіграє ключову роль у продуктивності 5G NR, безпосередньо впливаючи на пропускну здатність даних, затримку та ємність мережі. Наприклад, ширші розподіли пропускної здатності можуть підтримувати вищі швидкості передачі даних, що є важливим для таких застосувань, як потокове відео 4K/8K, доповнена реальність та промислова автоматизація. Крім того, мінливість розподілу пропускної здатності в різних розгортаннях дозволяє

мережевим операторам адаптувати свою інфраструктуру до конкретних потреб, будь то використання міліметрових хвильових частот для надшвидкісних послуг у міських центрах чи використання діапазонів менше 1 ГГц для ширшого покриття в сільській місцевості.

Важливою інновацією архітектури 5G NR є впровадження масштабованої нумерології, яка дозволяє мережі гнучко адаптуватися до різних частотних діапазонів та специфічних вимог щодо затримки. На відміну від попередніх поколінь зв'язку, 5G пропонує кілька варіантів інтервалу між піднесучими — від 15 кГц до 240 кГц, що дозволяє оптимізувати передачу даних як для широкого покриття на низьких частотах, так і для забезпечення надвисокої пропускної здатності в міліметровому діапазоні. Вибір конкретної нумерології безпосередньо впливає на тривалість символу та стійкість до перешкод. Основні параметри та сценарії використання нумерології 5G NR наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Параметри масштабованої нумерології 5G NR

Інтервал між піднесучими (SCS)	Технічні характеристики та переваги	Типові сценарії розгортання
15 кГц	Довший час передачі, велика зона покриття, стійкість до багатопроменевого згасання.	Низькочастотне покриття (Sub-1 ГГц), сільська місцевість.
30 кГц / 60 кГц	Баланс між затримкою та спектральною ефективністю; оптимізація міських розгортань.	Середньочастотні діапазони (Sub-6 ГГц), щільна міська забудова.
120 кГц / 240 кГц	Мінімальна затримка, надвисока пропускна здатність, ефективне придушення фазових шумів.	Високочастотні сценарії (mmWave), гарячі точки, промислова автоматизація.

Ця гнучкість підкреслює важливість пропускної здатності як фундаментального фактора універсальності та продуктивності 5G. Технічна архітектура 5G NR пропонує кілька інноваційних функцій, що сприяють гнучкому та ефективному використанню пропускної здатності. Однією з таких функцій є використання масштабованої нумерології, яка забезпечує кілька варіантів інтервалу

між піднесучими — від 15 кГц до 240 кГц — що дозволяє мережі адаптуватися до різних діапазонів частот та вимог до затримки. Ця масштабованість означає, що вужчі інтервали між піднесучими підходять для низькочастотного покриття з великою зоною покриття з довшим часом передачі, тоді як ширші інтервали оптимізують високочастотні сценарії з високою пропускною здатністю, зменшуючи перешкоди та забезпечуючи вищу швидкість передачі даних. Крім того, коригування інтервалу між піднесучими допомагає оптимізувати ефективність використання спектру, мінімізуючи перешкоди та максимізуючи використання доступного спектру. Ще однією важливою функцією є динамічне розподілення спектру (DSS), яке дозволяє мережам 5G та 4G співіснувати в одному діапазоні частот, динамічно розподіляючи пропускну здатність на основі попиту в режимі реального часу. Ця можливість покращує використання пропускної здатності, забезпечуючи безперебійний перехід та співіснування, зменшуючи втрату ресурсів спектру та підтримуючи поступову модернізацію мережі без необхідності виділення спеціального спектру лише для 5G. Такі технологічні інновації ілюструють, як конструкція 5G NR максимізує потенціал доступної пропускної здатності, обслуговуючи широкий спектр послуг та середовищ розгортання.

Гнучке управління пропускною здатністю 5G NR підтримують передові методи сигналів та модуляції, які значно підвищують спектральну ефективність. Ортогональне частотне мультиплексування (OFDM) служить основною формою сигналу для 5G NR, забезпечуючи стійкість до багатопроменевих згасань та забезпечуючи високі швидкості передачі даних завдяки ефективному використанню спектру. OFDM розділяє доступну пропускну здатність на численні ортогональні піднесучі, які можна індивідуально модулювати для передачі даних, що дозволяє гнучко розподіляти пропускну здатність та ефективно керувати перешкодами. OFDM доповнюють складні схеми модуляції, такі як 256-QAM (квадратурна амплітудна модуляція), які значно збільшують кількість бітів, що передаються на символ, тим самим підвищуючи пропускну здатність даних без необхідності додаткової пропускної здатності. Наприклад, використання 256-QAM теоретично може досягти чотирикратного збільшення швидкості передачі даних

порівняно з 64-QAM, за умови достатнього співвідношення сигнал/шум (SNR). Ці методи мають глибокі наслідки для використання пропускної здатності — вони дозволяють забезпечувати вищі швидкості передачі даних в межах обмеженого спектру та покращують спектральну ефективність, що є життєво важливим, враховуючи скінченність доступних спектральних ресурсів. Отже, поєднання OFDM та схем модуляції високого порядку формує основу здатності 5G NR забезпечувати швидкий, надійний та ефективний бездротовий зв'язок [2].

Ефективний розподіл спектру та управління пропускною здатністю є фундаментальними для максимізації продуктивності мереж 5G NR. Екосистема 5G використовує широкий спектр спектральних смуг, в основному класифікованих на міліметрові хвилі (mmWave) та діапазони нижче 6 ГГц. Міліметровий спектр, який зазвичай працює вище 24 ГГц, пропонує надзвичайно широкі пропускні здатності — часто сотні мегагерц — що сприяє надвисоким швидкостям передачі даних, ідеальним для щільного міського середовища та сценаріїв з високою пропускною здатністю. І навпаки, діапазони нижче 6 ГГц, які включають частоти нижче 6 ГГц, забезпечують ширше покриття з більш керованими характеристиками поширення, що робить їх придатними для сільської місцевості та покриття великої площі. Для оптимізації використання цих різноманітних спектральних ресурсів використовуються методи динамічного управління спектром. Ці методи передбачають розподіл та перерозподіл пропускної здатності в режимі реального часу на основі мережевого попиту, мобільності користувачів та рівнів перешкод. Такі технології, як зондування спектру, когнітивне радіо та гнучкі алгоритми планування, дозволяють операторам адаптивно розподіляти ресурси спектру, забезпечуючи ефективне використання пропускної здатності та мінімізуючи втрати. Крім того, координація між різними операторами та регуляторними органами відіграє вирішальну роль у спільному використанні спектру та управлінні ресурсами. Спільні стратегії, включаючи оренду спектру, угоди про спільне використання та скоординоване управління перешкодами, допомагають запобігти перевантаженню спектру, підвищити загальну ефективність мережі та врахувати зростаючі потреби в пропускній здатності, зумовлені новими додатками. Ці

стратегії разом лежать в основі масштабованого та гнучкого управління пропускною здатністю, необхідного для динамічного характеру розгортання 5G NR.

Незважаючи на технологічний прогрес, досягнення оптимального використання пропускної здатності в 5G NR стикається з кількома суттєвими викликами. Однією з основних перешкод є обмежена доступність ресурсів спектру, що посилюється регуляторними обмеженнями, що обмежують доступ до певних діапазонів частот та встановлюють вимоги до ліцензування. Ці обмеження вимагають інноваційних підходів для максимального використання існуючого спектру, що часто призводить до складних переговорів щодо політики та регуляторних коригувань. Крім того, в щільних мережевих середовищах, таких як міські центри, управління перешкодами стає все більш важливим. Поширення малих комірок та численних пристроїв, що працюють одночасно, підвищує потенціал для перешкод сигналу, що може погіршити продуктивність мережі та зменшити ефективну пропускну здатність. Такі методи, як формування променя, придушення перешкод та розширене планування, використовуються для зменшення цих проблем, але вони вимагають складної реалізації та координації. Балансування зростаючих вимог до пропускної здатності з необхідністю підтримувати високу якість обслуговування (QoS) ще більше ускладнює ситуацію. Постачальники повинні надавати пріоритет затримці, надійності та пропускній здатності, часто йдучи на компроміси, щоб забезпечити безперебійне функціонування критично важливих програм, одночасно оптимізуючи загальну ємність мережі. Ці проблеми підкреслюють складну взаємодію між технічними, регуляторними та операційними факторами, які впливають на ефективність використання пропускної здатності в реальних розгортаннях 5G NR.

Вплив пропускної здатності на продуктивність 5G NR та розширення спектру його застосувань є суттєвим. Збільшення розподілу пропускної здатності безпосередньо призводить до значного підвищення швидкості передачі даних, що дозволяє швидше завантажувати, плавніше потокове передавання та обробку даних у режимі реального часу. Зменшення затримки, часто цільове нижче 1 мілісекунди,

стає досяжним завдяки ширшим пропускним здатностям та ефективному управлінню спектром, що є важливим для програм, що потребують миттєвої реакції. Такі можливості підтримують послуги з інтенсивним використанням пропускної здатності та критично важливі послуги, включаючи Інтернет речей (IoT), автономні транспортні засоби, дистанційну хірургію та доповнену реальність. Наприклад, екосистеми Інтернету речей залежать від величезної кількості підключених пристроїв, які одночасно передають невеликі пакети даних, що вимагає високої спектральної ефективності та достатньої пропускної здатності. Автономні транспортні засоби покладаються на системи зв'язку з низькою затримкою та високою пропускною здатністю для безпечної та надійної роботи. Заглядаючи в майбутнє, роль пропускної здатності є центральною для майбутньої масштабованості бездротових мереж. Оскільки галузь передбачає еволюцію до 6G, питання пропускної здатності залишатимуться ключовими, стимулюючи розвиток ще ширших діапазонів спектру, більш досконалих методів модуляції та більш складних мережевих архітектур. По суті, постійне розширення та оптимізація ресурсів пропускної здатності формуватиме можливості майбутніх поколінь бездротового зв'язку, гарантуючи, що вони відповідають зростаючим вимогам взаємопов'язаного цифрового світу.

На додаток до фундаментальних методів управління формами хвиль та спектром, останні технологічні інновації значно підвищили ефективність пропускної здатності в 5G NR. Однією з найбільш впливових розробок є технологія масивного множинного входу та виходу (Massive Multiple Input Multiple Output, Massive MIMO), яка використовує великі масиви антен для одночасної передачі кількох потоків даних. Це просторове мультиплексування значно підвищує спектральну ефективність, забезпечуючи вищі швидкості передачі даних в межах однієї смуги пропускання та покращуючи якість сигналу завдяки формуванню променя — сфокусованій передачі, яка спрямовує енергію точно до користувачів. Формування променя не лише покращує силу сигналу та зменшує перешкоди, але й дозволяє ефективніше використовувати доступний спектр, особливо в умовах перевантаженості. Ще одним революційним підходом є сегментація мережі, яка

передбачає поділ однієї фізичної мережі на кілька віртуальних мереж, адаптованих для певних послуг або програм. Кожній сегментації може бути виділена спеціальна пропускна здатність та оптимізована відповідно до її конкретних вимог, що забезпечує надійну роботу для різних випадків використання, таких як автономні транспортні засоби, Інтернет речей або потокове передавання високої чіткості. Більше того, інтеграція штучного інтелекту (ШІ) та алгоритмів машинного навчання в системи управління мережею відкрила нові можливості для динамічна оптимізація пропускної здатності. Аналітика на основі штучного інтелекту може прогнозувати схеми мережевого трафіку, виявляти точки перевантаження та автоматично регулювати розподіл спектру в режимі реального часу, забезпечуючи оптимальне використання пропускної здатності. Ці інновації разом ілюструють, як передові технології розширюють межі спектральної ефективності, дозволяючи мережам 5G задовольняти постійно зростаючі потреби у високошвидкісному та надійному з'єднанні в різних секторах [3].

На завершення, суть 5G NR полягає в його складному підході до використання пропускної здатності для підвищення продуктивності, універсальності та потужності. Його технічні характеристики, такі як масштабована нумерологія, динамічний спільний доступ до спектру та вдосконалені методи модуляції та форми хвилі, розроблені для максимізації спектральної ефективності та адаптації до різноманітних сценаріїв розгортання. Стратегічні методи розподілу спектру в поєднанні з інноваційними стратегіями управління допомагають вирішувати проблеми обмеженої доступності спектру та перешкод, забезпечуючи оптимальне використання пропускної здатності. Крім того, останні технологічні досягнення, такі як масивний MIMO, формування променя, нарізання мережі та оптимізація на основі штучного інтелекту, революціонізують способи використання пропускної здатності, пропонуючи безпрецедентні рівні ефективності та гнучкості. Загалом ці розробки не лише лежать в основі чудових можливостей 5G NR, але й закладають основу для майбутніх поколінь бездротового зв'язку, включаючи 6G. Оскільки цифровий ландшафт продовжує розвиватися, ефективне управління та розширення

пропускної здатності залишатимуться центральними для задоволення зростаючих потреб взаємопов'язаного світу, сприяючи інноваціям, які формуватимуть майбутнє зв'язку.

1.2. Архітектура мережі 5G: служби, інтерфейси та ресурсні компоненти

Поява технології 5G являє собою значний крок вперед в еволюції мереж бездротового зв'язку. На відміну від своїх попередників, таких як 4G LTE, 5G представляє високоскладну архітектуру, розроблену для задоволення постійно зростаючих потреб у швидшій передачі даних, меншій затримці та величезній кількості підключених пристроїв. У цьому есе досліджуються фундаментальні аспекти архітектури мережі 5G, зосереджуючись на її основних компонентах, інноваційних послугах, які вона забезпечує, та критичних інтерфейсах, що сприяють її роботі. Розуміння цих елементів є важливим для розуміння того, як 5G прагне трансформувати галузі, покращити користувацький досвід та підтримувати екосистему Інтернету речей (IoT), що розвивається.

Архітектура мереж 5G — це складна, але водночас дуже стратегічна структура, що складається з кількох основних компонентів, які разом забезпечують передовий бездротовий зв'язок. В її основі лежать мережа радіодоступу наступного покоління (NG-RAN), ядро 5G (5GC) та низка ресурсів периферійних обчислень. Ядро 5G розроблено як гнучка, хмарна та сервісна платформа, що поєднує мережеві функції, які можна динамічно налаштовувати та масштабувати відповідно до потреб. На відміну від попередніх поколінь, де радіо- та базові мережі були тісно інтегровані, 5G впроваджує модульний підхід, який забезпечує більшу гнучкість та налаштування. Крім того, 5G використовує мережеве сегментування — техніку, яка розділяє мережу на віртуальні сегменти, адаптовані до конкретних випадків використання, таких як автономні транспортні засоби або дистанційна хірургія, — тим самим значно підвищуючи універсальність мережі. Головною метою архітектури 5G є забезпечення надвисокошвидкісного з'єднання, наднадійного зв'язку з низькою затримкою та масового підключення, тим самим підтримуючи

різноманітні програми, починаючи від покращеного мобільного широкосмугового доступу до критично важливих розгортань Інтернету речей.

Для забезпечення оптимального балансу між покриттям та ємністю в мережах 5G застосовується гібридний підхід до використання спектральних ресурсів. Оскільки діапазони Sub-6 ГГц та міліметрові хвилі (mmWave) мають принципово різні характеристики поширення сигналу, їх розгортання відбувається на різних рівнях мережевої архітектури. Частоти нижче 6 ГГц формують фундамент покриття завдяки здатності сигналів долати великі відстані та проникати крізь перешкоди. Натомість діапазони mmWave використовуються для створення локальних зон із надвисокою пропускною здатністю. Схематичне представлення стратегії розгортання цих діапазонів наведено на рисунку 1.1.

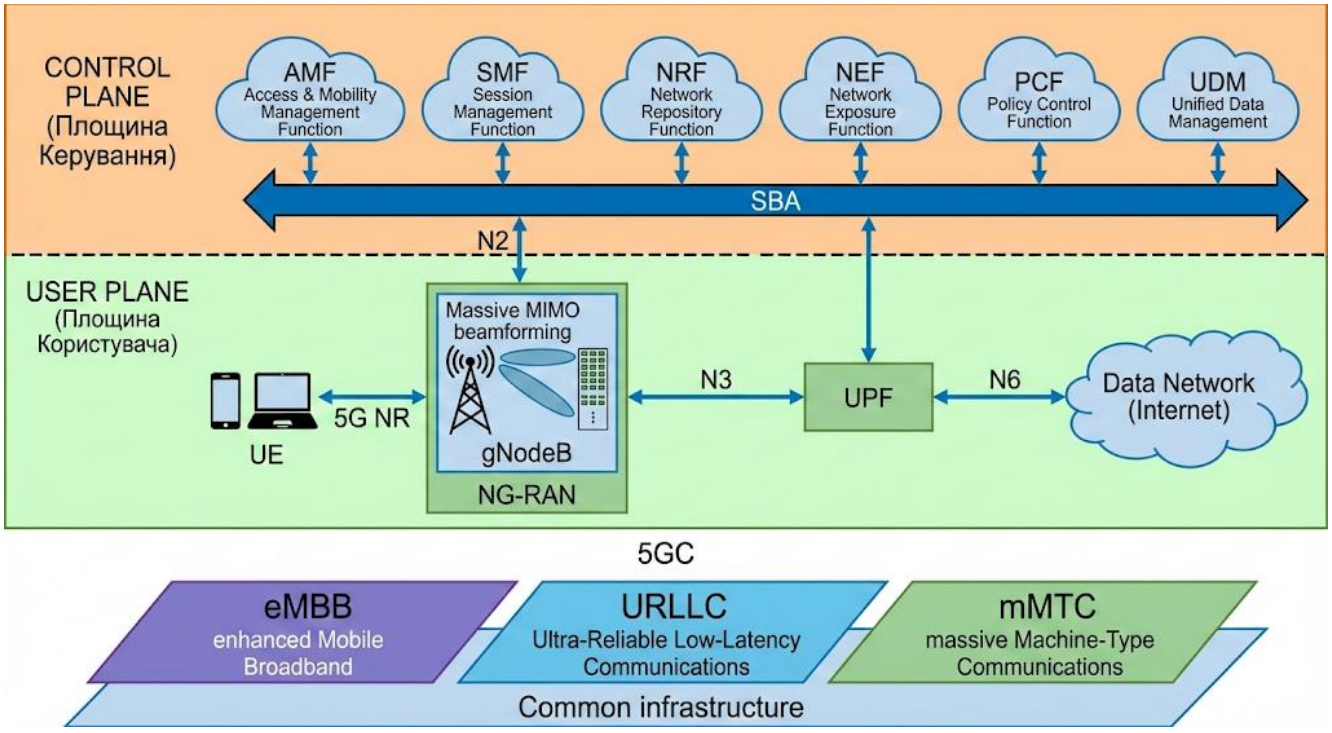


Рис. 1.1. Узагальнена архітектура мережі 5G (NG-RAN та 5GC)

На даному рисунку ілюструється концепція багаторівневого покриття мережі 5G, що базується на поєднанні різних частотних діапазонів:

Рівень макропокриття (Sub-6 ГГц): показано роботу базової станції (макрокомірки), яка забезпечує безперервне з'єднання на великих площах. Довші довжини хвиль у цьому діапазоні дозволяють сигналу огинати перешкоди та ефективно проникати всередину будівель у міських і сільських районах.

Рівень високої ємності (mmWave): продемонстровано використання малих комірок (small cells) у місцях високої концентрації користувачів (стадіони, бізнес-центри). Оскільки міліметрові хвилі мають обмежений радіус дії та високе затухання, вони фокусуються у вузькі спрямовані промені для досягнення гігабітних швидкостей передачі даних.

Взаємодія діапазонів: візуалізація підкреслює, що Sub-6 ГГц забезпечує надійність та стабільність зв’язку під час мобільності користувача, тоді як mmWave активується для підтримки сервісів з інтенсивним використанням пропускної здатності.

Дана модель розгортання є ключовою для реалізації повного потенціалу 5G, дозволяючи мережі бути водночас повсюдною та високопродуктивною.

Ці принципи проектування спрямовані на створення високогнучкої, масштабованої та ефективної мережевої інфраструктури, яка може розвиватися разом з технологічними та суспільними потребами. Мережа 5G розроблена для підтримки широкого спектру інноваційних послуг, що задовольняють різні сектори та потреби користувачів. Однією з ключових послуг є розширений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB), який має на меті забезпечити безпрецедентну швидкість передачі даних — потенційно перевищує 10 Гбіт/с — що дозволяє потокову передачу високої чіткості, використовувати програми віртуальної реальності та безперебійну відеоконференцію. Наприклад, висока пропускна здатність 5G дозволяє користувачам завантажувати великі файли або транслювати контент 4K/8K з мінімальною буферизацією, трансформуючи споживання розваг та медіа. Доповненням до eMBB є наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC), розроблений для підтримки критично важливих програм, таких як автономні транспортні засоби, дистанційна хірургія та промислова автоматизація. URLLC забезпечує зниження затримки до 1 мілісекунди, що життєво важливо для

прийняття рішень у режимі реального часу та критично важливих для безпеки операцій. Наприклад, в автономному водінні миттєвий обмін даними між транспортними засобами та інфраструктурою може запобігти аваріям. Нарешті, масовий машинний зв'язок (mMTC) розширює підключення до мільярдів пристроїв Інтернету речей, таких як інтелектуальні лічильники, датчики навколишнього середовища та підключені прилади. Ця послуга підтримує розгортання розумних міст, сільського господарства та систем охорони здоров'я, надаючи надійні, енергоспоживаючі та масштабовані рішення для підключення для безлічі різноманітних пристроїв. Разом ці послуги демонструють, як архітектура 5G лежить в основі нової ери цифрових інновацій, сприяючи створенню розумніших, безпечніших та ефективніших систем у різних галузях промисловості.

Експлуатаційна ефективність мереж 5G значною мірою залежить від чітко визначених та оптимізованих інтерфейсів, які сприяють зв'язку між різними компонентами мережі [4].

Одним із найважливіших нововведень є новий радіоінтерфейс, відомий як 5G New Radio (NR), який працює в широкому спектрі частот, включаючи діапазони нижче 6 ГГц та міліметрові хвилі. Специфікації NR забезпечують гнучкі сценарії розгортання, від щільних міських районів, що потребують високої ємності, до сільських регіонів, що потребують розширеного покриття. Радіоінтерфейс підтримує розширені функції, такі як формування променя, масивний MIMO та динамічний розподіл спектру, які разом покращують швидкість передачі даних, покриття та спектральну ефективність. Крім того, архітектура 5G підкреслює чіткий розмежування між площиною користувача та площиною керування, що є конструктивним вибором, який покращує гнучкість та масштабованість мережі. Площина користувача обробляє фактичну передачу даних, таких як потокове відео або завантаження файлів, тоді як площина керування керує сигналізацією, керуванням сеансами та функціями мобільності. Такий поділ дозволяє незалежне масштабування та оптимізацію трафіку даних і керування, що є важливим для підтримки різноманітних послуг з різними вимогами до затримки та пропускної здатності.

