

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Телекомунікацій**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2021 р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра**

**Спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
на тему: «Аналіз методів множинного доступу 5-G мереж»**

Виконав: студент _____ 4 _____ курсу, групи _____ ТЗ-71
(шифр групи)

_____ Козлов Валерій Геннадійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник _____ Явіся В.С. доцент, к.н _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2021 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Телекомунікацій**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«___» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

**на дипломну роботу студенту
Козлову Валерію Геннадійовичу**

1. Тема роботи : «Аналіз методів множинного доступу 5-G мереж».

керівник роботи _____ Явіся В.С. доцент, к.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від 14 квітня 2021 р. № 1007-с

2. Термін подання студентом роботи 7 червня 2021 року.

3. Вихідні дані до роботи

- Методи множинного дуступу 5G мереж.

4. Зміст роботи

1. Особливості побудови мережі 5G.

2. Методи множинного доступу 5G мереж.

3. Розробка методики застосування системи Massive-MIMO.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

1. Загальна характеристика 5G.

2. Актуальність мережі 5G.

3. Методи множинного доступу 5G мереж.

4. Порівняння методів множинного доступу.

5. Аналіз існуючої системи MIMO.

6. Технологія Beamforming.

7. Особливості Massive MIMO.

8. Переваги системи Massive MIMO.

9. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Явіся В.С. доцент, к.н.	11.10.2020	06.12.2020
Розділ 2	Явіся В.С. доцент, к.н.	06.12.2020	07.02.2021
Розділ 3	Явіся В.С. доцент, к.н.	07.02.2021	14.05.2021

7. Дата видачі завдання 11 жовтня 2020 року.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Пошук літератури згідно теми дипломної роботи.	28.08.2021	
2.	Аналіз виконання поставлених завдань, виявлення засобів для вирішення задачі.	17.10.2021	
3.	Дослідження особливостей побудови мережі 5G.	06.12.2020	
4.	Пошук, дослідження та аналіз інформації щодо методів множинного доступу в мережах п'ятого покоління.	07.03.2021	
5.	Розробка методики застосування системи Massive MIMO.	14.05.2021	
6.	Аналіз отриманих результатів.	20.05.2021	
7.	Оформлення дипломної роботи першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.	24.05.2021	

Студент
Керівник

Валерій КОЗЛОВ
Валерій ЯВІСЯ

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 59 сторінок, 28 рисунків, 3 таблиці.

У даній кваліфікаційній роботі проведено аналіз мереж 5 покоління (5G), вимоги до них та технології, які в них застосовуються. Проаналізовано системи множинного