Архітектура мереж п'ятого покоління спроектована як універсальна платформа для підтримки широкого спектра інноваційних послуг, що задовольняють потреби різних галузей. Ключовою особливістю 5G є поділ на три основні сценарії використання, кожен з яких висуває унікальні вимоги до пропускної здатності, надійності та затримки. Для реалізації цих сценаріїв використовуються такі технології, як сегментація мережі (network slicing) та масивні MIMO, що дозволяє оптимізувати ресурси під конкретний тип трафіку. Порівняльна характеристика цих сценаріїв наведена в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Характеристики ключових сценаріїв використання мереж 5G

Сценарій використання	Ключові технічні вимоги	Типові приклади застосування	Роль пропускної здатності та MIMO
eMBB (Розширений мобільний широкосмуговий зв'язок)	Пікова швидкість передачі даних > 10 Гбіт/с.	Стрімінг відео 4K/8K, віртуальна (VR) та доповнена (AR) реальність.	Вимагає максимальної пропускної здатності та просторового мультиплексування для передачі великих обсягів даних.
URLLC (Наднадійний зв'язок з низькою затримкою)	Затримка до 1 мс, надійність передачі 99.999%.	Автономні транспортні засоби, дистанційна хірургія, промислова автоматизація.	Пріоритетність миттєвої реакції та надійності сигналу над максимальною швидкістю.
mMTC (Масовий машинний зв'язок)	Підключення до мільярдів пристроїв, висока енергоефективність.	Розумні міста, сенсори навколишнього середовища, розумне сільське господарство.	Орієнтація на масштабованість з'єднань та підтримку величезної кількості малопотужних пристроїв IoT.

Крім того, стандарти інтерфейсу між основними та радіоелементами, а також між мережевими сегментами та граничними вузлами, забезпечують сумісність та безперебійну передачу, що є вирішальним для підтримки безперервності обслуговування у сценаріях високої мобільності. Загалом, ці інтерфейси формують

основу гнучкої, високопродуктивної мережевої архітектури 5G, що дозволяє їй відповідати складним вимогам сучасних комунікаційних систем.

Ресурсні компоненти, що лежать в основі мереж 5G, різноманітні та ретельно розроблені для підтримки високої продуктивності та гнучкості мережі. На рівні радіодоступу мережа радіодоступу (RAN) складається з передових елементів, таких як gNodeB, малі комірки та технології формування променя. gNodeB служать основними базовими станціями, забезпечуючи підключення до користувацького обладнання як на частотах нижче 6 ГГц, так і на міліметрових хвилях, що забезпечує високу швидкість передачі даних та ємність. Малі комірки доповнюють ці макрокомірки, розгортаючись у щільних міських середовищах або в приміщеннях, тим самим покращуючи покриття та зменшуючи перешкоди. Технологія формування променя додатково оптимізує силу та якість сигналу, спрямовуючи радіохвилі до певних користувачів, значно покращуючи спектральну ефективність та зменшуючи погіршення сигналу. На стороні базової мережі, важливими компонентами є ядро наступного покоління (NG), яке є дуже гнучкою хмарною платформою, що підтримує сегментацію мережі та швидке розгортання послуг. Технології віртуалізації, такі як віртуалізація мережевих функцій (NFV), дозволяють мережевим функціям запускатися як програмним екземплярам на стандартному обладнанні, що сприяє динамічному розподілу ресурсів та знижує експлуатаційні витрати. Крім того, програмно-визначені мережі (SDN) відіграють ключову роль, забезпечуючи централізований контроль над мережевим трафіком, дозволяючи програмовану та ефективну маршрутизацію, а також покращуючи загальну гнучкість мережі. Спектрумні ресурси, обмежений та цінний актив, управляються за допомогою складних механізмів розподілу спектру, які динамічно призначають пропускну здатність на основі попиту, місця розташування та вимог до послуг. Ефективне управління спектром має вирішальне значення для максимізації пропускної здатності, зменшення перешкод та забезпечення якості обслуговування, особливо враховуючи різноманітні частотні діапазони, що використовуються 5G. Разом ці ресурси – від фізичного обладнання до

віртуалізованих мережевих функцій та управління спектром – утворюють основу стійкої та адаптивної інфраструктури 5G, здатної підтримувати безліч програм.

Розподіл мережі є однією з найінноваційніших та фундаментальних особливостей архітектури 5G, що дозволяє створювати кілька віртуальних мереж, адаптованих до конкретних випадків використання на спільній фізичній інфраструктурі. Ця концепція передбачає розділення мережі на окремі сегменти, кожен з яких оптимізований для певних вимог до продуктивності, рівнів безпеки та обмежень затримки. Значення розділення мережі полягає в його здатності надавати індивідуальні послуги без необхідності виділених фізичних мереж, тим самим максимізуючи використання ресурсів та операційну ефективність. Розподіл ресурсів у кожному сегменті ретельно керується за допомогою динамічних та програмованих механізмів, які призначають пропускну здатність, обчислювальну потужність та сховище відповідно до унікальних вимог сегмента. Наприклад, сегмент автономного транспортного засобу може вимагати наднизької затримки та високої надійності, що вимагає виділених ресурсів для забезпечення обміну даними в режимі реального часу та критично важливих для безпеки операцій. І навпаки, сегмент охорони здоров'я, що підтримує дистанційну діагностику, може пріоритезувати високу безпеку та стабільне підключення з помірними вимогами до затримки. Ці сегменти дозволяють галузям швидко розгортати спеціалізовані послуги, гарантуючи, що мережа може одночасно підтримувати різноманітні програми. Варіанти використання є різноманітними; наприклад, мережі автономних транспортних засобів покладаються на сегменти, які гарантують швидкий та надійний зв'язок між транспортними засобами та інфраструктурою, що є критично важливим для безпеки. Аналогічно, програми охорони здоров'я використовують сегменти для безпечної передачі конфіденційних даних з мінімальною затримкою, що полегшує проведення віддалених операцій та телемедицини. Забезпечуючи індивідуальні, масштабовані та ізольовані мережеві середовища, сегментація мережі підвищує гнучкість, безпеку та загальні можливості мереж 5G, підтримуючи широкий спектр інноваційних варіантів використання [5].

Розширення мереж 5G створює як можливості, так і виклики в сфері безпеки та конфіденційності, спонукаючи до інтеграції передових протоколів та механізмів на кількох рівнях. Протоколи безпеки вбудовані в різні інтерфейси архітектури 5G для захисту цілісності даних, конфіденційності та доступності системи. Наприклад, надійні механізми автентифікації гарантують, що лише авторизовані користувачі та пристрої можуть отримати доступ до мережі, використовуючи такі методи, як взаємна автентифікація та цифрові сертифікати. Механізми шифрування захищають дані під час їх передачі через радіоінтерфейс, основну мережу та міжмережні з'єднання, запобігаючи підслуховуванню та втручанню. Розділення площини керування та площини користувача не лише підвищує продуктивність, але й сприяє безпеці, ізолюючи функції сигналізації від передачі даних, що дозволяє застосовувати точніші політики безпеки та швидше виявляти аномалії. Незважаючи на ці заходи, збільшення кількості підключень створює нові вразливості, такі як потенційні точки атаки в межах величезного масиву взаємопов'язаних пристроїв, особливо в контексті Інтернету речей (IoT). Управління безпекою мільярдів пристроїв, кожен з яких має різні рівні можливостей та протоколи безпеки, залишається суттєвою проблемою. Проблеми конфіденційності також виникають через величезний обсяг даних користувачів, що генеруються та передаються по мережі, що вимагає суворих політик управління даними та методів анонімізації. Крім того, оскільки мережеве сегментування та віртуалізація стають дедалі поширенішими, Забезпечення безпеки окремих сегментів без шкоди для загальної цілісності мережі стає життєво важливим. Хоча архітектура 5G включає розширені функції безпеки, постійна пильність, інновації та комплексні стратегії безпеки є важливими для вирішення проблем, що виникають, пов'язаних з цим високопов'язаним та складним мережевим середовищем.

Заглядаючи в майбутнє, еволюція архітектури мережі 5G, ймовірно, буде значною мірою залежати від інтеграції периферійних обчислень та штучного інтелекту (ШІ). Периферійні обчислення, наближаючи обчислювальну потужність до джерел даних, таких як пристрої Інтернету речей та користувацьке обладнання, обіцяють подальше зменшення затримки, підвищення безпеки даних та

забезпечення аналітики в режимі реального часу, що є важливим для таких застосувань, як автономні транспортні засоби та промислова автоматизація. Впровадження ШІ в мережі 5G сприятиме інтелектуальному управлінню мережею, прогнозному обслуговуванню, динамічному розподілу ресурсів та вдосконаленим протоколам безпеки, що призведе до більш автономної та ефективної роботи. Однак ці досягнення створюють значні труднощі. Масштабованість залишається критичною проблемою, оскільки експоненціальне зростання підключених пристроїв та трафіку даних вимагає надійної інфраструктури, здатної підтримувати таке розширення без погіршення якості обслуговування. Проблеми сумісності також створюють перешкоди, особливо тому, що різні постачальники та регіони застосовують різні стандарти, що потенційно перешкоджає безперебійному глобальному підключенню та узгодженості послуг. Крім того, необхідно враховувати регуляторні та стандартизаційні питання для забезпечення безпеки, конфіденційності та справедливого розподілу спектру. Уряди та міжнародні організації працюють над встановленням політики та стандартів, які б збалансували інновації з безпекою та правами користувачів, але розбіжності та затримки в регулюванні можуть перешкоджати широкому розгортанню та транскордонній сумісності. Подолання цих проблем вимагатиме скоординованих зусиль між зацікавленими сторонами галузі, політиками та дослідниками для розробки стійких, адаптивних та безпечних екосистем 5G, які зможуть підтримувати майбутні технологічні прориви.

На завершення, архітектура мереж 5G являє собою трансформаційний стрибок у бездротовому зв'язку, що характеризується своїми основними компонентами, інноваційними послугами та складними інтерфейсами. Гнучкий, хмарний дизайн ядра 5G у поєднанні з передовими ресурсними компонентами, такими як gNodeB, технології формування променя та віртуалізації, лежить в основі стійкої інфраструктури, здатної підтримувати різноманітні та вимогливі програми. Ці програми — від високошвидкісного широкосмугового доступу до критично важливих послуг Інтернету речей — реалізуються завдяки добре розробленим інтерфейсам, таким як новий радіозв'язок (NR) та розділення площин користувача

та керування, що забезпечує ефективність та масштабованість. Крім того, сегментація мережі стає ключовою функцією, дозволяючи створювати віртуальні мережі налаштовані для конкретних галузей та випадків використання, тоді як протоколи безпеки захищають цілісність даних на тлі зростання зв'язку. Оскільки 5G продовжує розвиватися, інтеграція периферійних обчислень та штучного інтелекту обіцяє подальше розширення його можливостей, хоча проблеми, пов'язані з масштабованістю, сумісністю та регулюванням, залишаються невирішеними. Вирішення цих питань матиме вирішальне значення для реалізації повного потенціалу 5G, що зрештою прокладе шлях до розумнішого, більш пов'язаного світу, який принесе користь як промисловості, суспільству, так і окремим особам [6].

1.3. Спектральні діапазони 5G та формати розподілу ресурсів (Sub-6, mmWave)

Поява технології 5G знаменує собою значну віху в еволюції бездротового зв'язку, обіцяючи безпрецедентні швидкості, зв'язок та ємність. Центральним фактором її розгортання та продуктивності є використовувані спектральні діапазони, які в основному класифікуються на частоти нижче 6 ГГц та міліметрові хвилі (mmWave). Ці діапазони відіграють вирішальну роль у визначенні експлуатаційних характеристик, покриття та сфери застосування мереж 5G. Розуміння відмінностей між цими спектральними діапазонами та форматами розподілу їхніх ресурсів є важливим для розуміння того, як 5G може задовольнити різноманітні потреби користувачів — від широкого покриття сільської місцевості до надшвидкісної передачі даних у містах. У цьому есе досліджуються фундаментальні аспекти спектральних діапазонів 5G, розглядаються їхні унікальні особливості, переваги та притаманні їм проблеми, щоб забезпечити всебічне розуміння їхньої ролі в сучасних системах бездротового зв'язку.

Спектральні діапазони в 5G відносяться до певних частотних діапазонів, виділених для бездротового зв'язку, що слугують основою для передачі даних між

пристроями та інфраструктурою. Ці діапазони є критично важливими, оскільки вони визначають пропускну здатність, покриття та загальну продуктивність мереж 5G. Дві основні категорії - це діапазони нижче 6 ГГц, які працюють нижче 6 ГГц, та діапазони міліметрових хвиль (mmWave), які зазвичай охоплюють від 24 ГГц до 100 ГГц і вище. Різниця між цими діапазонами полягає в їхніх характеристиках поширення; частоти нижче 6 ГГц відомі своєю відносно сприятливою здатністю до поширення та проникнення, що дозволяє сигналам долати більші відстані та ефективніше проникати крізь перешкоди, такі як будівлі. І навпаки, мм-хвильові частоти, завдяки своїм набагато вищим довжинам хвиль, стикаються зі значними проблемами з точки зору ослаблення сигналу та більш чутливі до перешкод, що призводить до обмеженого радіусу дії. Ці відмінності впливають на те, як розгортається кожен діапазон: діапазони нижче 6 ГГц краще підходять для широких зон покриття, тоді як мм-хвильовий діапазон ідеально підходить для гарячих точок з високою щільністю, що потребують величезної пропускної здатності даних. Вибір спектрального діапазону впливає на проектування мережі, взаємодію з користувачем та різноманітність послуг, які можуть підтримуватися, що робить розуміння їхніх відмінних властивостей фундаментальним для стратегій розгортання 5G.

Вибір спектрального діапазону є одним із найважливіших факторів, що визначають архітектуру антенних систем та потенціал збільшення пропускної здатності в мережах 5G. Кожен із діапазонів — Sub-6 ГГц та міліметрові хвилі (mmWave) — має унікальні характеристики поширення сигналу, що зумовлює різні стратегії розгортання та застосування методів Massive MIMO. У той час як низькочастотні діапазони забезпечують надійне покриття, високі частоти відкривають доступ до надширокоих смуг пропускання. Порівняльну характеристику цих спектральних ресурсів наведено в таблиці 1.3 [7].

Діапазони нижче 6 ГГц характеризуються широким покриттям та чудовим проникненням сигналу, що робить їх дуже вигідними для широкого розгортання 5G, особливо в міських та приміських умовах. Їхні довші довжини хвиль дозволяють сигналам долати більші відстані, зменшуючи кількість базових станцій,

необхідних для покриття певної території, та забезпечують краще проникнення крізь стіни та конструкції, що є критично важливим у щільно забудованих районах.

Таблиця 1.3

Порівняльна характеристика спектральних діапазонів Sub-6 ГГц та mmWave

Параметр порівняння	Діапазон Sub-6 ГГц	Діапазон mmWave (міліметрові хвилі)
Діапазон частот	Нижче 6 ГГц	Від 24 ГГц до 100 ГГц і вище
Доступна пропускна здатність	Обмежена (десятки МГц)	Надвисока (сотні МГц та ГГц)
Характеристики поширення	Висока здатність до подолання відстаней та перешкод	Значне затухання сигналу, чутливість до блокування (будівлі, дощ)
Радіус дії та покриття	Широкі зони покриття (макрокомірки)	Обмежений радіус дії (сотні метрів), потребує малих комірок
Проникнення крізь перешкоди	Високе (ефективно проникає крізь стіни будівель)	Низьке (сигнали легко блокуються стінами та деревами)
Основні технології MIMO	Massive MIMO для збільшення ємності та покриття	Формування вузьких променів (Beamforming) для компенсації втрат
Сфери застосування	Сільська місцевість, широке міське покриття	Густонаселені центри міст, стадіони, промислові зони

Наприклад, у міських центрах, де поширені висотні будівлі та складна інфраструктура, частоти нижче 6 ГГц забезпечують надійне з'єднання для широкої бази користувачів, не вимагаючи непрактичної щільності малих комірок. Це робить діапазони нижче 6 ГГц особливо придатними для надання послуг 5G у сільських та приміських районах, де інвестиції в інфраструктуру можуть бути обмежені. Однак, незважаючи на ці переваги, діапазони нижче 6 ГГц обмежені у своїй здатності забезпечувати надзвичайно високі швидкості передачі даних та пропускну здатність, які все більше потребують такі програми, як потокове передавання 4K/8K, віртуальна реальність та масштабне розгортання Інтернету речей. Хоча вони мають відмінне покриття, їхня пропускна здатність даних за своєю суттю нижча, ніж у мм-хвильових частот, що обмежує їх використання для надшвидкісних

застосувань. Цей компроміс підкреслює важливість розгортання гібридного підходу, який використовує сильні сторони діапазону Sub-6 GHz для покриття та потенціал високої ємності мм-хвиль для конкретних сценаріїв високого попиту.

На противагу цьому, мм-хвильові діапазони працюють на набагато вищих частотах, зазвичай вище 24 GHz, пропонуючи значно більшу пропускну здатність, яка може підтримувати надвисокі швидкості передачі даних, необхідні для нових застосувань 5G. Широка доступність спектру мм-хвиль дозволяє мережевим провайдерам пропонувати швидкості майже гігабіт на секунду та наднизьку затримку, що є критично важливим для таких застосувань, як доповнена реальність, автономні транспортні засоби та великомасштабні центри обробки даних. Наприклад, розгортання мм-хвиль у щільних міських середовищах або на стадіонах дозволяє створювати точки доступу високої ємності, здатні одночасно підтримувати тисячі користувачів з мінімальною затримкою, революціонізуючи досвід користувачів у місцях скупчення людей. Тим не менш, мм-хвильові частоти стикаються зі значними проблемами; їхні сигнали дуже схильні до затухання та блокування перешкодами, такими як будівлі, дерева та навіть погодні умови, такі як дощ. Це призводить до обмеженого ефективного діапазону — часто кілька сотень метрів — і вимагає щільної інфраструктури малих комірок для підтримки покриття. Вища частота також вимагає передових технологій формування променя та відстеження променя для точного спрямування сигналів, що збільшує складність мережі та її вартість. Хоча mmWave забезпечує неперевершену швидкість передачі даних та ємність, його розгортання часто обмежується певними зонами високої щільності, доповнюючи ширше покриття, що пропонується діапазонами нижче 6 ГГц. Комбіноване використання обох спектральних діапазонів дозволяє мережам 5G балансувати покриття та ємність, задовольняючи різноманітні потреби користувачів та програм.

Формати розподілу ресурсів є важливими механізмами, які дозволяють ефективно використовувати спектральні діапазони в мережах 5G, забезпечуючи оптимальну продуктивність та зручність використання. Для діапазонів нижче 6 ГГц широко застосовуються традиційні методи, такі як мультиплексування з часовим

поділом (TDM) та мультиплексування з частотним поділом (FDM). TDM передбачає поділ доступного часу на слоти, призначення кожного слота різним користувачам або потокам даних, що спрощує планування, але може призвести до недостатнього використання, якщо попит на трафік коливається. FDM, з іншого боку, розподіляє окремі частотні канали різним користувачам або службам, що дозволяє одночасну передачу без перешкод. але це вимагає ретельного планування спектру для запобігання перекриттям. На додаток до цих статичних методів, сучасні мережі використовують методи динамічного спільного використання спектру (DSS), які дозволяють розподіляти спектральні ресурси в режимі реального часу між кількома службами або операторами. DSS динамічно регулює використання спектру на основі поточного попиту, покращуючи спектральну ефективність та сприяючи співіснуванню служб 4G та 5G в одному діапазоні. Ці методи забезпечують значні переваги, такі як підвищена гнучкість, краще використання ресурсів та здатність швидко адаптуватися до змінних моделей трафіку, що зрештою підтримує ширше покриття та вищу пропускну здатність у діапазонах нижче 6 ГГц [8].

У діапазонах ммХвиль розподіл ресурсів значною мірою залежить від передових методів просторового мультиплексування, які використовують високочастотну та спрямовану природу сигналів ммХвиль. Формування променя, ключова технологія в цьому контексті, спрямовує вузькі промені з високим коефіцієнтом посилення на окремих користувачів або пристрої, дозволяючи кільком просторовим потокам працювати одночасно в одному діапазоні частот — процес, відомий як просторове мультиплексування. Цей підхід значно підвищує пропускну здатність мережі та спектральну ефективність, дозволяючи численним користувачам спільно використовувати ті самі спектральні ресурси без взаємних перешкод, за умови точного управління напрямками променя. Доповненням до формування променя є розгортання масивних систем з кількома входами та кількома виходами (MIMO), які використовують великі масиви антен для одночасного обслуговування кількох користувачів за допомогою складних алгоритмів обробки сигналів. Ці системи використовують просторове рознесення та формування променя для максимізації пропускної здатності та надійності даних,

особливо в середовищах з високою щільністю. Крім того, адаптивні та динамічні стратегії управління ресурсами мають вирішальне значення в мережах mmWave; вони включають коригування напрямків променя, рівнів потужності та планування користувачів у режимі реального часу на основі умов навколишнього середовища та потреб трафіку. Такі стратегії оптимізують використання спектру, зменшують перешкоди та підтримують високу продуктивність, незважаючи на складні умови поширення, властиві частотам mmWave.

Управління спектром у мережах 5G стикається з кількома складними проблемами, головним чином через фрагментацію доступного спектру та регуляторні бар'єри, які ускладнюють процеси розподілу та ліцензування. Фрагментація спектру виникає, коли частоти поділяються на несуміжні блоки, що призводить до неефективного використання та труднощів у розгортанні великих смуг пропускання, необхідних для високопродуктивних застосувань. Регуляторні бар'єри, такі як обмеження ліцензування та національна політика щодо спектру, можуть затримувати або обмежувати доступ до критичних смуг частот, перешкоджаючи швидкому розгортанню мережі та інноваціям. Крім того, управління перешкодами між різними діапазонами та службами є постійною проблемою, особливо враховуючи те, що кілька операторів та технологій співіснують у перекриваючихся або суміжних діапазонах спектру. Забезпечення того, щоб сигнали з різних джерел не спричиняли шкідливих перешкод, вимагає складних стратегій координації, фільтрації та керування потужністю. Балансування потреби в широкому покритті з попитом на високу ємність додає ще один рівень складності; оператори мереж повинні оптимізувати використання спектру, щоб ефективно обслуговувати як великі сільські райони, так і густонаселені міські гарячі точки. Досягнення цього балансу включає стратегічний розподіл спектру, координацію між зацікавленими сторонами та використання передових технологій, таких як динамічний спільний доступ до спектру та методи зменшення перешкод, які мають вирішальне значення для сталого та ефективного функціонування мереж 5G у різних спектральних середовищах.

Заглядаючи в майбутнє, досягнення в управлінні спектром 5G та розподілі ресурсів готові включати дедалі складніші технології, де штучний інтелект (ШІ) відіграватиме центральну роль. Очікується, що системи управління ресурсами на основі ШІ динамічно оптимізуватимуть використання спектру, прогнозуючи схеми трафіку, регулюючи розподіли в режимі реального часу та мінімізуючи перешкоди, тим самим підвищуючи загальну ефективність мережі та користувацький досвід. Такі інтелектуальні алгоритми можуть сприяти безперебійній координації між кількома діапазонами та різноманітними службами, зменшуючи затримку та підвищуючи надійність у складних середовищах. Крім того, розробка гнучких багатодіапазонних форматів ресурсів має на меті створити адаптивні мережеві архітектури, здатні підтримувати як застарілі, так і нові програми. Ці формати дозволять мережам більш гнучко розподіляти спектральні ресурси в діапазонах нижче 6 ГГц та міліметрових хвиль, що дозволить використовувати гібридні режими роботи, які одночасно максимізують покриття та ємність. Очікується, що новітні технології, такі як реконфігуровані інтелектуальні поверхні та вдосконалене формування променя, також суттєво вплинуть на ефективність використання спектру, покращуючи поширення сигналу та спрямовуючи енергію точно туди, куди потрібно. Разом ці інновації покликані трансформувати управління спектром від статичного, сегментовані розподіли в більш інтегрований, адаптивна система, яка може задовольнити зростаючі потреби 5G і далі, забезпечуючи надійне, високопродуктивне з’єднання у світі, що дедалі більше взаємопов’язаний.

На завершення, розгортання 5G значною мірою залежить від його спектральних діапазонів, а саме: Sub-6 GHz та mmWave, кожен з яких має свої переваги та труднощі. Діапазони нижче 6 GHz пропонують широке покриття та проникнення, що робить їх придатними для розгортання на великих територіях, особливо в міських та сільських районах, хоча вони обмежені в максимальній швидкості передачі даних. І навпаки, частоти mmWave забезпечують надвисокі швидкості передачі даних, необхідні для вимогливих застосувань, але стикаються зі значними перешкодами, пов'язаними з покриттям та ослабленням сигналу. Ефективні формати розподілу ресурсів адаптуються до цих характеристик, причому

традиційні методи мультиплексування обслуговують діапазони нижче 6 GHz, а вдосконалені просторові мультиплексування разом з масивними технологіями MIMO оптимізують продуктивність mmWave. Управління спектром залишається складним, стикаючись з фрагментацією, регуляторними бар'єрами та проблемами перешкод, але майбутні тенденції, такі як управління на основі штучного інтелекту, гнучкі багатодіапазонні формати та новітні технології, обіцяють подальше підвищення спектральної ефективності. Загалом, розуміння цих спектральних діапазонів та стратегій використання ресурсів має вирішальне значення для реалізації повного потенціалу 5G, забезпечення його обіцянки щодо швидшого, надійнішого та повсюдного підключення в різних середовищах.

1.4. Методи радіодоступу та модулювання, що визначають ефективність 5G

Поява технології 5G знаменує собою значну віху в розвитку бездротового зв'язку, обіцяючи безпрецедентні швидкості, меншу затримку та покращене з'єднання. Центральним фактором досягнення цих амбітних цілей є методи радіодоступу та модуляції, що лежать в основі продуктивності 5G. Ці технологічні досягнення є не просто поступовими вдосконаленнями, а фундаментально змінюють те, як дані передаються, приймаються та оптимізуються в складних мережах. У цьому есе ми дослідимо ключові технології радіодоступу, зокрема нове радіо (NR), та їхні інновації, заглибимося у складні схеми модуляції, які забезпечують вищу пропускну здатність даних, та розглянемо ключову роль масивних MIMO та методів формування променя. Розуміючи ці елементи, можна оцінити складну інженерію, яка робить 5G не просто еволюцією, а революцією в бездротовому зв'язку [9].

В основі трансформаційного потенціалу 5G лежить платформа New Radio (NR) – комплексна технологія радіодоступу, розроблена спеціально для потреб мереж наступного покоління. 5G NR працює на гнучкій та масштабованій архітектурі, яка охоплює широкий спектр частотних діапазонів, включаючи спектри

нижче 6 ГГц та міліметрових хвиль (mmWave). Ця гнучкість дозволяє мережевим операторам оптимізувати покриття та ємність на основі регіональних потреб та доступності спектру. На відміну від 4G LTE, яка в основному спирається на відносно фіксований спектр та менш адаптивний розподіл ресурсів, 5G NR запроваджує динамічний розподіл спектру та агрегацію несучих. Ці функції дозволяють одночасно використовувати кілька частотних діапазонів та сприяють більш ефективному використанню спектру, тим самим збільшуючи ємність мережі та зменшуючи затримку. Наприклад, у міських середовищах з щільним населенням користувачів 5G NR може динамічно розподіляти спектральні ресурси для пріоритезації районів з високим попитом, забезпечуючи стабільне високошвидкісне з'єднання. Цей адаптивний підхід є життєво важливим для підтримки програм, починаючи від доповненої реальності до автономних транспортних засобів, де безперебійні високошвидкісні з'єднання є важливими. Таким чином, еволюція від 4G до 5G NR означає стрибок до більш інтелектуальних та гнучких парадигм радіодоступу, які є ключовими для реалізації повного потенціалу 5G.

Центральне місце в забезпеченні високої спектральної ефективності та пропускної здатності мереж 5G NR посідає технологія Massive MIMO у поєднанні з адаптивним формуванням променя (beamforming). На відміну від традиційних систем зв’язку, де сигнал випромінюється всенаправлено, масивні антенні системи дозволяють фокусувати енергію радіосигналу безпосередньо на конкретному користувацькому пристрої. Це дозволяє реалізувати просторове мультиплексування, за якого кілька потоків даних передаються одночасно в одному частотному діапазоні різним користувачам. Такий підхід не лише мінімізує міжабонентські перешкоди, а й дозволяє значно збільшити ємність мережі без залучення додаткового частотного спектру. Принципова схема функціонування цих технологій представлена на рисунку 1.2.

Схеми модуляції слугують основою для кодування даних у радіосигнали, а 5G включає передові методи для максимізації пропускної здатності даних, зберігаючи при цьому надійність з'єднання. Одним з основних методів модуляції,

прийнятих 5G, є ортогональне частотне мультиплексування (OFDM), яке розділяє доступний спектр на численні ортогональні піднесучі. Цей підхід зменшує міжсимвольні перешкоди та підвищує спектральну ефективність, особливо в сценаріях високої мобільності, таких як автомобільний зв'язок.

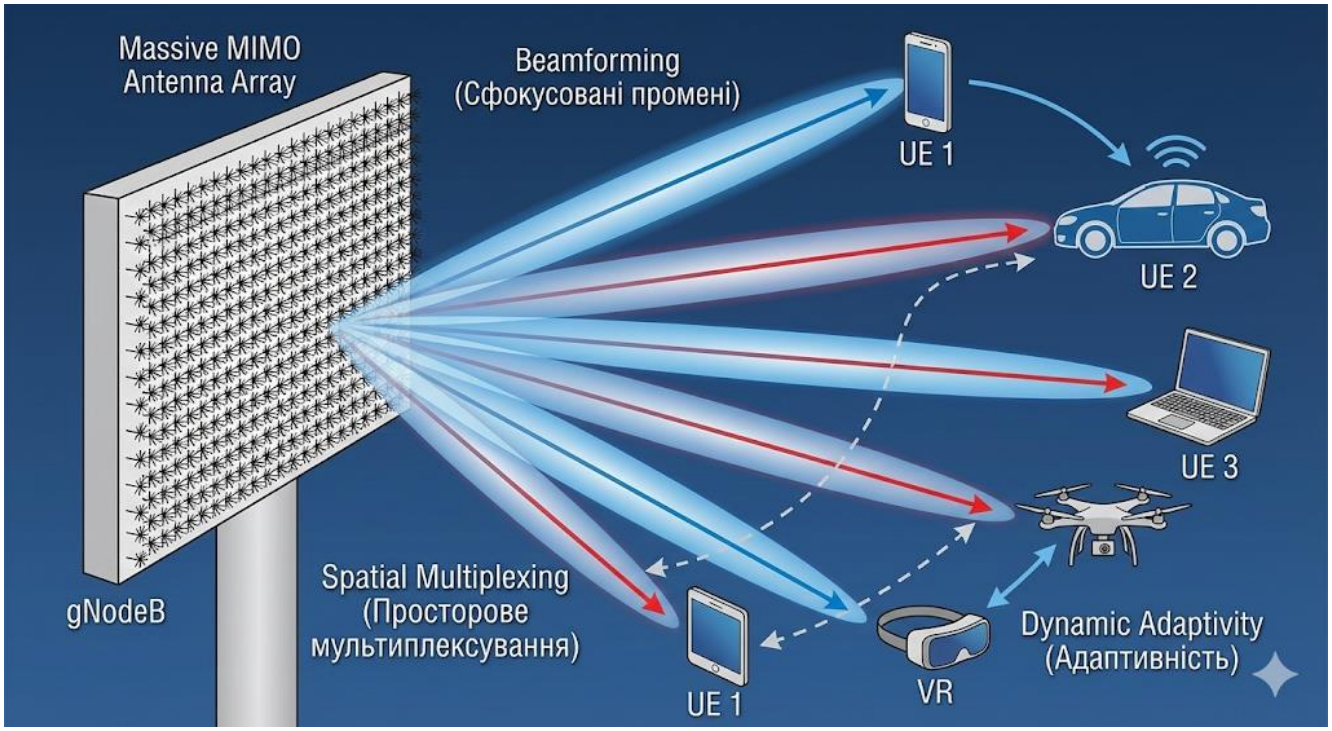


Рис. 1.2. Принцип роботи технологій Massive MIMO та формування променя (Beamforming)

Крім того, 5G використовує схеми модуляції вищого порядку, зокрема 256-QAM (квадратурну амплітудну модуляцію), яка кодує вісім бітів на символ, ефективно множачи ємність даних у межах тієї ж пропускної здатності. Використання таких складних схем модуляції дозволяє мережам 5G досягати пікової швидкості передачі даних, що перевищує 20 Гбіт/с, за ідеальних умов. Крім того, адаптивні методи модуляції динамічно коригують порядок модуляції на основі якості каналу в режимі реального часу. Наприклад, за сприятливих умов система використовує 256-QAM для максимізації пропускної здатності, тоді як за умов слабкого сигналу вона переходить на QPSK або 16-QAM для підтримки надійного

зв'язку. Ця гнучкість підвищує як надійність з'єднання, так і загальну ефективність мережі, забезпечуючи стабільну якість обслуговування навіть у складних умовах. Отже, стратегічне розгортання передових та адаптивних схем модуляції відіграє важливу роль у виконанні обіцянки 5G щодо високошвидкісного та надійного з'єднання.

Доповненням до досягнень у радіодоступі та модуляції є технології масивного множинного входу та множинного виходу (MIMO) та формування променя, які принципово підвищують спектральну ефективність та пропускну здатність мережі. Масовий MIMO передбачає розгортання сотень антен на базових станціях, що дозволяє одночасну передачу та прийом кількох потоків даних в одному діапазоні частот. Ця щільна конфігурація антен значно підвищує пропускну здатність, використовуючи просторове мультиплексування, що дозволяє одночасно обслуговувати більше користувачів без додаткового спектру. Наприклад, у густонаселених міських районах масивний MIMO може підтримувати сотні пристроїв з високими вимогами до даних, ефективно зменшуючи перевантаження. Формування променя ще більше посилює ці переваги, фокусуючи радіосигнали безпосередньо на конкретних користувачів, а не транслюючи їх всенаправлено. Цей цілеспрямований підхід концентрує потужність сигналу, що призводить до міцніших з'єднань та зменшення перешкод від інших користувачів. Формування променя також покращує покриття, особливо на вищих частотах, таких як міліметрові хвилі, де сигнали більш схильні до блокування. Динамічно спрямовуючи промені до користувачів, мережі 5G можуть підтримувати високоякісні з'єднання навіть у складних умовах. Разом, масивні MIMO та методи формування променя значно покращують покриття, пропускну здатність та енергоефективність, дозволяючи мережам 5G обслуговувати значно більшу кількість пристроїв з чудовою продуктивністю порівняно з попередніми поколіннями [10].

Виняткова продуктивність мереж 5G фундаментально зумовлена сукупним прогресом у технологіях радіодоступу та методах модуляції. Гнучке використання спектру в поєднанні з передовими схемами модуляції вищого порядку та

масивними антенними системами створює міцну основу для досягнення високих швидкостей передачі даних і надійного зв'язку. Синергія цих технологій дозволяє не лише збільшити пропускну здатність, а й значно покращити спектральну ефективність у різних сценаріях розгортання. Вплив ключових технологічних факторів на ефективність мережі систематизовано в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

Технологічні чинники підвищення ефективності передачі даних у 5G

Технологія	Механізм дії та характеристики	Результат для пропускної здатності та мережі
Модуляція 256-QAM	Кодування восьми бітів на один символ.	Підвищення ємності даних у межах тієї ж пропускної здатності.
Massive MIMO	Розгортання сотень антен на базових станціях для просторового мультиплексування.	Одночасне обслуговування більшої кількості користувачів без додаткового спектру.
Формування променя (Beamforming)	Фокусування радіосигналів безпосередньо на конкретних користувачів.	Концентрація потужності сигналу, зміцнення з'єднань та зменшення перешкод.
OFDM	Розподіл спектру на численні ортогональні піднесучі.	Стійкість до багатопроменевих перешкод та підвищення спектральної ефективності.
Адаптивна модуляція	Динамічне коригування порядку модуляції на основі якості каналу.	Забезпечення оптимальної пропускної здатності та надійності за різних умов сигналу.

Відмінною особливістю технології 5G є використання частот міліметрових хвиль (mmWave), які займають спектр вище 24 ГГц і пропонують суттєві переваги в пропускній здатності порівняно з традиційними стільниковими діапазонами. Широкий спектр доступного спектру в міліметрових хвилях дозволяє забезпечити надзвичайно високу швидкість передачі даних, потенційно сягаючи сотень гігабіт на секунду, таким чином підтримуючи програми, що потребують інтенсивного використання пропускної здатності, такі як потокове передавання надвисокої чіткості, віртуальна реальність та масове розгортання Інтернету речей. Велика

пропускна здатність дозволяє передавати більше даних одночасно, що значно сприяє розвитку 5G.обіцяє безпрецедентні швидкості. Однак, мм-хвильові частоти також створюють значні проблеми; їхні характеристики поширення суттєво відрізняються від низькочастотних діапазонів. Високі втрати на трасі, погане проникнення крізь перешкоди, такі як стіни або рослинність, та обмежений радіус дії роблять мм-хвильові сигнали більш схильними до затухання та блокування. Ці проблеми вимагають інноваційних стратегій модуляції та доступу, спеціально розроблених для розгортання мм-хвиль. Такі методи, як формування променя, особливо важливі в мм-хвильових діапазонах для спрямування концентрованих сигналів до користувачів, долаючи деякі притаманні обмеження поширення. Крім того, щільне розгортання малих комірок стає важливим для забезпечення безперервності покриття, а для максимізації спектральної ефективності в цих високочастотних діапазонах використовуються передові схеми модуляції. Разом ці підходи дозволяють мережам 5G використовувати величезний потенціал мм-хвильового спектру, балансуючи високу пропускну здатність даних з фізичними та екологічними обмеженнями цих частот.

Сукупний прогрес у технологіях радіодоступу та методах модуляції є центральним для трансформаційних покращень продуктивності, що спостерігаються в мережах 5G. Удосконалені інфраструктури радіодоступу, такі як гнучке використання спектру та динамічний спільний доступ до спектру, значно збільшують пропускну здатність мережі та забезпечують ефективне управління спектром. Одночасно, складні схеми модуляції, такі як OFDM та модуляції вищого порядку, такі як 256-QAM, суттєво підвищують швидкість передачі даних, зменшують затримку та підтримують одночасне підключення безлічі пристроїв. Ці інновації безпосередньо призводять до швидшої швидкості завантаження та вивантаження, меншої затримки для програм реального часу та здатності підтримувати щільні середовища з високими вимогами користувачів. Крім того, надійність з'єднань підвищується, оскільки адаптивна модуляція забезпечує оптимальну продуктивність навіть у складних умовах сигналу, забезпечуючи безперебійний користувацький досвід у різних середовищах — від міських центрів

до сільської місцевості. Забігаючи вперед, постійні дослідження більш просунутих методів модуляції, таких як інтелектуальні адаптивні алгоритми та нові методи доступу, обіцяють подальше розширення можливостей 5G. Ці майбутні інновації спрямовані на розширення меж швидкості, надійності та ємності, прокладаючи шлях до повністю підключеної, інтелектуальної та ефективної комунікаційної екосистеми, яка стане основою нових технологій, таких як автономні транспортні засоби, розумні міста та повсюдні мережі Інтернету речей.

На завершення, виняткова продуктивність мереж 5G фундаментально зумовлена складними методами радіодоступу та модуляції. Розгортання нового радіо (NR) з його гнучким використанням спектру в поєднанні з передовими схемами модуляції, такими як OFDM та QAM вищого порядку, створює міцну основу для високих швидкостей передачі даних та надійного зв'язку. Інтеграція масивного MIMO та методів формування променя ще більше підвищує пропускну здатність мережі, покриття та ефективність. Стратегічне використання міліметрових хвильових частот відкриває величезні пропускні здатності, необхідні для надшвидких, високопродуктивних застосувань, незважаючи на проблеми поширення, які вирішуються за допомогою цілеспрямованих стратегій модуляції та розгортання. Разом ці інновації підвищують можливості 5G, забезпечуючи вищі швидкості, меншу затримку та надійніші з'єднання в різних середовищах. Оскільки дослідження продовжують розвиватися, майбутні інновації в модуляції та доступі обіцяють подальше підвищення продуктивності 5G, зрештою трансформуючи ландшафт бездротового зв'язку та відкриваючи нову еру технологічного прогресу [11].

2. MIMO-ТЕХНОЛОГІЇ: КОНЦЕПЦІЇ, КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ПРИНЦИПИ РОБОТИ

2.1. Принципи формування множинних антенних конфігурацій у MIMO

У сфері бездротового зв'язку технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) здійснила революцію в передачі даних, використовуючи кілька антен як на передавальному, так і на приймальному кінцях. Ефективність систем MIMO значною мірою залежить від конфігурації цих антен, які повинні бути ретельно розроблені для оптимізації таких показників продуктивності, як пропускна здатність, покриття та надійність. Принципи, що лежать в основі формування конфігурацій кількох антен, охоплюють всебічне розуміння різних критеріїв, різних типів розташування антен та стратегій їх оптимального розміщення. У розділі досліджуються ці основні принципи, з'ясовуються фактори, що впливають на вибір конфігурації антени, поширені конфігурації, що використовуються в системах MIMO, та методології оптимізації розміщення антени для досягнення максимальної ефективності системи [12].

Вибір конфігурацій антен у системах MIMO залежить від кількох критичних критеріїв, які забезпечують відповідність системи її експлуатаційним цілям. Найголовнішим серед них є врахування різноманітності сигналів та просторового мультиплексування. Методи різноманітності сигналів, такі як різноманітність передачі та прийому, спрямовані на зменшення ефектів завмирання та багатопроменевості шляхом використання кількох антен для забезпечення надлишкових сигнальних шляхів, тим самим підвищуючи стійкість з'єднання. І навпаки, просторове мультиплексування прагне збільшити пропускну здатність каналу шляхом передачі незалежних потоків даних по різних просторових шляхах, що вимагає ретельно організованих конфігурацій антен для максимальної незалежності між каналами. Фактори навколишнього середовища також відіграють ключову роль; наприклад, міські ландшафти з щільною забудовою та відбивними поверхнями можуть спричинити багате поширення багатопроменевості, сприяючи

конфігураціям, які використовують це різноманіття, тоді як відкриті сільські райони можуть отримати користь від різних домовленостей. Практичні обмеження, включаючи існуючі апаратні обмеження та системні специфікації, додатково впливають на вибір конфігурації. Сумісність з існуючою інфраструктурою, простота впровадження та економічні міркування часто визначають, чи буде прийнято більш складну решітку, чи простішу конфігурацію. Наприклад, інтеграція антен MIMO в компактні смартфони вимагає мініатюрних, просторово ефективних конструкцій, які все ще зберігають продуктивність, тоді як великомасштабні базові станції можуть використовувати більш розгалужені решітки для покращення покриття та пропускної здатності.

Для використання переваг технології MIMO було розроблено різні конфігурації антен, кожна з яких підходить для конкретних сценаріїв розгортання та системних вимог. Рівномірні лінійні решітки (ULA) є одними з найпоширеніших конфігурацій, що характеризуються лінійним розташуванням елементів антени з рівномірним інтервалом між ними. ULA мають переваги завдяки своїй простоті, легкості аналізу та здатності виконувати формування променя, яке концентрує енергію сигналу в потрібних напрямках, тим самим покращуючи співвідношення сигнал/шум. Однак їхня одновимірна структура обмежує їхню здатність використовувати просторові виміри у двох або більше напрямках. Щоб подолати це, були введені рівномірні площинні решітки (UPA), де елементи антени розташовані у вигляді сітки, що дозволяє здійснювати двовимірне просторове мультиплексування. UPA особливо ефективні в застосуваннях, що вимагають керування променем та покриття як в азимутальній, так і в кутопідйомній площинах, таких як базові станції 5G. Крім того, розподілені антенні системи (DAS) набули популярності, особливо в сценаріях, що вимагають покращеного покриття та надійності на великих або обмежених площинах. DAS передбачає розподіл кількох антенних елементів по географічному регіону, що зменшує втрати на трасі та покращує обслуговування в складних умовах, таких як стадіони або міські центри. Наприклад, розгортання розподілених антен у торговому центрі

забезпечує стабільне покриття та високу швидкість передачі даних, що ілюструє універсальність різноманітних конфігурацій, адаптованих до конкретних потреб.

Ефективність систем MIMO значною мірою залежить від конфігурації антен, які розробляються для оптимізації пропускної здатності та надійності зв'язку. Вибір конкретної геометрії решітки визначає здатність системи до формування променя та використання просторових вимірів поширення сигналу. Найбільш поширеними структурами, що використовуються в сучасних системах зв'язку, є рівномірні лінійні решітки (ULA) та рівномірні площинні решітки (UPA). Схематичне порівняння цих конфігурацій представлено на рисунку 2.1 [13].

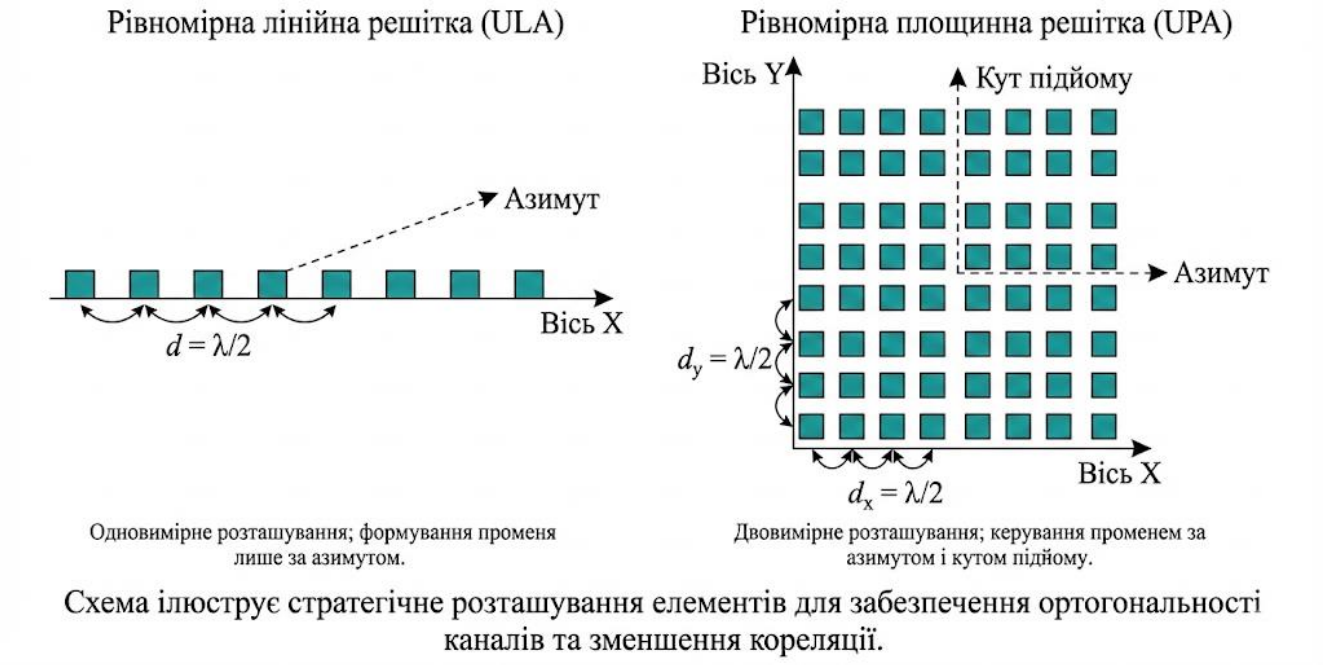


Рис. 2.1. Геометричні схеми розміщення елементів в антенних решітках ULA та UPA

Оптимізація розміщення елементів антени в межах заданої конфігурації має вирішальне значення для максимального використання переваг систем MIMO. Одним з основних міркувань є максимізація пропускної здатності каналу, чого можна досягти шляхом стратегічного розташування антен для сприяння ортогональності каналу та зменшення кореляції між сигнальними шляхами. Як правило, рекомендується розміщувати антени на відстані приблизно половини

довжини хвилі одна від одної для балансу перешкод та просторової незалежності, оскільки ця відстань зменшує взаємний зв'язок та покращує багатопроменеве поширення. Мінімізація взаємного зв'язку між елементами також є важливою, оскільки надмірний зв'язок може погіршити незалежність каналів та знизити продуктивність системи. Такі методи, як включення структур розв'язки або використання специфічної геометрії решітки, допомагають пом'якшити ці ефекти. Крім того, розробники повинні збалансувати фізичний розмір решітки зі складністю та вартістю системи. Більші решітки з більшою кількістю елементів можуть запропонувати вищу пропускну здатність та кращі можливості формування променя, але тягнуть за собою збільшення складності обладнання, енергоспоживання та витрат на встановлення. Наприклад, у масштабних розгортаннях MIMO ретельно організовані великомасштабні масиви розроблені для оптимізації збільшення потужності, зберігаючи при цьому керовану складність завдяки передовим алгоритмам та апаратним інноваціям. Зрештою, метою є досягнення балансу, де розмір масиву та розміщення елементів забезпечують максимальну продуктивність системи без надмірних витрат чи складності.

Конфігурація антен у системі MIMO має суттєвий вплив на загальну продуктивність системи, впливаючи на ключові показники, такі як співвідношення сигнал/шум (SNR), пропускна здатність даних та надійність. Добре спроектоване розташування антен може значно покращити SNR, фокусуючи енергію за допомогою методів формування променя, які спрямовують сигнали до цільових користувачів та зменшують перешкоди від небажаних сигналів. Такий цілеспрямований підхід не лише покращує якість прийнятого сигналу, але й дозволяє підвищити швидкість передачі даних, оскільки збільшене співвідношення сигнал/шум (SNR) полегшує використання схем модуляції вищого порядку. Крім того, розташування антен впливає на ступінь просторової кореляції між каналами; низька кореляція є бажаною, оскільки вона призводить до більшого виграшу від різноманітності та вищої ефективності мультиплексування. З іншого боку, висока просторова кореляція зменшує незалежність потоків даних, обмежуючи переваги MIMO щодо ємності. Часто існує компроміс між складністю та виграшем у

продуктивності — більш складні конфігурації антен, такі як великомасштабні решітки або розподілені системи, можуть запропонувати суттєве покращення пропускної здатності та надійності, але пов'язані зі збільшенням складності апаратного забезпечення, вартості та вимог до обробки сигналів.

Ефективність систем MIMO безпосередньо залежить від геометрії розміщення антенних елементів. Вибір між лінійними, площинними або розподіленими конфігураціями визначається сценарієм розгортання та необхідністю керування променем у різних площинах. Основні характеристики поширених антенних конфігурацій представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Порівняльна характеристика основних антенних конфігурацій MIMO

Тип конфігурації	Геометричні особливості та принципи	Переваги та обмеження	Основні сфери застосування
ULA (Рівномірна лінійна решітка)	Лінійне розташування елементів з рівномірним інтервалом.	Проста в аналізі та впровадженні, забезпечує формування променя. Одновимірна структура обмежує просторове використання лише одним напрямком.	Секторне покриття базових станцій, де достатньо керування в одній площині.
UPA (Рівномірна площинна решітка)	Розміщення елементів у формі двовимірної сітки (матриці).	Забезпечує двовимірне просторове мультиплексування та покриття як в азимутальній, так і в кутопідйомній площинах.	Сучасні базові станції 5G, що потребують гнучкого керування променями.
DAS (Розподілена антенна система)	Розподіл кількох антенних елементів по певній географічній зоні.	Зменшує втрати на трасі та покращує надійність сигналу в складних умовах. Вимагає складної координації між елементами.	Об’єкти зі складним поширенням сигналу: стадіони, торгові центри, міські центри.

Впровадження ефективних конфігурацій з кількома антенами в реальних системах включає кілька практичних міркувань, які впливають на вибір дизайну та стратегії розгортання. Вартість має першочергове значення; Передові антенні

системи, особливо великі решітки або розподілені установки, тягнуть за собою значні витрати на виробництво та обслуговування. Ці витрати повинні бути виправдані очікуваним покращенням продуктивності та потенціалом масштабованості. Крім того, виробничі обмеження, такі як фізичний розмір елементів антени та точність, необхідна для їх розміщення, можуть обмежувати можливі конфігурації, особливо в компактних пристроях, таких як смартфони або гаджети Інтернету речей. Масштабованість є ще одним критичним фактором — конфігурації антен повинні забезпечувати майбутні оновлення системи, дозволяючи операторам розширювати потужність або впроваджувати нові технології без значних переробок. Ця гнучкість є життєво важливою в швидкозмінних бездротових середовищах, де постійно зростає попит на вищі швидкості передачі даних та покриття. Крім того, інтеграція конфігурацій антен з методами формування променя та передовими антенними технологіями, такими як реконфігуровані інтелектуальні поверхні або адаптивні решітки, підвищує адаптивність та продуктивність системи. Наприклад, поєднання розподілених антенних систем з інтелектуальним керуванням променем може динамічно оптимізувати покриття, покращуючи взаємодію з користувачем та ефективність мережі. Зрештою, практичні міркування змушують розробників систем балансувати вартість, технологічність, масштабованість та технологічні інновації для розробки надійних, перспективних конфігурацій антен MIMO [14].

Формування кількох конфігурацій антен у системах MIMO керується складною взаємодією критеріїв, типів та стратегій оптимізації, спрямованих на максимізацію продуктивності бездротового зв'язку. Вибір відповідних конфігурацій включає врахування факторів навколишнього середовища, апаратних обмежень та конкретних цілей рознесення сигналів та просторового мультиплексування. Різні схеми розташування антен, включаючи ULA, UPA та розподілені системи, пропонують різноманітні варіанти, адаптовані до різних сценаріїв розгортання, кожен з яких має свої унікальні переваги та обмеження. Оптимізація розміщення елементів — шляхом стратегічного розміщення, зменшення взаємного зв'язку та балансування розміру та продуктивності — є важливою для використання всього

потенціалу технології MIMO, впливаючи на ключові показники продуктивності, такі як співвідношення сигнал/шум, пропускна здатність та коефіцієнт рознесення. Практичні міркування, включаючи вартість, масштабованість та інтеграцію з передовими методами, такими як формування променя, формують реальну реалізацію цих конфігурацій. Зрештою, розуміння цих принципів дозволяє розробляти ефективні, адаптивні та готові до майбутнього системи MIMO, які відповідають зростаючим вимогам сучасного бездротового зв'язку.

2.2. Класифікація MIMO: SU-MIMO, MU-MIMO, Massive MIMO

Технологія множинних входів і виходів (MIMO) здійснила революцію в бездротовому зв'язку, збільшивши швидкість передачі даних, підвищивши надійність та оптимізуючи пропускну здатність мережі. Оскільки бездротові мережі розвиваються, щоб задовольнити зростаючі потреби у високошвидкісному з'єднанні та ефективному використанні спектру, були розроблені різні конфігурації MIMO для задоволення різних операційних середовищ та потреб користувачів. Серед них виділяються однокористувацькі MIMO (SU-MIMO), багатокористувацькі MIMO (MU-MIMO) та масивні MIMO як ключові класифікації, кожна з яких має унікальні характеристики та технологічні наслідки. Розуміння цих класифікацій є важливим для розуміння того, як сучасні бездротові системи, зокрема мережі 4G та 5G, розроблені для надання надійних послуг з високою пропускною здатністю. У розділі досліджуються відмінності та застосування SU-MIMO, MU-MIMO та масивних MIMO, підкреслюючи їхню роль у розвитку технологій бездротового зв'язку [15].

Розвиток бездротових мереж призвів до створення різних конфігурацій MIMO, кожна з яких оптимізована під конкретні операційні умови та потреби користувачів. Якщо однокористувацький режим (SU-MIMO) зосереджений на максимізації швидкості для окремого пристрою, то багатокористувацькі методи (MU-MIMO та Massive MIMO) дозволяють базовій станції одночасно взаємодіяти з цілою групою абонентів, значно підвищуючи загальну ємність та спектральну

ефективність мережі. Порівняння архітектурних підходів цих трьох класів технологій представлено на рисунку 2.2.

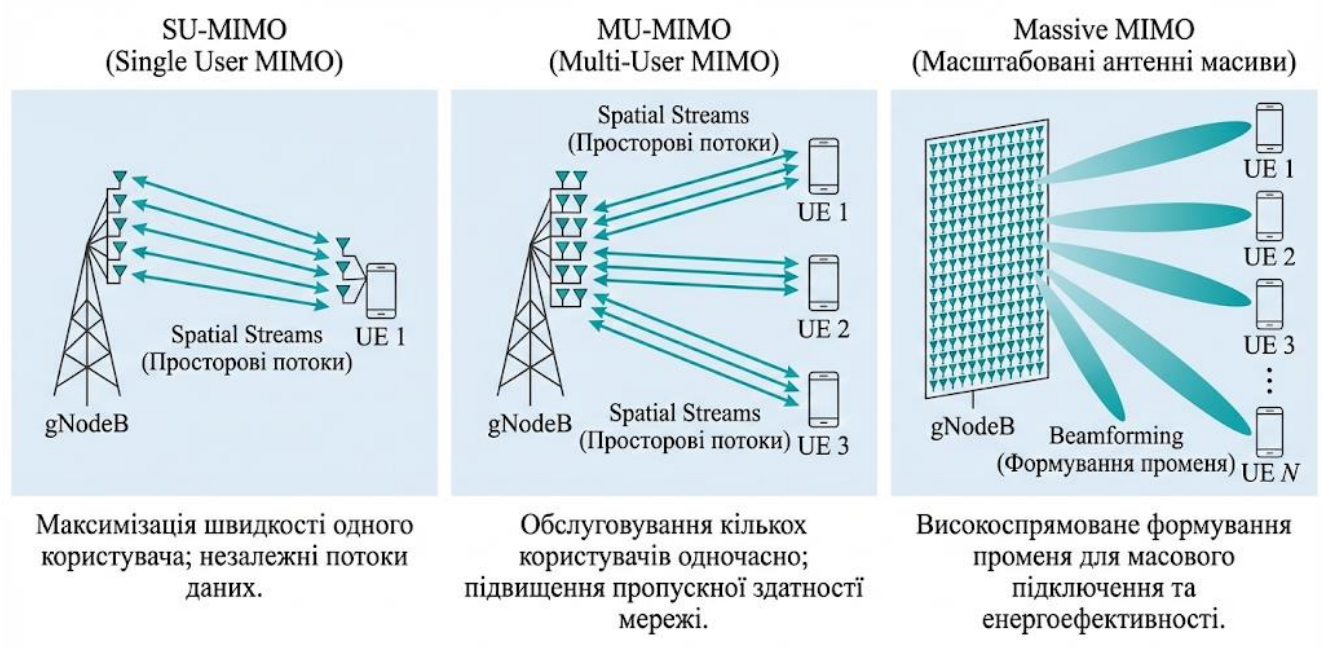


Рис. 2.2. Порівняння принципів функціонування SU-MIMO, MU-MIMO та Massive MIMO

Даний рисунок ілюструє концептуальні відмінності в обробці сигналів та обслуговуванні абонентів для трьох основних класів MIMO-систем:

SU-MIMO (Single User MIMO): Візуалізовано виділений канал зв'язку між базовою станцією та одним пристроєм користувача. Використання кількох антен на обох кінцях дозволяє передавати незалежні потоки даних (просторове мультиплексування), що максимізує індивідуальну швидкість передачі.

MU-MIMO (Multi-User MIMO): На схемі продемонстровано здатність базової станції, оснащеної кількома антенами, передавати різні потоки даних кільком користувачам одночасно в межах одного блоку ресурсів. Це досягається завдяки просторовому розділенню сигналів, що зменшує перешкоди та підвищує пропускну здатність усієї мережі.

Massive MIMO: Показано масштабоване розгортання великих антенних масивів (десятки або сотні елементів) на базовій станції. Рисунок ілюструє використання високоспрямованого формування променя (beamforming), що дозволяє точно фокусувати енергію на багатьох користувачах одночасно з

мінімальними інтерференціями, забезпечуючи масове підключення та надвисоку енергоефективність.

SU-MIMO, або Single User MIMO, в першу чергу зосереджений на покращенні зв'язку між базовою станцією та пристроєм одного користувача за допомогою кількох антен. У цій конфігурації кілька антен на передавачі та приймачі працюють разом, щоб максимізувати швидкість передачі даних та підвищити надійність з'єднання за допомогою таких методів, як просторове мультиплексування та посилення рознесення. Наприклад, у міських середовищах з високою щільністю населення, де кількість користувачів відносно обмежена, SU-MIMO може значно покращити враження окремих користувачів, забезпечуючи вищу швидкість передачі даних та стабільніші з'єднання. Ця конфігурація особливо корисна в сценаріях, коли виділена смуга пропускання виділяється одному користувачеві, наприклад, у потоковому відео високої чіткості або програмах віртуальної реальності, де важлива стабільна та висока пропускна здатність. Зосереджуючись на одному користувачеві одночасно, SU-MIMO ефективно підвищує якість обслуговування для кожного користувача, що робить його придатним для середовищ з меншою кількістю користувачів або там, де потрібні персоналізовані високопродуктивні з'єднання. Його реалізація є відносно простою порівняно зі складнішими системами MIMO, що робить його практичним вибором для сучасних мереж LTE та ранніх розгортань 5G, які прагнуть максимізувати продуктивність окремих користувачів. На відміну від цього, MU-MIMO, або багатокористувацький MIMO, розроблений для одночасного обслуговування кількох користувачів, використовуючи передові методи обробки сигналів та координацію користувачів. Ця можливість дозволяє базовій станції, оснащеній кількома антенами, передавати різні потоки даних кільком користувачам в межах одного блоку часово-частотних ресурсів, що значно збільшує пропускну здатність мережі. Наприклад, MU-MIMO має вирішальне значення в густонаселених міських районах або на стадіонах, де численним користувачам потрібен одночасний високошвидкісний доступ до Інтернету. Просторово розділяючи сигнали для різних користувачів, MU-MIMO зменшує перешкоди та підвищує спектральну

ефективність, тим самим краще використовуючи доступну пропускну здатність. Тим не менш, реалізація MU-MIMO вимагає складних алгоритмів формування променя та планування користувачів для ефективного управління перешкодами між користувачами. Координація між користувачами стає життєво важливою, особливо коли їхні канали корелюються або коли їхнє місцезнаходження швидко змінюється, що вимагає коригування в режимі реального часу. Отже, MU-MIMO не тільки підвищує пропускну здатність мережі, але й оптимізує використання спектральних ресурсів, що є фундаментальною вимогою для сучасних мереж 4G LTE-Advanced та 5G, які прагнуть підтримувати вибухове зростання підключених пристроїв та програм, що інтенсивно використовують дані [16].

Масовий MIMO являє собою значний крок вперед завдяки розгортанню великого масиву антен — часто десятків або навіть сотень — на базовій станції. Цей величезний масштаб розгортання антен дозволяє системі точно фокусувати енергію на окремих користувачах за допомогою високоспрямованого формування променя, тим самим суттєво збільшуючи пропускну здатність даних та енергоефективність. Наприклад, у мережах 5G масивний MIMO відіграє ключову роль, забезпечуючи надшвидкісний інтернет, низьку затримку та масове підключення пристроїв, що є критично важливим для таких застосувань, як автономні транспортні засоби, розумні міста та доповнена реальність. Велика кількість антен дозволяє системі обслуговувати багатьох користувачів одночасно з мінімальними перешкодами, ефективно створюючи канали просторового мультиплексування, які значно збільшують пропускну здатність. Крім того, переваги енергоефективності масивного MIMO випливають з його здатності направляти енергію точно туди, куди потрібно, зменшуючи втрати та знижуючи експлуатаційні витрати. Як основа інфраструктури 5G, масивний MIMO є важливим для задоволення потреб бездротового зв'язку наступного покоління, забезпечуючи високу пропускну здатність та надійне з'єднання, необхідні для суспільного та технологічного прогресу. Його розробка та розгортання є прикладом того, як антенна технологія продовжує розширювати межі можливостей бездротового зв'язку. Порівнюючи SU-MIMO та MU-MIMO, стає очевидним, що

кожен з них пропонує різні переваги, адаптовані до конкретних потреб мережі. SU-MIMO відмінно справляється з наданням виділених високоякісних з'єднань окремим користувачам, забезпечуючи максимальну швидкість передачі даних та надійне з'єднання для окремих користувачів у мережі. Цей підхід є особливо вигідним у сценаріях, коли користувачеві потрібна постійно висока пропускна здатність, наприклад, для потокового передавання відео високої чіткості або участі в діяльності, чутливій до затримки. І навпаки, MU-MIMO прагне максимізувати загальну ємність мережі, забезпечуючи одночасну передачу даних кільком користувачам в межах одних і тих самих спектральних ресурсів. Таке одночасне обслуговування підвищує спектральну ефективність і обслуговує більше користувачів без необхідності додаткової пропускної здатності, що робить його ідеальним для переповнених середовищ, таких як стадіони або міські гарячі точки. Однак ці переваги мають свої недоліки: системи MU-MIMO за своєю суттю складніші, вимагають розширеного формування променя, планування користувачів та управління перешкодами для запобігання погіршенню сигналу між користувачами. Витрати на впровадження та потреба в складних алгоритмах обробки сигналів ще більше ускладнюють розгортання. Тому вибір між SU-MIMO та MU-MIMO залежить від конкретних операційних цілей, балансуючи потребу в виділених високоякісних каналах з бажанням максимальної пропускної здатності та ефективності мережі.

Хоча Massive MIMO обіцяє трансформаційні переваги, його впровадження стикається зі значними технічними труднощами, головним чином через складність апаратного забезпечення та витрати, пов'язані з розгортанням великих антенних решіток. Побудова та обслуговування сотень антен вимагає значних інвестицій у передове виробництво та складні апаратні компоненти, що може бути непомірно дорогим, особливо для широкого розгортання. Крім того, отримання точної інформації про стан каналу (CSI), яка описує стан бездротового каналу, має вирішальне значення для ефективного формування променя та просторового мультиплексування в системах Massive MIMO. Збір та обробка цієї інформації в режимі реального часу є складним завданням, яке часто вимагає широкого

зворотного зв'язку від пристроїв користувача та складних алгоритмів для адаптації до швидкозмінних середовищ. Керування перешкодами стає все складнішим зі зростанням кількості антен та користувачів, що вимагає вдосконалених методів обробки сигналів для зменшення міжканальних перешкод та забезпечення оптимальної продуктивності. Крім того, щільні мережеві середовища посилюють ці проблеми, вимагаючи надійної координації перешкод та стратегій управління ресурсами. Подолання цих перешкод є важливим для реалізації повного потенціалу масивного MIMO в бездротових мережах наступного покоління.

Заглядаючи вперед, майбутнє технологій MIMO готове до вражаючих досягнень, зумовлених новими інноваціями. Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) в системи MIMO обіцяє революціонізувати адаптивне формування променя та розподіл ресурсів, дозволяючи мережам динамічно оптимізувати продуктивність на основі даних у режимі реального часу та умов навколишнього середовища. Цей інтелект може призвести до ефективнішого управління перешкодами, покращення взаємодії з користувачами та зниження експлуатаційних витрат. Крім того, розробляються гібридні системи MIMO, що поєднують елементи SU-MIMO, MU-MIMO та масивного MIMO, щоб використовувати сильні сторони кожної конфігурації, пропонуючи гнучкі рішення, адаптовані до різноманітних мережевих сценаріїв. Крім того, постійні дослідження в галузі проектування антен та методів обробки сигналів мають потенціал для ще більшої ємності, більшої енергоефективності та більш стійкого підключення. Досягнення в матеріалах, мініатюризації та обчислювальних алгоритмах продовжуватимуть розширювати межі можливостей технологій MIMO, гарантуючи, що майбутні бездротові мережі зможуть підтримувати зростаючі вимоги до додатків з інтенсивною обробкою даних, поширення Інтернету речей та наднадійного зв'язку з низькою затримкою.

Технологія MIMO з її різними класифікаціями — SU-MIMO, MU-MIMO та Massive MIMO — фундаментально трансформувала бездротовий зв'язок, підвищивши швидкість передачі даних, надійність та пропускну здатність мережі. SU-MIMO забезпечує виділені високоякісні канали для окремих користувачів, що робить її придатною для сценаріїв, що вимагають максимальної пропускної

здатності для кожного користувача, тоді як MU-MIMO максимізує загальну ефективність мережі завдяки одночасному передаванню багатьом користувачам, хоча й зі збільшенням складності та вимог до управління перешкодами. Massive MIMO є передовою технологією, пропонуючи безпрецедентну пропускну здатність та енергоефективність завдяки великим антенним решіткам, хоча її розгортання стикається зі значними практичними труднощами, пов'язаними зі складністю апаратного забезпечення та отриманням CSI. Майбутнє MIMO багатообіцяюче, з адаптивними системами на основі штучного інтелекту, гібридними конфігураціями та інноваційними конструкціями антен, які мають на меті ще більше розширити можливості бездротового зв'язку. У міру розвитку цих технологій вони продовжуватимуть лежати в основі розвитку швидших, надійніших та ефективніших бездротових мереж, що відповідають постійно зростаючим потребам цифрового світу [17].

2.3. Просторове мультиплексування та формування променя

У швидкозмінному ландшафті бездротового зв'язку технології, що оптимізують передачу даних та покращують якість сигналу, є надзвичайно важливими. Серед цих інновацій просторове мультиплексування та формування променя виділяються як ключові методи, що значно підвищують продуктивність мережі. Просторове мультиплексування використовує просторовий вимір бездротових каналів для одночасної передачі кількох потоків даних, тим самим підвищуючи спектральну ефективність. І навпаки, формування променя фокусує енергію передачі на певних приймачах для покращення сили та надійності сигналу. У розділі досліджуються фундаментальні принципи та переваги цих двох методів, підкреслюючи їхню роль у розвитку сучасних систем зв'язку завдяки використанню кількох антен, складних алгоритмів та інформації про канали в режимі реального часу.

Просторове мультиплексування фундаментально змінює ефективність передачі даних, використовуючи просторовий вимір, що пропонується кількома

антенами як на передавальному, так і на приймальному кінцях. Використовуючи кілька антен, один бездротовий пристрій може передавати незалежні потоки даних одночасно в одному діапазоні частот, ефективно збільшуючи ємність мережі без потреби в додатковому спектрі. Цей процес базується на принципі передачі різних сигналів через кожну антену, які після отримання можуть бути розділені та декодовані за допомогою передових методів обробки сигналів. Наприклад, у мережах 4G та 5G системи MIMO (Multiple Input Multiple Output) використовують просторове мультиплексування для досягнення вищих швидкостей передачі даних, що дозволяє надавати такі послуги, як потокове відео високої чіткості та ігри в реальному часі. Цей підхід не тільки підвищує спектральну ефективність, дозволяючи передавати більше даних з меншою пропускною здатністю, але й зменшує перешкоди між сигналами, тим самим збільшуючи загальну ємність та надійність мережі. Як результат, просторове мультиплексування покращує взаємодію з користувачем, забезпечуючи швидші та стабільніші з'єднання, навіть у густонаселених районах, де спектр обмежений.

Технічна реалізація формування променя базується на використанні фазованих антенних решіток, де керування напрямком сигналу відбувається шляхом динамічного регулювання фази та амплітуди. Залежно від етапу, на якому здійснюється обробка сигналу, розрізняють три основні архітектури: цифрову, аналогову та гібридну. Кожна з них пропонує різний рівень гнучкості керування променями та енергетичної ефективності, що безпосередньо впливає на складність апаратної частини базової станції. Порівняльний аналіз цих методів формування променя представлено в таблиці 2.2.

Формування променя доповнює просторове мультиплексування, фокусуючи бездротові сигнали безпосередньо на цільовому приймачі, тим самим значно покращуючи якість сигналу та покриття. На відміну від традиційної всенаправленої передачі, формування променя використовує масив антен для формування діаграми спрямованості, концентруючи енергію в певних напрямках залежно від розташування пристроїв. Цей цілеспрямований підхід мінімізує розсіювання

енергії сигналу, зменшуючи перешкоди для інших пристроїв, що працюють в тому ж середовищі.

Таблиця 2.2

Технічне порівняння методів формування променя

Метод формування	Область обробки сигналу	Переваги та можливості	Недоліки та обмеження
Цифрове формування	Цифрова область (Baseband).	Висока гнучкість та прецизійне керування кожним антенним елементом. Забезпечує паралельне формування багатьох променів.	Складне апаратне забезпечення та значне енергоспоживання системи.
Аналогове формування	Радіочастотна область (RF).	Простіша апаратна реалізація та висока енергоефективність.	Обмежена гнучкість; зазвичай дозволяє формувати лише один промінь у конкретний момент часу.
Гібридне формування	Комбінація цифрової та аналогової областей.	Оптимальний баланс між продуктивністю, гнучкістю та вартістю впровадження.	Вимагає складних алгоритмів координації між цифровим та аналоговим рівнями. Особливо актуальне для 5G.

Наприклад, у міських умовах з численними перекриваючимися бездротовими сигналами, формування променя може ізолювати сигнал певного пристрою, забезпечуючи отримання ним сильнішого та чіткішого з'єднання. Крім того, покращуючи співвідношення сигнал/шум (SNR), формування променя призводить до надійнішої передачі даних, меншої кількості втрачених з'єднань та вищої швидкості передачі даних. Воно також забезпечує краще покриття в складних умовах, таких як приміщення або в районах з фізичними перешкодами, де традиційні сигнали можуть ослабнути або розсіюватися. Зрештою, формування променя не тільки покращує індивідуальний досвід користувачів, але й підвищує загальну ефективність бездротових мереж, зменшуючи перешкоди та оптимізуючи використання доступного спектру.

Технічна основа просторового мультиплексування базується на складних конфігураціях MIMO та вдосконалених алгоритмах обробки сигналів. Системи MIMO використовують кілька антен як на передавачі, так і на приймачі, створюючи кілька незалежних каналів зв'язку в одному діапазоні частот. Для ефективного розділення цих потоків даних система спирається на інформацію про стан каналу (CSI), яка надає дані в режимі реального часу про характеристики бездротового каналу, включаючи перешкоди, завмирання та ефекти багатопроменевості. Використовуючи CSI, система може адаптивно оптимізувати стратегію передачі для максимізації пропускної здатності. Такі алгоритми, як розкладання за сингулярним значенням (SVD), відіграють вирішальну роль, математично розкладаючи матрицю каналу MIMO на ортогональні компоненти, дозволяючи передавачу одночасно надсилати кілька потоків даних, не спричиняючи перешкод. Наприклад, у мережах 5G ці алгоритми забезпечують високошвидкісні та надійні з'єднання навіть у складних середовищах з кількома відбивними поверхнями та динамічним рухом користувача. Ця складна взаємодія апаратного та програмного забезпечення гарантує, що просторове мультиплексування може реалізувати свій потенціал, розширюючи межі ємності та якості бездротових даних завдяки точному розумінню каналу та передовим методам обробки [18].

Технічні принципи, що лежать в основі формування променя, включають використання складної антенної технології та алгоритмів динамічної обробки сигналів. Центральним елементом цих принципів є фазовані антенні решітки, які складаються з кількох невеликих антенних елементів, сигнали яких ретельно контролюються за фазою та амплітудою. Регулюючи ці параметри, антенна решітка може електронним шляхом керувати напрямком переданого або прийнятого променя без фізичного переміщення антен. Ця можливість дозволяє системі адаптуватися в режимі реального часу до змінних умов каналу та розташування користувачів. Крім того, методи формування променя можна розділити на цифрові, аналогові та гібридні, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Цифрове формування променя пропонує високу гнучкість і точне керування шляхом обробки сигналів у цифровій області, але вимагає складного апаратного забезпечення та

високого енергоспоживання. Аналогове формування променя, з іншого боку, спрощує апаратне забезпечення, регулюючи сигнали в радіочастотній області, роблячи його більш енергоефективним, але менш гнучким. Гібридне формування променя поєднує сильні сторони обох, балансуючи складність і продуктивність, і особливо актуальне в розгортанні 5G. Ці принципи разом дозволяють бездротовим системам ефективно концентрувати енергію, покращити покриття та зменшити перешкоди, що є важливим для високопродуктивних та надійних мереж зв'язку.

Практичне застосування просторового мультиплексування та формування променя поширюється на різні сучасні бездротові технології та системи, значно підвищуючи їхню продуктивність та надійність. У бездротових мережах 5G ці методи є ключовими для досягнення вищих швидкостей передачі даних та розширення пропускної здатності користувачів, особливо в густонаселених міських середовищах, де ефективність використання спектру є критично важливою. Формування променя, наприклад, спрямовує сигнали точно до користувачів, забезпечуючи швидшу передачу даних та меншу кількість втрачених з'єднань, тоді як просторове мультиплексування дозволяє кільком користувачам одночасно використовувати один і той самий спектр. Аналогічно, Wi-Fi 6 та майбутні стандарти Wi-Fi включають ці технології для покращення покриття в приміщенні, максимізації пропускної здатності та підтримки більшої кількості підключених пристроїв. Окрім споживчих застосувань, супутникові та радіолокаційні системи також значною мірою залежать від формування променя для точного націлювання та сили сигналу, що є критично важливим для навігації, дистанційного зондування та військових операцій. Ці застосування демонструють, як просторове мультиплексування та формування променя є основою для розвитку комунікаційних можливостей у різних областях, забезпечуючи швидше, надійніше та ефективніше бездротове з'єднання в різних сценаріях.

Незважаючи на свої переваги, реалізація просторового мультиплексування та формування променя стикається з кількома проблемами та обмеженнями, які впливають на їх практичне впровадження. Однією з основних перешкод є складність проектування апаратного забезпечення та розробки передових

алгоритмів обробки сигналів, здатних підтримувати ці методи. Потреба в складних антенних решітках, високошвидкісних процесорах та адаптації в реальному часі збільшує вартість та складність системи. Крім того, продуктивність формування променя та просторового мультиплексування сильно залежить від точної оцінки каналу; помилки в оцінці характеристик бездротового каналу можуть призвести до неоптимальних напрямків променя та погіршення розділення даних, що зрештою зменшує переваги, які пропонують ці методи. Фактори навколишнього середовища, такі як фізичні перешкоди, багатопроменеве поширення та перешкоди від інших пристроїв, ще більше ускладнюють точність та стабільність формування променя. Нормативні обмеження, включаючи розподіл спектру та обмеження на випромінювання, також можуть обмежувати впровадження та ефективність цих технологій. Подолання цих проблем вимагає постійних досліджень та розробок для підвищення надійності апаратного забезпечення, алгоритмів обробки сигналів та адаптивних методів, що гарантує реалізацію повного потенціалу просторового мультиплексування та формування променя в реальних умовах.

Просторове мультиплексування та формування променя – це трансформаційні технології, які значно покращують системи бездротового зв'язку, збільшуючи пропускну здатність даних, покращуючи якість сигналу та розширюючи покриття. Просторове мультиплексування використовує кілька антен та передові алгоритми, такі як MIMO та SVD, щоб забезпечити одночасну передачу кількох потоків даних, тим самим підвищуючи спектральну ефективність та пропускну здатність мережі. Формування променя доповнює це, фокусуючи енергію на певних приймачах за допомогою фазованих антенних решіток та адаптивних алгоритмів, що призводить до сильніших, надійніших сигналів та зменшення перешкод. Ці методи вже є центральними для розвитку систем 5G, Wi-Fi 6 та супутникових систем, що ілюструє їх широку практичну значущість. Однак їх впровадження стикається з проблемами, пов'язаними зі складністю обладнання, чутливістю оцінки каналу та факторами навколишнього середовища. Усунення цих обмежень матиме вирішальне значення для повного використання їхнього потенціалу. Оскільки бездротовий зв'язок продовжує розвиватися, інтеграція

просторового мультиплексування та формування променя обіцяє підтримувати швидші, надійніші та ефективніші мережі, формуючи майбутнє зв'язку в усьому світі.

2.4. Математичні основи MIMO: матриця каналу, ранг, кореляція, CSI

Технологія MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) здійснила революцію в бездротовому зв'язку, значно покращивши пропускну здатність даних та надійність з'єднання. В основі систем MIMO лежить складна математична структура, яка моделює поширення сигналів між кількома антенами на передавачі та приймачі. Фундаментальними для цієї структури є концепції матриці каналу, її рангу та властивостей кореляції, а також доступність та використання інформації про стан каналу (CSI). Розуміння цих математичних основ є важливим для аналізу продуктивності MIMO, проектування надійних систем та оптимізації пропускної здатності. У розділі досліджуються математичні основи каналів MIMO, зосереджуючись на ролі матриці каналу, значенні її рангу та впливі кореляції, надаючи всебічний огляд основних принципів, що керують системами зв'язку MIMO [19].

Математичне моделювання ємності каналів MIMO базується на фундаментальній формулі Шеннона, яка враховує не лише відношення сигнал/шум (SNR), а й власні значення матриці каналу[1]. Ключовим показником тут виступає ранг матриці (H), який визначає кількість незалежних просторових потоків даних, що можуть бути надійно передані в середовищі багатопроменевості[2]. Чим багатшим є розсіювання в середовищі, тим вищим є ранг матриці, що дозволяє досягти лінійного зростання пропускної здатності при збільшенні кількості антен. Графічна залежність ємності каналу від SNR для різних конфігурацій антен та значень рангу представлена на рисунку 2.3.

Основною математичною конструкцією в системах MIMO є матриця каналу, яка інкапсулює фізичні характеристики середовища поширення бездротового сигналу між кількома передавальними та приймальними антенами. Математично

матриця каналу (H) зазвичай представляється як матриця (M × N), де (M) позначає кількість приймальних антен, а (N) – кількість передавальних антен. Кожен елемент (h_{ij}) цієї матриці моделює комплексне посилення від (j^{th}) передавальної антени до (i^{th}) приймальної антени, враховуючи такі фактори, як втрати на трасі, затінення та ефекти багатопроменевості.

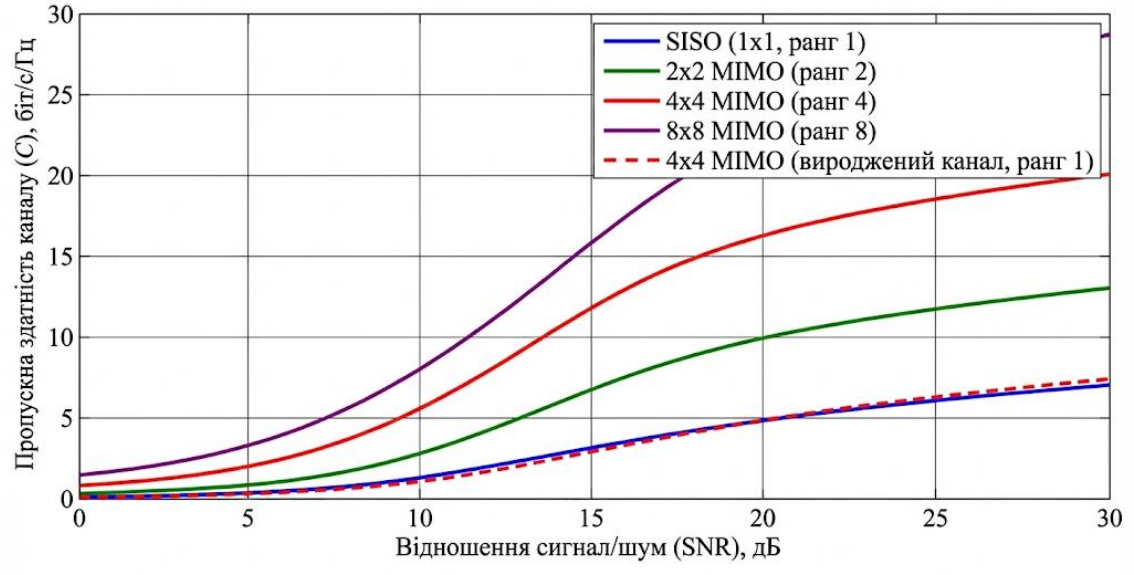


Рис. 2.3. Залежність пропускної здатності каналу від SNR та рангу матриці H

Значення матриці каналу полягає в її здатності характеризувати просторові властивості бездротового каналу, впливаючи на те, як сигнали комбінуються та інтерферують у приймачі. Її структура сильно залежить від факторів навколишнього середовища, включаючи кількість шляхів розсіювання, мобільність та розміщення антени. Наприклад, багаті середовища розсіювання, як правило, створюють матрицю каналу з різноманітними, некорельованими елементами, що сприяє просторовому мультиплексуванню. І навпаки, середовища з обмеженим розсіюванням або умовами прямої видимості часто призводять до висококорельованих матриць каналів, що знижує потенційні переваги MIMO. Математичне представлення дозволяє аналізувати та моделювати різні поведінки каналів, що робить його фундаментальним інструментом у проектуванні та оцінці систем MIMO.

Концепція рангу матриці є невід'ємною частиною розуміння пропускної здатності каналів MIMO, оскільки вона безпосередньо пов'язана зі здатністю системи передавати кілька потоків даних одночасно. Ранг матриці каналу (H) вказує на максимальну кількість незалежних просторових потоків даних, які можуть бути надійно передані, що відображає багатство середовища багатопроменевості. Матриця повного рангу (тобто ранг, що дорівнює (min(M, N))) означає, що канал може підтримувати максимально можливий коефіцієнт мультиплексування, тим самим значно збільшуючи пропускну здатність даних. І навпаки, матриця низького рангу передбачає обмежені просторові ступені свободи, обмежуючи кількість паралельних потоків даних та зменшуючи пропускну здатність. На ранг впливають умови навколишнього середовища, такі як багатство розсіювання — середовища з щільною багатопроменевістю схильні створювати матриці повного рангу, тоді як середовища з домінуючими шляхами прямої видимості або обмеженим розсіюванням знижують ранг. Конфігурація антени також відіграє певну роль; наприклад, збільшення кількості антен може підвищити ранг, якщо середовище це підтримує. Цей взаємозв'язок підкреслює важливість розгортання антен та проектування середовищ, які сприяють каналам повного рангу, тим самим максимізуючи потенціал технології MIMO у високопродуктивних бездротових мережах.

Просторова кореляція є критичним фактором, що впливає на продуктивність та пропускну здатність систем MIMO, часто виникає через недостатню відстань між антенами, обмежене розсіювання або домінантні шляхи поширення. Коли сигнали, отримані на різних антенах, сильно корелюють, переваги MIMO щодо різноманітності зменшуються, що призводить до зниження пропускної здатності та стійкості системи. Наприклад, у середовищах, де антени розміщені занадто близько одна до одної або де середовище розсіювання розріджене, результуюча матриця кореляції демонструє високі позадіагональні значення, що вказує на сильну кореляцію між сигналами антени. Ця кореляція ефективно зменшує кількість незалежних просторових каналів, подібно до меншої кількості антен, і таким чином перешкоджає здатності системи використовувати просторове мультиплексування.

Вимірювання та моделювання кореляції включає статистичні методи, такі як коефіцієнт кореляції або матриця просторової кореляції, які фіксують, наскільки схожі сигнали між елементами антени. Такі методи, як модель Кронекера, часто використовуються для аналізу кореляції шляхом розділення впливу кореляцій передачі та прийому. Розуміння та управління кореляцією має вирішальне значення для проектування системи; наприклад, розгортання антенних решіток з оптимальним інтервалом або використання схем рознесення може пом'якшити негативні ефекти кореляції. Точне моделювання кореляції дозволяє інженерам більш надійно прогнозувати продуктивність системи та розробляти стратегії для підвищення пропускної здатності MIMO в реальних умовах [20].

Важливий аспект ефективності систем MIMO залежить від доступності та точності інформації про стан каналу (CSI), яка описує поточні умови бездротового каналу. CSI можна розділити на три типи: ідеальна, часткова та без CSI. Ідеальна CSI означає, що передавач і приймач мають повне та точне знання матриці каналу (H), що дозволяє використовувати оптимальні стратегії передачі, такі як формування променя та адаптивна модуляція. Часткова CSI стосується сценаріїв, де доступна лише обмежена або застаріла інформація про канал, часто через помилки оцінки або затримки зворотного зв'язку, тоді як відсутність CSI вказує на відсутність будь-яких надійних знань про канал, що змушує систему працювати в умовах... консервативні припущення. На практиці отримання та оцінка CSI включає такі методи, як пілот-сигналізація, механізми зворотного зв'язку та алгоритми оцінки каналу, на які можуть впливати шум, мобільність та динаміка навколишнього середовища. Точна CSI відіграє ключову роль в оптимізації стратегій передачі MIMO; наприклад, з ідеальною CSI системи можуть виконувати попереднє кодування для максимізації пропускної здатності або мінімізації перешкод. І навпаки, обмежена або недосконала CSI вимагає надійних алгоритмів, які можуть адаптуватися до невизначеностей, забезпечуючи надійний зв'язок, незважаючи на помилки оцінки. Процес отримання та використання CSI залишається ключовим завданням при розгортанні високопродуктивних систем

MIMO, особливо в швидкозмінних середовищах, де своєчасна та точна інформація про канал є критично важливою для підтримки оптимальної продуктивності.

В основі систем MIMO лежить складна математична структура, яка моделює поширення сигналів між кількома антенами на передавачі та приймачі. Розуміння властивостей матриці каналу, таких як її ранг та просторова кореляція, є вирішальним для аналізу продуктивності та оптимізації пропускної здатності. Крім того, наявність точної інформації про стан каналу (CSI) дозволяє використовувати оптимальні стратегії передачі, що безпосередньо впливає на спектральну ефективність. Основні математичні параметри та їхній вплив на функціонування MIMO-систем наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Вплив математичних параметрів на характеристики каналу MIMO

Математичний параметр	Опис та математичне представлення	Вплив на продуктивність та пропускну здатність
Матриця каналу (H)	Матриця розмірністю M×N, де M — кількість приймальних, а N — передавальних антен.	Інкапсулює характеристики середовища поширення, включаючи втрати на трасі та багатопроменевість.
Ранг матриці (H)	Максимальна кількість незалежних просторових потоків даних, що можуть бути надійно передані.	Матриця повного рангу (min(M,N)) забезпечує максимально можливий коефіцієнт мультиплексування та пропускну здатність.
Просторова кореляція	Статистична схожість сигналів на різних антенах через недостатню відстань або обмежене розсіювання.	Висока кореляція зменшує виграш від рознесення та знижує ефективний ранг матриці, обмежуючи ємність каналу.
Інформація про стан каналу (CSI)	Дані про поточні умови бездротового каналу (може бути ідеальною, частковою або відсутньою).	Ідеальна CSI дозволяє використовувати формування променя та адаптивну модуляцію для максимізації пропускної здатності.

Властивості матриці каналу, зокрема її ранг та кореляція, безпосередньо впливають на досяжні швидкості передачі даних та загальну пропускну здатність системи в системах MIMO. Вищий ранг зазвичай відповідає більшому потенціалу просторового мультиплексування, що дозволяє одночасно передавати кілька

незалежних потоків даних, тим самим збільшуючи пропускну здатність. І навпаки, висока кореляція між сигналами антени знижує ефективний ранг, обмежуючи кількість паралельних потоків та обмежуючи пропускну здатність даних. Теоретичні основи, такі як формула Шеннона для визначення ємності каналів MIMO, явно включають власні значення матриці та сингулярні значення, отримані з матриці каналу, для кількісної оцінки ємності. Наявність CSI суттєво впливає на те, як застосовуються ці моделі; ідеальна CSI дозволяє використовувати такі методи, як заповнення водою, для оптимального розподілу потужності по каналах, максимізуючи ємність, тоді як часткова або відсутність CSI вимагає більш консервативних стратегій. Практично, розуміння взаємодії між властивостями матриці та ємністю керує проектуванням надійних систем MIMO, інформуючи про розгортання антен, алгоритми обробки сигналів та управління середовищем для використання сприятливих умов каналу та пом'якшення обмежень, що накладаються несприятливими.

Аналіз каналів MIMO значною мірою залежить від передових математичних інструментів та моделей, які сприяють розумінню та прогнозуванню складної поведінки каналу. Розкладання за сингулярними значеннями (SVD) – це фундаментальний метод, який розкладає матрицю каналу (H) на добуток (U ∩ V), де (U) та (V) – унітарні матриці, а (Sigma) – діагональна матриця, що містить сингулярні значення. Таке розкладання спрощує аналіз пропускної здатності, перетворюючи MIMO-канал на паралельні, незалежні підканали, кожен з яких пов'язаний з сингулярним значенням, і дозволяє розробляти оптимальні схеми передачі. Крім того, для характеристики стохастичної природи бездротових каналів використовуються статистичні моделі, такі як модель Кронекера або модель Вайхсельбергера, що фіксують такі ефекти, як згасання та кореляція, за допомогою розподілів ймовірностей та матриць просторової кореляції. Ці моделі полегшують моделювання та оцінку продуктивності за різних умов навколишнього середовища. Однак вони також мають обмеження; наприклад, ідеалізовані припущення можуть не повністю враховувати реальні складнощі, такі як нестаціонарність або негаусові перешкоди. Таким чином, емпіричні вимірювання та польові випробування

залишаються вирішальними для перевірки моделей та забезпечення надійної роботи системних конструкцій у практичних сценаріях. Поєднання математичних інструментів з реальними даними дозволяє інженерам краще зрозуміти поведінку каналу MIMO та розробити стратегії для оптимізації пропускної здатності та надійності в різноманітних бездротових середовищах.

Математичні основи технології MIMO охоплюють різноманітний набір концепцій, критично важливих для розуміння та оптимізації систем бездротового зв'язку. Матриця каналу служить основним представленням умов поширення, а її структура залежить від факторів навколишнього середовища та конфігурацій антени. Ранг матриці визначає потенціал просторового мультиплексування, що безпосередньо впливає на пропускну здатність системи, тоді як кореляція між сигналами антени може зменшити цей потенціал, зменшуючи ефективні ступені свободи. Інформація про стан каналу (CSI) відіграє життєво важливу роль у використанні цих властивостей матриці; ідеальна CSI дозволяє максимізувати пропускну здатність завдяки передовим методам передачі, тоді як часткова або відсутня CSI вимагає більш обережних, адаптивних стратегій. Математичні інструменти, такі як розкладання сингулярних значень та статистичні моделі, надають важливе розуміння поведінки каналу, сприяючи проектуванню надійних систем MIMO з високою пропускною здатністю. Зрештою, інтеграція цих теоретичних принципів з емпіричними вимірюваннями гарантує, що бездротові системи можуть відповідати вимогам сучасної передачі даних, що робить MIMO наріжним каменем сучасних мереж бездротового зв'язку [21].

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ MIMO У 5G ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ

3.1. Методика моделювання та оцінювання MIMO-сценаріїв у 5G

Поява технології 5G здійснила революцію в бездротовому зв'язку, забезпечивши безпрецедентну швидкість передачі даних, наднадійні з'єднання з низькою затримкою та масове підключення. Центральним елементом цих досягнень є технологія множинних входів і виходів (MIMO), яка використовує кілька антен як на передавальному, так і на приймальному кінцях для підвищення пропускної здатності системи та спектральної ефективності. Для ефективної розробки та розгортання систем 5G MIMO важлива комплексна методологія моделювання та оцінки різних сценаріїв. Ця методологія включає ретельні кроки, включаючи визначення параметрів каналу MIMO, конфігурацію антенних решіток та проектування стратегій просторового мультиплексування. Створюючи ретельні моделі на основі реальних параметрів і стандартів, дослідники та інженери можуть прогнозувати продуктивність системи, оптимізувати конфігурації та усувати потенційні проблеми перед розгортанням. Досліджується структурований підхід до моделювання та оцінки сценаріїв MIMO в 5G, підкреслюючи важливість кожного кроку для забезпечення надійних та ефективних систем зв'язку [22].

Основою точного моделювання MIMO-систем є правильне визначення параметрів каналу, що характеризують бездротове середовище. Перше, що потрібно врахувати, є вибір відповідного типу каналу, який визначається робочим діапазоном частот та сценарієм розгортання. Наприклад, у 5G поширені режими дуплексного зв'язку з часовим поділом каналів (TDD) та дуплексного зв'язку з частотним поділом каналів (FDD), причому TDD часто є кращим для масових застосувань MIMO через взаємність каналів, що спрощує процес оцінки. Крім того, діапазон частот — менше 6 ГГц проти міліметрових хвиль (mmWave) — суттєво впливає на характеристики поширення, такі як втрати на шляху поширення, втрати на проникнення та багатопроменевість.

Ефективна розробка та впровадження систем 5G MIMO потребує комплексної методології, яка дозволяє прогнозувати продуктивність системи та оптимізувати конфігурації ще до етапу реального розгортання. Запропонована методика базується на покроковому моделюванні фізичних процесів поширення сигналу, налаштуванні параметрів антенних решіток та оцінці ключових показників ефективності (KPI) у межах стандарту 5G NR. Такий підхід забезпечує високу точність результатів та їх відповідність галузевим вимогам. Узагальнений алгоритм проведення дослідження представлено на рисунку 3.1.

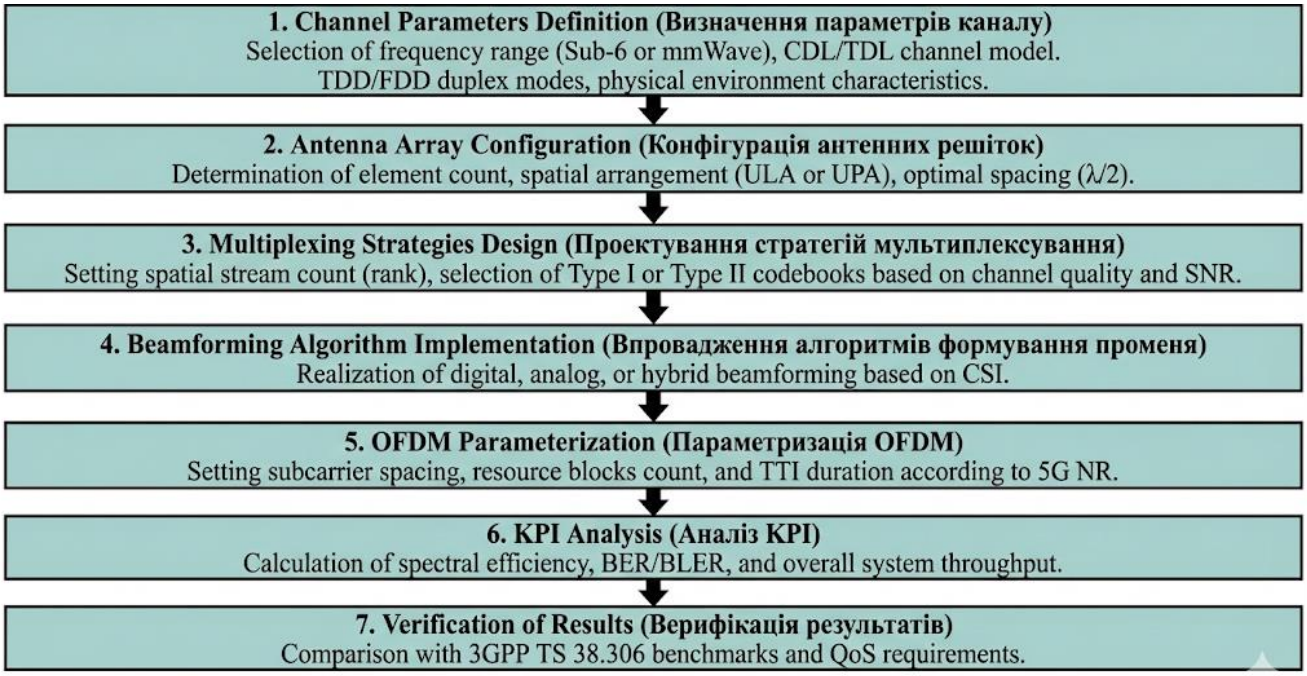


Рис. 3.1. Блок-схема методики моделювання та оцінювання MIMO-сценаріїв у 5G

Дана блок-схема відображає логічну послідовність етапів моделювання, що використовуються в даній роботі:

Блок 1. Визначення параметрів каналу: вибір робочого діапазону частот (Sub-6 або mmWave) та відповідної моделі каналу (CDL або TDL). Враховуються режими дуплексу TDD/FDD та фізичні характеристики середовища.

Блок 2. Конфігурація антенних решіток: визначення кількості антенних елементів та їх просторового розташування (ULA або UPA) з дотриманням оптимального кроку в половину довжини хвилі (lambda/2).

Блок 3. Проектування стратегій мультиплексування: налаштування кількості просторових потоків (рангу) та вибір відповідних кодових книг (Тип I або Тип II) залежно від якості каналу та SNR.

Блок 4. Впровадження алгоритмів формування променя: реалізація цифрових, аналогових або гібридних методів Beamforming на основі доступної інформації про стан каналу (CSI).

Блок 5. Параметризація OFDM: встановлення інтервалу між піднесучими, кількості ресурсних блоків та тривалості інтервалу передачі (TTI) згідно зі стандартом 5G NR.

Блок 6. Аналіз KPI: розрахунок спектральної ефективності, коефіцієнтів помилок (BER/BLER) та загальної пропускної здатності системи.

Блок 7. Верифікація результатів: порівняння отриманих даних із контрольними показниками стандартів 3GPP TS 38.306 та вимогами QoS.

Канали менше 6 ГГц, як правило, більш дифузні з багатим розсіюванням, що робить моделі, такі як стандарт 3GPP TR 38.901, особливо актуальними, оскільки він пропонує комплексні профілі каналів на основі масштабних вимірювальних кампаній. Для мм-хвильових частот використовуються такі моделі, як кластерна лінія затримки (CDL) або лінія затримки з відведенням (TDL), для врахування розрідженої та спрямованої природи цих каналів, включаючи високі втрати на шляху поширення та вимоги до формування променя. Після вибору типу та моделі каналу наступним кроком є формування матриці каналу – математичного представлення, що інкапсулює складні взаємодії між передавальною та приймальною антенами. Властивості цієї матриці, зокрема її ранг, є критично важливими; вищий ранг вказує на багатше багатопроменеве рознесення, що дозволяє створювати більше просторових потоків. Оцінка рангу матриці за допомогою розкладання за сингулярними значеннями (SVD) або аналізу власних значень визначає потенційні переваги мультиплексування та спрямовує проектування системи, гарантуючи, що конфігурація MIMO може максимально використати пропускну здатність каналу [23].

Наступний етап включає проектування фізичних антенних решіток, які будуть використовуватися як на передавальному, так і на приймальному кінцях. Визначення кількості антен – це процес балансування; збільшення кількості антенних елементів зазвичай підвищує пропускну здатність та можливості формування променя, але призводить до складності та витрат. Для 5G масивні конфігурації MIMO часто включають десятки або навіть сотні антенних елементів, розташованих у структурованих решітках, таких як уніфіковані лінійні решітки (ULA) або уніфіковані планарні решітки (UPA). Антени ULA складаються з антен, вирівняних в один ряд, що полегшує керування променем вздовж одного виміру, тоді як антени UPA розташовують антени у двовимірній сітці, що дозволяє формувати промінь як за азимутом, так і за кутом місця. Вибір між ULA та UPA залежить від середовища розгортання та вимог до покриття — міські макросоти зазвичай надають перевагу UPA для тривимірного покриття. Критичні параметри, такі як крок елементів — відстань між сусідніми елементами антени — повинні бути ретельно вибрані, щоб запобігти появі пелюсток ґратки та забезпечити оптимальне формування променя. Зазвичай використовується відстань приблизно в половину довжини хвилі; наприклад, на частоті 28 ГГц це буде приблизно 5,4 мм. Крім того, просторова кореляція між елементами антени впливає на продуктивність системи; висока кореляція зменшує коефіцієнти мультиплексування, тому проектування антенної решітки повинно враховувати такі фактори, як відстань між елементами та взаємний зв'язок, щоб мінімізувати кореляцію. Врахування цих конструктивних міркувань гарантує, що антенна решітка може використовувати просторові ступені свободи, що пропонуються середовищем, забезпечуючи високопродуктивні та надійні з'єднання.

Кінцева мета MIMO в 5G — максимізувати спектральну ефективність за допомогою просторового мультиплексування, яке передбачає одночасну передачу кількох потоків даних в одному частотному діапазоні. Налаштування цих сценаріїв передбачає вибір відповідного рівня мультиплексування, який визначається кількістю потоків відносно кількості доступних антен та якістю каналу. Наприклад, в ідеальних умовах з багатим розсіюванням та високим співвідношенням

сигнал/шум (SNR) система може підтримувати кілька потоків, ефективно збільшуючи швидкість передачі даних. І навпаки, в середовищах з низьким SNR або каналах з обмеженою багатопроменевістю доцільно використовувати меншу кількість потоків для підтримки надійності з'єднання. Вибір кодових книг – наборів матриць попереднього кодування – також впливає на продуктивність; кодові книги типу I зазвичай розроблені для передачі з розімкнутим контуром, що підходить для сценаріїв з обмеженою інформацією про стан каналу (CSI), тоді як кодові книги типу II використовують детальну CSI для оптимізації посилення формування променя та мультиплексування. Правильна конфігурація кодових книг забезпечує ефективне використання просторових ресурсів та зменшує перешкоди. Оцінка впливу співвідношення сигнал/шум (SNR) має вирішальне значення; вище SNR дозволяє передавати більше потоків одночасно без значного погіршення, тоді як умови з нижчим SNR вимагають консервативного мультиплексування для збереження стійкості з'єднання. Ретельно збалансувавши ці фактори — рівень мультиплексування, вибір кодової книги та співвідношення сигнал/шум — системні розробники можуть оптимізувати продуктивність MIMO відповідно до конкретних сценаріїв розгортання, що зрештою покращує пропускну здатність даних та зручність використання.

Розробка та розгортання систем 5G MIMO вимагає застосування структурованої методики моделювання, що дозволяє врахувати складні фізичні процеси та технічні обмеження. Цей процес охоплює ретельне визначення параметрів радіоканалу, конфігурацію антенних масивів та вибір стратегій просторового мультиплексування. Застосування такої методології забезпечує можливість прогнозування продуктивності системи та її оптимізації відповідно до галузевих стандартів. Ключові етапи та параметри запропонованої методики моделювання MIMO-сценаріїв наведені в таблиці 3.1 [24].

Формування променя відіграє ключову роль у покращенні якості сигналу та спрямуванні енергії до певних користувачів, тим самим покращуючи надійність та пропускну здатність з'єднання в системах 5G MIMO. Під час впровадження

алгоритмів формування променя в симуляції, перший крок включає вибір відповідного методу на основі системних вимог та апаратних обмежень.

Таблиця 3.1

Етапи та параметри методики моделювання MIMO-сценаріїв у 5G

Етап моделювання	Ключові параметри та моделі	Мета та вихідні дані
Параметризація каналу	Режими TDD/FDD , моделі CDL, TDL та 3GPP TR 38.901.	Створення реалістичного математичного представлення середовища поширення.
Конфігурація антен	Типи ULA/UPA , кількість елементів, крок λ/2.	Оптимізація просторової роздільної здатності та можливостей формування променя.
Налаштування сценаріїв	Ранг каналу (1-4) , SNR, кодові книги Типу I/II.	Максимізація спектральної ефективності та швидкості передачі даних.
Алгоритми Beamforming	Цифрові, аналогові та гібридні методи.	Покращення якості сигналу та спрямування енергії до цільових користувачів.
Фізичний рівень (OFDM)	SCS (15, 30, 60 кГц) , кількість PRB, TTI та доплерівські ефекти.	Реалістичне моделювання використання ресурсів та передачі даних у 5G NR.
Аналіз та верифікація	KPI (спектральна ефективність, BER/BLER, пропускна здатність) , стандарти 3GPP.	Кількісна оцінка продуктивності та перевірка на відповідність вимогам QoS.

Як свідчать дані таблиці 3.1, методика охоплює повний цикл проектування — від вибору фізичної моделі каналу до верифікації результатів за стандартами 3GPP TS 38.306. Особлива увага приділяється точності інформації про стан каналу (CSI) та вибору рангу матриці, оскільки ці фактори безпосередньо впливають на здатність системи підтримувати кілька паралельних потоків даних. Застосування моделей CDL та TDL дозволяє врахувати спрямовану природу міліметрового діапазону частот, що є життєво важливим для сучасних розгортань 5G. Такий структурований підхід дозволяє виявити потенційні вузькі місця в архітектурі

мережі та оптимізувати розподіл ресурсів для досягнення цільових показників пропускної здатності.

Цифрове формування променя пропонує точне керування, застосовуючи складні вагові коефіцієнти безпосередньо до цифрових сигналів базової смуги, що дозволяє використовувати передові методи, такі як адаптивне керування променем та усунення перешкод. Гібридне формування променя, яке поєднує аналогову та цифрову обробку, забезпечує баланс між продуктивністю та складністю апаратного забезпечення, що робить його придатним для масових розгортань MIMO, де вартість та енергоспоживання є критичними факторами. Аналогове формування променя, з іншого боку, використовує фазозсувні пристрої на радіочастотному вході для керування променями, пропонуючи простоту, але обмежену гнучкість. Побудова матриць цифрового керування променем включає проектування вагових векторів, які вирівнюються з бажаним напрямком передачі або прийому, часто використовуючи такі алгоритми, як Minimum Variance Distortionless Response (MVDR) або формувач променя Бартлетта. Ці матриці оптимізуються на основі оціненої інформації про стан каналу (CSI), щоб максимізувати посилення до цільового користувача, одночасно придушуючи перешкоди. Однак ефективність формування променя критично залежить від точності CSI; Помилки в оцінці каналу, пов'язані з шумом, затримкою зворотного зв'язку або апаратними порушеннями, можуть значно погіршити продуктивність формування променя. Моделювання впливу помилок CSI передбачає введення збурень у матриці каналів та оцінку результуючих посилень формування променя, рівнів перешкод та загальної пропускної здатності системи. Цей аналіз допомагає у розробці надійних алгоритмів, які можуть витримувати реальні недоліки, забезпечуючи надійне керування променем та покращену спектральну ефективність у практичному розгортанні [25].

Стандарт 5G New Radio (NR) використовує ортогональне частотне мультиплексування (OFDM) як основну форму хвилі, що робить важливим точне моделювання роботи конфігурацій MIMO в цій структурі. Налаштування параметрів OFDM включає вибір інтервалу між піднесучими (Δf), зазвичай 15, 30

або 60 кГц, залежно від сценаріїв розгортання та рівнів мобільності. Кількість блоків фізичних ресурсів (PRB), які є групами піднесуючих, визначає пропускну здатність, виділену для передачі, тоді як інтервал часу передачі (TTI) – тривалість, протягом якої плануються дані – впливає на затримку та пропускну здатність. Точне моделювання цих параметрів забезпечує реалістичне моделювання передачі даних та використання ресурсів. Крім того, сценарії високої мобільності вводять доплерівські зсуви, які викликають зміщення частоти, що може призвести до міжносійної інтерференції (ICI) та погіршити продуктивність MIMO. Моделювання доплерівських ефектів включає обчислення частотного зсуву на основі швидкості користувача та несучої частоти, а потім включення його до моделі каналу для оцінки його впливу на когерентність каналу та ефективність формування променя та просторового мультиплексування. Крім того, розрахунки пропускної здатності для кожної піднесуючої та на рівні PRB включають оцінку схеми модуляції та кодування (MCS), якості каналу та рівнів інтерференції. Підсумовуючи швидкості передачі даних між піднесучими в межах кожного PRB, розробники систем можуть оцінити загальну пропускну здатність, виявити вузькі місця та оптимізувати стратегії розподілу ресурсів. Це детальне моделювання гарантує, що продуктивність системи MIMO відповідає реальним умовам, що сприяє надійному проектуванню системи та плануванню потужності.

Оцінка продуктивності систем MIMO вимагає аналізу ключових показників ефективності (KPI), отриманих із змодельованих характеристик каналу. Однією з критичних метрик є спектральна ефективність, яка вимірює обсяг даних, що передаються на одиницю смуги пропускання, і часто виражається в бітах за секунду на герц (біт/с/Гц). Розрахунок спектральної ефективності включає врахування рангу матриці каналу: вищі ранги зазвичай дозволяють передавати більше одночасних просторових потоків, що призводить до збільшення пропускної здатності. Для різних рангів досяжну спектральну ефективність можна оцінити на основі кількості потоків, порядку модуляції та швидкостей кодування, що дає уявлення про обмеження пропускної здатності за різних умов каналу. Коефіцієнт бітових помилок (BER) та коефіцієнт блочних помилок (BLER) також є важливими

показниками, що відображають надійність передачі даних. На них впливають такі фактори, як SNR, схема модуляції та конфігурація MIMO; наприклад, схеми модуляції вищого порядку вимагають вищого SNR для підтримки низького BER/BLER. Моделювання та аналіз цих коефіцієнтів помилок для різних конфігурацій та рангів антен допомагає в проектуванні систем, які балансують пропускну здатність та надійність. Крім того, вивчення того, як пропускна здатність залежить від кількості антен, виявляє переваги та зменшення віддачі від масового розгортання MIMO. Зі збільшенням кількості антен зростає потенціал просторового мультиплексування, але практичні міркування, такі як взаємний зв'язок та кореляція каналів, можуть обмежувати коефіцієнти посилення. Аналіз цих взаємозв'язків дозволяє розробникам систем оптимізувати конфігурації антенних решіток та стратегії MIMO для максимальної ефективності та надійності в різних операційних середовищах [26].

Критичним кроком у перевірці моделей MIMO є порівняння результатів моделювання зі стандартами та вимогами, зазначеними в документах 3GPP, зокрема TS 38.306, який визначає контрольні показники продуктивності для систем 5G NR. Ці контрольні показники включають цільові показники спектральної ефективності, пропускної здатності, затримки та надійності за різних сценаріїв розгортання. Наприклад, стандарт визначає мінімальні рівні пропускної здатності для різних категорій користувацького обладнання, які можна безпосередньо порівняти з імітованими швидкостями передачі даних, досягнутими за допомогою змодельованих конфігурацій MIMO. Крім того, оцінка поширюється на оцінку того, чи відповідають імітовані схеми MIMO параметрам якості обслуговування (QoS), зазначеним у специфікаціях, таким як максимальна затримка, прийнятні показники помилок та критерії покриття. Наприклад, конфігурація MIMO, яка підтримує кілька потоків та надійне формування променя, повинна демонструвати здатність підтримувати високі швидкості передачі даних з низькою затримкою та мінімальними показниками помилок, що відповідає вимогам QoS 5G. Аналіз цих результатів дозволяє дослідникам визначити придатність конкретних стратегій MIMO для реального розгортання, визначаючи конфігурації, які не тільки

оптимізують пропускну здатність, але й забезпечують відповідність нормативним та експлуатаційним стандартам. Зрештою, шляхом порівняння даних моделювання з вимогами 3GPP можна сформулювати обґрунтовані висновки щодо найефективніших та найсумісніших конфігурацій MIMO для різних випадків використання 5G, що буде орієнтиром для майбутніх зусиль щодо розвитку та стандартизації.

Підсумовуючи, методологія моделювання та оцінки сценаріїв MIMO в 5G охоплює комплексний ряд кроків, життєво важливих для оптимізації продуктивності системи та забезпечення відповідності галузевим стандартам. Процес починається з точного визначення параметрів каналу, включаючи вибір відповідних типів каналів та моделей, таких як 3GPP TR 38.901, CDL та TDL, які закладають основу для реалістичного моделювання. Проектування конфігурацій антен включає ретельний вибір кількості, розташування та відстані між елементами антени для максимізації просторових ступенів свободи, мінімізуючи при цьому негативні ефекти кореляції. Налаштування сценаріїв просторового мультиплексування вимагає балансування кількості потоків, вибору кодової книги та умов SNR для підвищення пропускної здатності без шкоди для надійності. Впровадження алгоритмів формування променя — цифрових, гібридних чи аналогових — спирається на точну інформацію про стан каналу та надійну матричну конструкцію, при цьому моделювання враховує помилки CSI для оцінки їхнього впливу на коефіцієнти посилення системи. Моделювання продуктивності в рамках 5G NR OFDM включає встановлення відповідних параметрів, врахування ефектів Доплера та точне обчислення пропускної здатності, що разом впливає на реальну застосовність. Оцінка характеристик системи на основі ключових показників ефективності каналу додатково спрямовує оптимізацію, оскільки такі показники, як спектральна ефективність, коефіцієнт BER та пропускна здатність, показують практичні обмеження різних конфігурацій. Нарешті, порівняння результатів моделювання зі стандартами 3GPP гарантує, що запропоновані схеми MIMO відповідають необхідним критеріям якості обслуговування (QoS) та продуктивності, що полегшує визначення оптимальних конфігурацій для

розгортання. Загалом, ця структурована методологія забезпечує чіткий шлях для розробки ефективних, надійних та стандартизованих систем 5G MIMO, прокладаючи шлях для покращеного бездротового зв'язку та майбутніх інновацій.

3.2. Аналіз впливу MIMO-конфігурацій на пропускну здатність мережі 5G

Поява технології 5G сповістила про нову еру бездротового зв'язку, що характеризується значним підвищенням швидкості передачі даних, зменшенням затримки та збільшенням пропускної здатності мережі. Центральним фактором досягнення цих амбітних цільових показників є розгортання конфігурацій MIMO (Multiple Input Multiple Output), які використовують кілька антен для покращення якості сигналу та пропускної здатності. З розвитком технології MIMO розуміння того, як різні конфігурації впливають на продуктивність мережі, стає вирішальним для оптимізації розгортання 5G. Представлено аналітичний аналіз впливу різних конфігурацій MIMO, зокрема, рангу каналу, порівняння між однокористувацьким (SU) та багатокористувацьким (MU) MIMO, а також розміру антенних решіток, на пропускну здатність мережі 5G. Розбираючи ці фактори за допомогою моделювання, симуляції та теоретичного аналізу, ми прагнемо з'ясувати оптимальні стратегії для максимізації пропускної здатності в різних мережевих сценаріях [27].

Фундаментальний аспект аналізу продуктивності MIMO включає проведення ретельного тестування пропускної здатності для різних рангів каналів, які відображають кількість просторових потоків, що використовуються в передачі. У мережах 5G ранг каналу варіюється від 1 до 4, причому кожен ранг представляє кількість незалежних потоків даних, які можуть передаватися одночасно. Моделювання пропускної здатності для рангів від 1 до 4 дозволяє детально зрозуміти, як збільшення кількості просторових потоків впливає на загальну швидкість передачі даних. Емпіричні дані показують, що зі збільшенням рангу каналу пропускна здатність загалом покращується завдяки покращеним можливостям просторового мультиплексування; однак ця тенденція не є лінійною

та залежить від таких факторів, як співвідношення сигнал/шум (SNR) та рівні перешкод. Наприклад, при низькому SNR вищі ранги можуть не дати значного покращення та навіть можуть погіршити продуктивність через збільшення перешкод та складності. Тому визначення мінімального рангу каналу, який надійно досягає цільової якості обслуговування (QoS), є важливим. Встановлення цього мінімального рангу передбачає балансування переваг збільшення пропускної здатності зі збільшенням складності та потенціалом для погіршення сигналу. У практичних сценаріях мережеві оператори часто визначають цей поріг за допомогою ретельного моделювання, враховуючи умови навколишнього середовища та щільність користувачів, щоб гарантувати, що обрана конфігурація послідовно забезпечує бажану якість обслуговування (QoS) без зайвих витрат ресурсів.

Окрім конфігурацій окремих каналів, оцінка порівняльної ефективності однокористувацького MIMO (SU-MIMO) та багатокористувацького MIMO (MU-MIMO) надає критичне розуміння їхніх ролей у реальних мережах. SU-MIMO зосереджується на обслуговуванні одного користувача кількома просторовими потоками, максимізуючи пропускну здатність для цього користувача за рахунок обмеженої багатокористувацької ємності. І навпаки, MU-MIMO дозволяє одночасну передачу даних кільком користувачам, тим самим збільшуючи загальну ємність мережі та спектральну ефективність. Моделювання мережевого навантаження за допомогою обох схем MIMO виявляє їхні переваги та обмеження за різних умов. Наприклад, у сценаріях із помірною щільністю користувачів та сприятливими умовами каналу, MU-MIMO часто перевершує SU-MIMO, ефективно використовуючи просторове мультиплексування для одночасного обслуговування кількох користувачів. Однак, коли мережа зазнає високих перешкод або коли користувачі просторово розділені з поганою кореляцією каналів, SU-MIMO може забезпечити вищу пропускну здатність на користувача завдяки своїм виділеним потокам передачі. Крім того, ефективність MU-MIMO залежить від кількості користувацького обладнання (UE), яке воно може обслуговувати одночасно; моделювання демонструє, що MU-MIMO може ефективно

підтримувати кілька UE, коли кількість антен перевищує кількість користувачів, що забезпечує кращий розподіл ресурсів. Встановлення умов, за яких SU-MIMO перевершує MU-MIMO, включає аналіз таких факторів, як розподіл користувачів, мобільність та точність інформації про стан каналу, які впливають на загальну пропускну здатність та надійність мережі [28].

Аналіз продуктивності системи проводився шляхом тестування пропускної здатності для різних рангів каналів, що відображають кількість незалежних просторових потоків даних, які передаються одночасно. Результати моделювання для рангів від 1 до 4 дозволяють оцінити, як саме збільшення кількості потоків впливає на загальну швидкість передачі даних у мережі. Встановлено, що зі зростанням рангу пропускна здатність загалом покращується, проте цей приріст суттєво залежить від умов відношення сигнал/шум (SNR). Зокрема, при низькому SNR використання вищих рангів може спричинити погіршення продуктивності через зростання рівня перешкод. Узагальнені результати порівняння різних антенних конфігурацій (8, 16 та 32 елементи) наведено на рисунку 3.2.

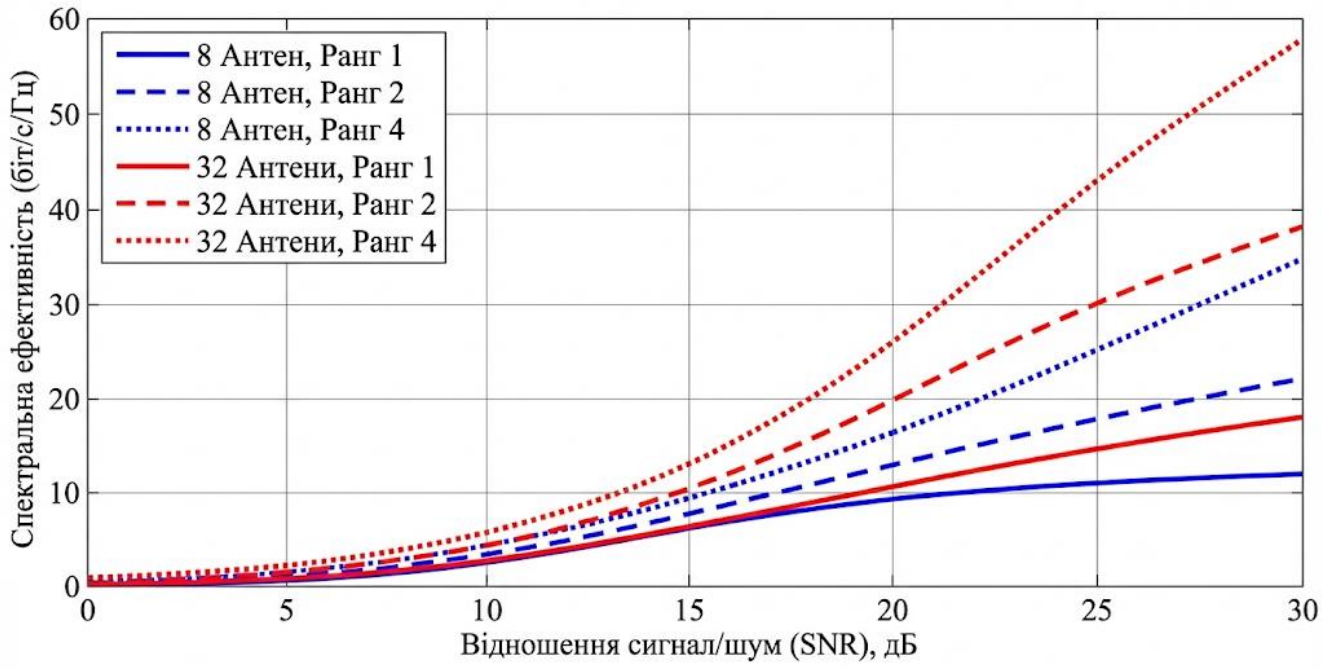


Рис. 3.2. Залежність пропускної здатності мережі від кількості антен та рангу каналу

Даний рисунок відображає результати аналітичного дослідження впливу розміру антенної решітки та просторового мультиплексування на швидкість передачі даних:

Кореляція з кількістю антен: Графік демонструє чітку залежність: перехід від 8-канальної до 32-канальної решітки призводить до значного покращення спектральної ефективності та пропускної здатності, особливо у щільних середовищах.

Вплив рангу: Кожна крива ілюструє, що вищий ранг матриці дозволяє системі підтримувати більше паралельних потоків, що збільшує швидкість передачі. Проте на графіку видно «ефект насичення» — після певної межі (32 антени) приріст віддачі зменшується через апаратну складність та енергоспоживання.

Залежність від умов сигналу: Візуалізація підтверджує, що максимальні переваги від масивних конфігурацій MIMO (32 канали та ранг 4) досягаються лише при високих значеннях SNR, тоді як в умовах слабкого сигналу результати різних конфігурацій стають більш подібними.

Дані результати дозволяють визначити оптимальну структуру масивного MIMO, яка забезпечує максимальну ефективність при збереженні доцільних витрат на розгортання.

Розмір та конфігурація антенних решіток, особливо систем Massive MIMO, відіграють ключову роль у визначенні продуктивності пропускної здатності. Аналіз різних розмірів антенних решіток, таких як 8, 16 та 32, за допомогою моделювання пропускної здатності виявляє чітку кореляцію між кількістю антен та пропускною здатністю мережі. Більші решітки можуть генерувати більш сфокусовані промені, покращувати просторову роздільну здатність та зменшувати перешкоди, тим самим суттєво збільшуючи пропускну здатність. Наприклад, перехід від 8-до 32-канальної решітки призводить до значного покращення спектральної ефективності, особливо в густонаселених міських середовищах, де управління перешкодами є критично важливим. Залежність пропускної здатності від кількості антен також залежить від базової структури антенної решітки, такої як рівномірна планарна решітка (UPA), яка сприяє тривимірному формуванню променя. Аналіз показує, що зі збільшенням

кількості антен здатність решітки обслуговувати кількох користувачів з високою швидкістю передачі даних значно покращується, але зі зменшенням віддачі після певної точки через практичні обмеження, такі як складність апаратного забезпечення та споживання енергії. Отже, формування висновків про оптимальну структуру масивного MIMO передбачає балансування підвищення продуктивності з витратами на впровадження, що призводить до визначення ідеальної конфігурації антени – потенційно решітки з 16 або 32 антенами – яка забезпечує максимальну ефективність пропускної здатності, зберігаючи при цьому доцільні витрати на розгортання та експлуатацію [29].

Істотним фактором, що впливає на продуктивність MIMO, є точність інформації про стан каналу (CSI), яка відображає знання передавачем поточних умов бездротового каналу. Точна CSI забезпечує оптимальне формування променя та просторове мультиплексування, що безпосередньо впливає на швидкість передачі даних. Для аналізу її значення моделювання систем в ідеальних умовах CSI, де передавач має ідеальні, миттєві знання каналу, порівнюється зі сценаріями з неповна або застаріла CSI, що більш репрезентативно для реальних розгортань. На практиці отримання CSI включає механізми зворотного зв'язку, які вносять затримки, що призводить до розбіжностей між розрахунковим та фактичним станом каналу. Ці затримки можуть призвести до роботи передавача на застарілій інформації, що призводить до втрат пропускної здатності через неоптимальне формування променя та збільшення перешкод. Кількісні оцінки показують, що навіть незначні затримки в оновленнях CSI можуть призвести до значного погіршення продуктивності, особливо в швидкозмінних каналах, типових для середовищ з високою мобільністю. Встановлення мінімальних вимог до оновлення CSI включає визначення частоти та точності вимірювань каналу, необхідних для підтримки стабільного та надійного з'єднання. Наприклад, у сценаріях з високою мобільністю потрібні часті оновлення CSI — потенційно кожні кілька мілісекунд — щоб запобігти суттєвим втратам пропускної здатності. І навпаки, у статичних середовищах або середовищах з низькою мобільністю достатньо менш частих оновлень, що зменшує накладні витрати, зберігаючи при цьому продуктивність.

Баланс між точністю CSI та накладними витратами системи є критично важливим, оскільки надмірний зворотний зв'язок може знизити загальну спектральну ефективність, тоді як недостатні оновлення погіршують переваги передових схем MIMO. Пропускна здатність, виділена бездротовій системі, суттєво впливає на потенційне збільшення пропускної здатності, яке можна досягти за допомогою конфігурацій MIMO, і цей вплив помітно варіюється між частотами нижче 6 ГГц та діапазонами міліметрових хвиль (mmWave). Проведення порівняльного моделювання пропускної здатності показує, що ширші пропускні здатності зазвичай забезпечують вищі швидкості передачі даних, але їхня ефективність модулюється такими факторами, як затухання сигналу та перешкоди. Діапазони нижче 6 ГГц, що характеризуються ширшим покриттям та кращими характеристиками поширення, зазвичай мають менше затухання та перешкоди, що забезпечує стабільний зв'язок на ширших територіях. Однак їхній обмежений доступний спектр обмежує максимальну пропускну здатність. Навпаки, частоти mmWave пропонують величезні пропускні здатності — часто кілька гігагерц — що забезпечує надзвичайно високі швидкості передачі даних, особливо в поєднанні з передовими методами MIMO, такими як формування променя. Тим не менш, сигнали mmWave дуже чутливі до затухання, спричиненого перешкодами, атмосферними умовами та перешкодами, що може суттєво обмежити їх ефективний діапазон та надійність. Оцінка цих ефектів показує, що хоча mmWave може забезпечити виняткову пропускну здатність в ідеальних умовах прямої видимості, діапазон нижче 6 ГГц залишається більш придатним для ширшого покриття з помірними вимогами до пропускної здатності. Отже, оптимальний діапазон для розгортання різних схем MIMO залежить від конкретного випадку використання: високопродуктивні, локалізовані застосування можуть надавати перевагу mmWave, тоді як широкомасштабне покриття виграє від частот нижче 6 ГГц з надійними реалізаціями MIMO, розробленими для зменшення затухання та перешкод.

Просторова кореляція антен є критичним параметром, що впливає на ефективність MIMO, оскільки висока кореляція між елементами антени зменшує ступінь незалежних просторових каналів та зменшує коефіцієнти

мультиплексування. Моделювання пропускної здатності на різних рівнях кореляції демонструє, що зі збільшенням кореляції ефективна кількість корисних просторових потоків зменшується, що призводить до зниження пропускної здатності. Прийнятні пороги кореляції зазвичай визначаються на основі бажаних показників продуктивності; наприклад, підтримка кореляції нижче 0,3 забезпечує достатнє рознесення та коефіцієнти мультиплексування, тим самим зберігаючи ефективність системи. Для зменшення ефектів кореляції поширеною стратегією є збільшення кроку між елементами – фізичної відстані між елементами антени. Оцінка ефективності цього підходу показує, що більша відстань між елементами зменшує взаємний зв'язок та кореляцію, покращуючи просторове рознесення решітки. Однак практичні обмеження, такі як розмір пристрою та обмеження монтажу, накладають верхні межі на відстань між елементами, особливо в компактному користувацькому обладнанні та невеликих базових станціях. Отже, вибір оптимального кроку між елементами передбачає балансування потреби в низькій кореляції та високій пропускній здатності з фізичними та вартісними обмеженнями, причому типові оптимальні значення коливаються від половини до однієї довжини хвилі на робочій частоті для підтримки продуктивності решітки без надмірного розміру.

Аналітичне дослідження продуктивності мережі 5G при використанні різних конфігурацій MIMO дозволяє визначити ключові чинники, що визначають реальну швидкість передачі даних. У ході моделювання було розглянуто вплив рангу каналу, розміру антенних масивів, режимів обслуговування користувачів та точності оцінки стану каналу на пропускну здатність системи. Встановлено, що синергія цих параметрів дозволяє досягти цільових показників 5G, проте потребує ретельного балансування між продуктивністю та апаратною складністю. Результати порівняльного аналізу впливу основних MIMO-конфігурацій на пропускну здатність наведено в таблиці 3.2.

Повне розуміння впливу MIMO на пропускну здатність 5G вимагає порівняння між його теоретичними максимальними можливостями та реальною продуктивністю. Теоретично, максимальну пропускну здатність у системах нового

радіо (NR) 5G можна розрахувати за допомогою встановлених формул, які включають такі параметри, як пропускна здатність, порядок модуляції, швидкість кодування та кількість просторових потоків.

Таблиця 3.2

Вплив параметрів MIMO-конфігурацій на пропускну здатність мережі 5G

Параметр конфігурації	Характеристики моделювання	Вплив на пропускну здатність
Ранг каналу	Варіювання від 1 до 4 просторових потоків.	Збільшення рангу забезпечує зростання швидкості завдяки просторовому мультиплексуванню, проте ефективність залежить від рівня SNR.
Тип MIMO (SU проти MU)	Порівняння однокористувацького та багатокористувацького режимів.	MU-MIMO підвищує загальну ємність мережі у сценаріях із високою щільністю, тоді як SU-MIMO ефективніший при слабкій кореляції каналів або високих перешкодах.
Розмір антенної решітки	Аналіз решіток на 8, 16, 32 та 64 елементи.	Більші решітки покращують фокусування променів та просторову роздільну здатність, суттєво збільшуючи спектральну ефективність.
Точність CSI	Порівняння ідеальної та застарілої інформації про стан каналу.	Навіть незначні затримки в оновленні CSI (понад 10-20 мс у динамічних сценаріях) призводять до значних втрат пропускної здатності.
Просторова кореляція	Визначення прийнятних порогів (оптимально < 0,3).	Висока кореляція між елементами антени зменшує кількість незалежних каналів, що обмежує потенціал мультиплексування.

Ці розрахунки передбачають ідеальні умови — ідеальне знання каналу, відсутність перешкод та оптимальне середовище поширення — які служать верхньою межею того, чого може досягти технологія. Наприклад, використовуючи специфікації 3GPP, можна отримати максимальну швидкість передачі даних для заданої конфігурації MIMO. недоідеалізований припущення, що забезпечують орієнтир для потенційної продуктивності. Однак фактичне розгортання, особливо

в складних міських та внутрішніх середовищах, часто не відповідає цим теоретичним межам. Реальні симуляції, які враховують такі фактори, як багатопроменеве поширення, ослаблення сигналу, перешкоди, мобільність користувачів та недосконаліть апаратного забезпечення, виявляють помітний розрив у продуктивності. Міські та внутрішні середовища створюють унікальні проблеми, такі як блокування сигналу та високий рівень перешкод, що значно знижує фактичну пропускну здатність порівняно з теоретичними прогнозами. Ці розбіжності підкреслюють важливість реалістичного моделювання та висвітлюють необхідність адаптивних алгоритмів, вдосконаленої обробки сигналів та надійного планування мережі для подолання розриву. На основі цих висновків рекомендації включають оптимізацію збору CSI, використання вдосконалених методів формування променя та адаптацію конфігурацій MIMO до конкретних сценаріїв розгортання, щоб максимально наблизитися до теоретичних меж, наскільки це дозволяють практичні обмеження.

На завершення, аналіз конфігурацій MIMO показує, що різні фактори критично впливають на пропускну здатність мережі 5G. Проведення тестування пропускної здатності для різних рангів каналів демонструє, що збільшення кількості просторових потоків підвищує пропускну здатність до певної точки, з оптимальним мінімальним рангом, необхідним для балансу продуктивності та складності. Порівняння схем SU-MIMO та MU-MIMO підкреслює їхні відповідні сильні сторони, де MU-MIMO перевершує інші у сценаріях з високою пропускною здатністю та кількома користувачами, тоді як SU-MIMO може перевершити в середовищах з меншою кількістю користувачів або несприятливими умовами. Розмір та структура антенних решіток, особливо систем Massive MIMO, суттєво впливають на пропускну здатність, причому більші решітки пропонують значний приріст, але стикаються з практичними труднощами розгортання. Точність CSI стає життєво важливим елементом, оскільки застаріла або неповна інформація призводить до суттєвого зниження продуктивності, що підкреслює важливість своєчасної та точної оцінки каналу. Міркування щодо пропускної здатності додатково впливають на ефективність MIMO, причому діапазони міліметрових

хвиль забезпечують високий потенціал пропускної здатності, але обмежене покриття, тоді як діапазони нижче 6 ГГц пропонують надійність на більших площах. Крім того, просторова кореляція антен впливає на кількість незалежних каналів, а такі стратегії, як збільшення міжелементної відстані, допомагають пом'якшити ефекти кореляції. Зрештою, реальна продуктивність часто не досягає теоретичних максимумів через фактори навколишнього середовища, що підкреслює важливість адаптивних методів та реалістичного моделювання в плануванні розгортання. Загалом, оптимізація пропускної здатності 5G за допомогою MIMO вимагає цілісного підходу — балансування передових конфігурацій антен, точних знань про канали, відповідного вибору пропускної здатності та адаптації до особливостей навколишнього середовища — щоб використовувати весь потенціал технології 5G для різноманітних застосувань [30].

3.3. Практичні рекомендації щодо застосування MIMO-технологій у 5G для підвищення ефективності

Поява технології 5G знаменує собою значний стрибок у бездротовому зв'язку, обіцяючи безпрецедентний рівень швидкості, ємності та надійності. Центральним фактором реалізації цих переваг є технології MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), які використовують кілька антен як у точках передачі, так і в точках прийому для підвищення пропускної здатності даних та спектральної ефективності. Щоб повністю використати потенціал MIMO в мережах 5G, важливо впровадити практичні стратегії, які оптимізують конфігурації антен, покращують точність інформації про стан каналу (CSI) та адаптують режими MIMO відповідно до умов мережі. Розглядаються комплексні рекомендації щодо ефективного застосування технологій MIMO в системах 5G, зосереджуючись на формуванні оптимальних антенних решіток, підвищенні точності CSI та динамічній оптимізації однокористувацьких (SU) та багатокористувацьких (MU) операцій MIMO.

Реалізація повного потенціалу технологій MIMO у мережах 5G потребує переходу від статичних налаштувань до динамічних адаптивних стратегій.

Ефективність системи залежить від здатності мережі в реальному часі аналізувати умови радіоефіру, щільність користувачів та їх мобільність для вибору оптимального режиму роботи — від однокористувацького SU-MIMO до масивних багатокористувацьких конфігурацій. Запропонована комплексна схема прийняття рішень, що базується на інтеграції технічних рекомендацій щодо налаштування антенних решіток, методів формування променя та алгоритмів просторового мультиплексування, представлена на рисунку 3.3.

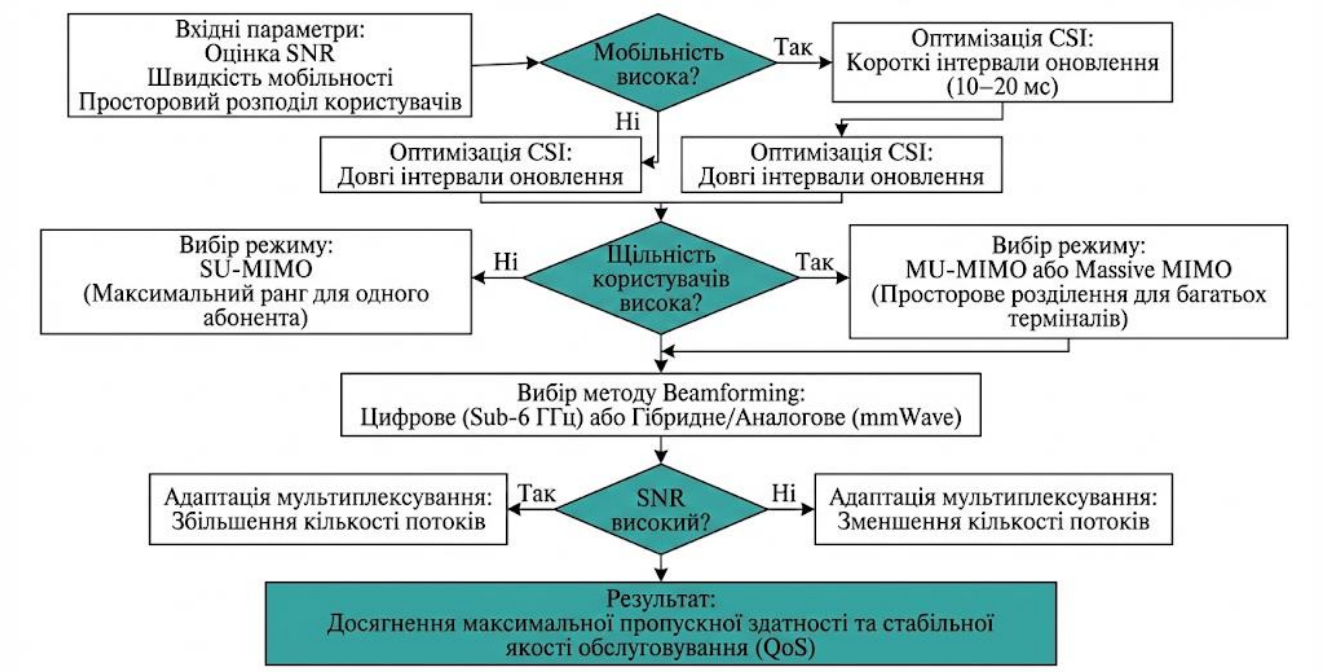


Рис. 3.3. Алгоритм динамічної адаптації MIMO-режимів та параметрів мережі 5G

Дана схема ілюструє практичну дорожню карту для автоматизованого управління ресурсами MIMO в реальних умовах розгортання:

Вхідні параметри: Алгоритм розпочинає роботу з оцінки поточних умов — відношення сигнал/шум (SNR), швидкості пересування користувачів (мобільності) та їхнього просторового розподілу.

Оптимізація CSI: На основі рівня мобільності встановлюється частота оновлення інформації про стан каналу: від коротких інтервалів (10–20 мс) для

швидкого руху до довших інтервалів у статичних середовищах для економії ресурсів .

Вибір режиму (SU/MU/Massive MIMO):

За низької щільності користувачів обирається SU-MIMO, що дозволяє використовувати повний ранг антенної решітки для одного абонента.

У сценаріях з високою щільністю активується MU-MIMO або Massive MIMO для одночасного обслуговування багатьох терміналів за допомогою просторового розділення.

Вибір методу Beamforming: Залежно від частотного діапазону та вимог до енергоефективності застосовується цифрове формування променя (для Sub-6 ГГц) або гібридне/аналогове (для mmWave) .

Адаптація просторового мультиплексування: Динамічне коригування кількості потоків на основі SNR для запобігання перешкодам та підтримки надійності.

Результат: Досягнення максимальної пропускної здатності та стабільної якості обслуговування (QoS) за будь-яких мережевих сценаріїв.

Фундаментальний крок до максимізації пропускної здатності 5G включає проектування оптимальних конфігурацій антенних решіток, зокрема рівномірної планарної решітки (UPA), яка добре підходить для щільного міського середовища з просторовими обмеженнями та високою щільністю користувачів. Вибір відповідної решітки UPA вимагає врахування специфічних характеристик міських сценаріїв, таких як відбиття від будівель, мобільність користувачів та рівні перешкод. Наприклад, розгортання UPA з ретельно підібраним інтервалом між елементами, зазвичай близько половини довжини хвилі, може значно зменшити просторову кореляцію, що, у свою чергу, підвищує коефіцієнт мультиплексування. Рекомендації включають використання мінімальної кількості антенних елементів, які відповідають бажаним порогам пропускної здатності; наприклад, моделювання показує, що для досягнення гігабітних швидкостей у районах з високою щільністю необхідно щонайменше 64 елементи.

Крім того, оптимізація інтервалу між елементами, який зазвичай називають міжелементним кроком, має вирішальне значення. Занадто близький інтервал може збільшити кореляцію та зменшити пропускну здатність, тоді як надмірний інтервал може спричинити появу пелюсток дифракції та проблеми з практичним розгортанням. Точне налаштування цього параметра забезпечує баланс між просторовою роздільною здатністю та зменшенням перешкод, тим самим підвищуючи загальну спектральну ефективність у міських умовах розгортання. Точна інформація про стан каналу (CSI) є життєво важливою для ефективного формування променя та просторового мультиплексування в системах 5G MIMO. Розробка підходів до підвищення точності CSI охоплює механізми, які прискорюють процеси зворотного зв'язку, адаптуються до мобільності користувачів та оптимізують алгоритми оцінки каналу, особливо в діапазонах міліметрових хвиль (mmWave).

Наприклад, впровадження методів стиснутого зондування може зменшити накладні витрати, пов'язані зі зворотним зв'язком CSI, що дозволяє швидше оновлювати дані без шкоди для точності. У сценаріях з високою мобільністю, таких як користувачі в транспортних засобах або високошвидкісних поїздах, інтервали оновлення CSI необхідно скоротити, щоб ефективно відстежувати швидкі зміни каналу; наприклад, оновлення CSI кожні 10-20 мілісекунд може бути необхідним для підтримки вирівнювання променя. І навпаки, в середовищах з низькою мобільністю довші інтервали (наприклад, 100 мілісекунд) можуть заощаджувати ресурси. Крім того, алгоритми оцінки каналу, адаптовані для частот міліметрових хвиль, що характеризуються високими втратами на шляху поширення та розрідженими багатопроменевими компонентами, повинні використовувати гібридне формування променя та передові методи обробки сигналів, такі як адаптивні фільтри або оцінювачі на основі машинного навчання. Ці покращення разом підвищують стійкість та надійність каналів 5G, забезпечуючи оптимальну точність формування променя та максимізуючи пропускну здатність даних у різних сценаріях.

Оптимізація роботи режимів SU-MIMO та MU-MIMO відповідно до навантаження мережі та розподілу користувачів є критично важливою для ефективного використання ресурсів. Вибираючи відповідний режим MIMO, мережеві оператори повинні враховувати кількість активних користувацьких пристроїв (UE) та їх просторовий розподіл. В умовах низького та помірного навантаження SU-MIMO, зосереджуючись на одному користувачеві, може використовувати весь ранг антенної решітки для забезпечення максимальної швидкості передачі даних, особливо коли користувач має високоякісний шлях прямої видимості (LOS). І навпаки, в середовищах з високою щільністю з численними активними UE, MU-MIMO стає незамінним. Правильна конфігурація MU-MIMO передбачає одночасне планування кількох UE, одночасно керуючи перешкодами між користувачами за допомогою точного формування променя та стратегій групування користувачів. Наприклад, алгоритми динамічної адаптації можуть розподіляти просторові потоки на основі умов каналу в режимі реального часу, максимізуючи спектральну ефективність. Крім того, встановлення умов, за яких SU-MIMO забезпечує максимальний ранг, наприклад, коли один користувач демонструє багате середовище розсіювання, може допомогти у прийнятті обґрунтованих рішень щодо вибору режиму. Це передбачає постійний моніторинг стану каналу та використання інтелектуальних алгоритмів, які безперешкодно перемикають режими, забезпечуючи підтримку високої пропускної здатності та низької затримки в мережі незалежно від коливань навантаження та мобільності користувачів.

Вибір найбільш відповідної методики формування променя є важливим для максимізації якості сигналу та енергоефективності в різних діапазонах частот 5G. Вибір між цифровим, гібридним та аналоговим формуванням променя залежить від таких факторів, як складність апаратного забезпечення, споживання енергії та робоча частота. Цифрове формування променя пропонує найвищу гнучкість та точність, що робить його придатним для діапазонів нижче 6 ГГц, де потрібні високі швидкості передачі даних та гнучкість променя; однак воно вимагає значних апаратних ресурсів та потужності. Гібридне формування променя досягає балансу,

поєднуючи аналогові та цифрові компоненти, знижуючи вартість та споживання енергії, зберігаючи при цьому значні можливості формування променя, що ідеально підходить для середніх частот.

Аналогове формування променя, з іншого боку, часто є кращим на частотах міліметрових хвиль через його меншу складність та енергоефективність, незважаючи на обмежену гнучкість формування променя. Для подальшого покращення співвідношення сигнал/шум (SNR) вирішальним є налаштування зважувальних масивів (WA); Використання таких методів, як фазозсувні механізми та коригування амплітуди, може точніше вирівнювати діаграми спрямованості променя з розташуванням користувача, тим самим збільшуючи ефективне співвідношення сигнал/шум (SNR). Крім того, виправлення помилок формування променя, що виникають внаслідок апаратних порушень або динаміки навколишнього середовища, вимагає впровадження адаптивних алгоритмів, таких як процедури калібрування та механізми зворотного зв'язку в реальному часі. Такі корекції допомагають підтримувати оптимальне вирівнювання променя, зменшувати перешкоди та забезпечувати високоякісні з'єднання, особливо в складних міських середовищах, де багатопроменеве поширення та мобільність створюють додаткові проблеми.

Для повноцінної реалізації переваг технології MIMO в мережах 5G необхідно впроваджувати комплексні стратегії, що охоплюють як фізичне проектування антенних систем, так і алгоритмічну оптимізацію роботи мережі в реальному часі. Основна мета цих рекомендацій полягає у забезпеченні балансу між пропускною здатністю, надійністю з’єднання та енергоефективністю обладнання. Системний підхід до застосування MIMO-технологій дозволяє операторам гнучко адаптувати інфраструктуру до умов щільної міської забудови або високошвидкісного руху користувачів. Основні практичні рекомендації щодо підвищення ефективності систем 5G MIMO наведено в таблиці 3.3.

Наведені в таблиці 3.3 рекомендації формують цілісну дорожню карту для підвищення продуктивності сучасних бездротових систем. Зокрема, акцент на динамічній адаптації параметрів, таких як інтервали оновлення CSI та ранг каналу,

дозволяє мінімізувати втрати пропускної здатності, спричинені мобільністю користувачів або складними умовами поширення сигналів. Важливо розуміти, що максимальний ефект досягається саме при інтегрованому підході, де фізичне розміщення антен Massive MIMO поєднується з інтелектуальними алгоритмами групування користувачів у режимі MU-MIMO. У сукупності ці заходи забезпечують відповідність мережі вимогам QoS 5G та закладають фундамент для подальшої еволюції в напрямку стандартів 6G.

Таблиця 3.3

Практичні рекомендації щодо застосування та оптимізації MIMO в 5G

Сфера впровадження	Основна рекомендація	Очікуваний технічний ефект
Антенні конфігурації	Використання решіток UPA (щонайменше 64 елементи для міст) з кроком $\lambda/2$.	Мінімізація просторової кореляції та досягнення гігабітних швидкостей передачі.
Точність CSI	Скорочення інтервалів оновлення до 10–20 мс для високої мобільності та використання методів стиснутого зондування.	Підтримка точного фокусування променя та стабільності зв’язку в динамічних умовах.
Вибір режиму MIMO	Динамічне перемикання між SU-MIMO (для низького навантаження) та MU-MIMO (для високої щільності).	Максимізація спектральної ефективності та ємності мережі залежно від кількості активних абонентів.
Формування променя	Пріоритетне використання гібридного Beamforming для середніх частот та аналогового для mmWave.	Оптимальний баланс між продуктивністю системи та енергоспоживанням обладнання.
Інфраструктура (BS)	Щільне розгортання малих комірок для mmWave та точне налаштування азимуту секторів.	Забезпечення безперервності покриття та мінімізація міжсекторних перешкод.
Адаптація потоків	Автоматичне регулювання рангу каналу на основі порогів SNR та значень матриці H.	Запобігання міжналежній інтерференції та підтримка надійності передачі даних.

Удосконалення механізмів просторового мультиплексування є життєво важливим для підвищення спектральної ефективності та врахування зростаючої

кількості підключених пристроїв. Один з ключових аспектів включає вибір оптимальної кількості потоків MIMO на основі переважаючих умов SNR; при високих рівнях SNR використання більшої кількості потоків може суттєво збільшити пропускну здатність, тоді як при низьких SNR зменшення кількості потоків запобігає перешкодам та підтримує надійність з'єднання. Для сприяння цьому адаптивні алгоритми повинні динамічно коригувати ранг каналу, дозволяючи системі використовувати сприятливі умови та пом'якшувати несприятливі наслідки. У каналах з високою мобільністю конструкція кодових книг – попередньо визначених наборів векторів формування променя – повинна бути оптимізована для швидкої адаптації до швидких змін каналу; Це може включати використання ієрархічних або багатороздільних кодових книг, що дозволяють ефективно шукати та вирівнювати промінь.

Встановлення правил для автоматичної адаптації рангу каналу є не менш важливим; наприклад, система може контролювати показники в режимі реального часу, такі як власні значення матриці каналу або пороги SNR, щоб визначити, чи слід збільшувати чи зменшувати кількість просторових потоків. Ці стратегії разом дозволяють мережі динамічно оптимізувати просторове мультиплексування, забезпечуючи високу швидкість передачі даних з мінімальними перешкодами та підтримуючи надійні з'єднання в різних сценаріях мобільності.

Стратегічне розміщення базових станцій 5G з технологією Massive MIMO суттєво впливає на покриття мережі, пропускну здатність та управління перешкодами. Оптимізація висоти антенних панелей передбачає балансування між зоною покриття та якістю сигналу; вище розміщення може розширити покриття та зменшити перешкоди, але також може збільшити втрати на трасі та сприйнятливість до факторів навколишнього середовища. Для розгортання mmWave встановлення оптимальної щільності базових станцій (BS) є критично важливим через обмежений діапазон поширення; щільне розгортання — іноді з малим радіусом комірки — забезпечує достатню силу та пропускну здатність сигналу, особливо в міських середовищах з високою щільністю населення. Ретельне планування орієнтації секторів також є важливим для мінімізації міжсекторних перешкод;

Використання методів секторизації з точним азимутом та кутами нахилу гарантує, що промені спрямовані в цільові області, зменшуючи перекриття та перешкоди між сусідніми секторами. Використання передових інструментів, таких як моделювання трасування променів та моніторинг мережі в реальному часі, може допомогти визначити ідеальне розташування та орієнтацію базової станції, що дозволить операторам оптимізувати покриття, покращити спектральну ефективність та забезпечити надійне надання послуг у складних міських умовах.

Максимізація пропускної здатності в системах 5G MIMO вимагає інтегрованого підходу, який інтелектуально поєднує конфігурації однокористувацького (SU), багатокористувацького (MU) та масивного MIMO на основі мережевих умов у реальному часі та потреб користувачів. У сценаріях, що характеризуються низькою або помірною щільністю користувачів та високоякісними каналами, SU-MIMO може забезпечити максимальну швидкість передачі даних, повністю використовуючи ранг антенної решітки для одного користувача. І навпаки, в середовищах з високою щільністю та численними активними UE, MU-MIMO стає важливим, дозволяючи одночасну передачу даних кільком користувачам, одночасно керуючи перешкодами між користувачами за допомогою точного формування променя та стратегій групування користувачів. Масовий MIMO з його великомасштабними антенними решітками може додатково збільшити пропускну здатність та спектральну ефективність, особливо в міських гарячих точках.

Для динамічної оптимізації цих режимів вирішальне значення має встановлення правил адаптивної переконфігурації антенних решіток на основі поточних станів каналу, таких як співвідношення сигнал/шум, мобільність користувачів та рівні перешкод. Наприклад, коли умови каналу сприятливі, а середовище статичне, система може надавати перевагу масивному MIMO з численними потоками; навпаки, під час сценаріїв високої мобільності або складних перешкод вона може перемикатися на більш консервативні режими, такі як SU-MIMO з меншою кількістю потоків. Розробка комплексної, узагальненої схеми прийняття рішень передбачає використання алгоритмів у реальному часі, які

оцінюють такі показники, як власні значення каналу, розподіл користувачів та навантаження трафіку, а потім відповідно вибирають найбільш підходящий режим MIMO. Ця адаптивна структура забезпечує оптимальне використання доступних ресурсів, підвищує пропускну здатність та підтримує якість обслуговування в різних мережевих сценаріях, що зрештою призводить до більш стійкої та ефективної інфраструктури 5G.

Ефективне застосування технологій MIMO має вирішальне значення для реалізації повного потенціалу мереж 5G. Формування оптимальних конфігурацій антенних решіток, зокрема стратегічне розгортання UPA з ретельно каліброваним міжелементним інтервалом, закладає основу для високої пропускної здатності та надійного покриття в щільному міському середовищі. Підвищення точності CSI за допомогою прискорених механізмів зворотного зв'язку та вдосконалених алгоритмів оцінки каналу забезпечує точне формування променя, що є важливим для підтримки надійності з'єднання, особливо на частотах міліметрових хвиль.

Крім того, адаптація режимів SU-MIMO та MU-MIMO до поточного навантаження мережі та розподілу користувачів дозволяє ефективно використовувати ресурси, а вибір відповідних методів формування променя та оптимізація просторового мультиплексування ще більше підвищують продуктивність. Стратегічне розміщення та орієнтація базових станцій за допомогою технології Massive MIMO відіграють значну роль в оптимізації покриття та управління перешкодами. Нарешті, інтеграція цих елементів у комплексну адаптивну систему прийняття рішень, яка поєднує різні режими MIMO на основі умов каналу в режимі реального часу, може максимізувати пропускну здатність та надійність мережі. У сукупності ці рекомендації забезпечують надійну дорожню карту для розгортання ефективних мереж 5G з високою пропускною здатністю, які відповідають зростаючим потребам користувачів та програм у нашому все більш пов'язаному світі.

ВИСНОВКИ

У першому розділі проведено всебічний аналіз особливостей та архітектури мобільного зв’язку п’ятого покоління (5G). Встановлено, що стандарт 5G New Radio (NR) розроблений як гнучке та масштабоване рішення, здатне адаптуватися до різноманітних сценаріїв розгортання — від сільської місцевості до щільної міської забудови. Ключовою інновацією є впровадження масштабованої нумерології (інтервал між піднесучими від 15 кГц до 240 кГц), що дозволяє оптимізувати мережу як для широкого покриття, так і для наднизької затримки. Визначено три фундаментальні класи послуг: eMBB для надшвидкісної передачі даних (понад 10 Гбіт/с), URLLC для критично важливих завдань із затримкою до 1 мс та mMTC для масового підключення пристроїв Інтернету речей. Також обґрунтовано необхідність гібридного використання спектра: діапазонів Sub-6 ГГц для надійного покриття та міліметрових хвиль (mmWave) для досягнення максимальної пропускної здатності .

У другому розділі досліджено концепції та принципи роботи MIMO-технологій. З’ясовано, що ефективність систем MIMO критично залежить від конфігурації антенних решіток: лінійні (ULA) підходять для простого формування променя в одній площині, тоді як площинні (UPA) дозволяють реалізувати повноцінне тривимірне керування променями . Проаналізовано класифікацію MIMO, де SU-MIMO забезпечує пікову швидкість для одного користувача, MU-MIMO підвищує загальну ємність мережі, а Massive MIMO стає основою інфраструктури 5G завдяки використанню сотень антенних елементів для точного фокусування енергії. Математично обґрунтовано, що пропускна здатність системи визначається рангом матриці каналу, який вказує на кількість незалежних просторових потоків. Також висвітлено роль інформації про стан каналу (CSI), точність якої є обов’язковою умовою для ефективного формування променя та просторового мультиплексування.

У третьому розділі на основі розробленої методики проведено аналіз ефективності різних MIMO-сценаріїв. Моделювання підтвердило, що збільшення

рангу каналу до 4 суттєво підвищує швидкість передачі даних, проте цей ефект залежить від відношення сигнал/шум (SNR). Доведено, що збільшення кількості антенних елементів (наприклад, до 32 або 64) значно покращує спектральну ефективність у щільному міському середовищі. Встановлено критичну важливість оновлення CSI: у сценаріях з високою мобільністю затримки понад 10-20 мс призводять до значних втрат пропускної здатності.

За результатами дослідження сформульовано практичні рекомендації :

– Для міських районів доцільно використовувати антени UPA з кількістю елементів не менше 64.

– Необхідно впроваджувати алгоритми динамічного перемикання між SU-MIMO та MU-MIMO залежно від поточного навантаження мережі.

– Для діапазонів mmWave рекомендовано використовувати гібридне або аналогове формування променя для балансу між продуктивністю та енергоспоживанням.

– Щільність розміщення базових станцій повинна враховувати обмежений радіус дії міліметрових хвиль для забезпечення безперервності гігабітних з'єднань.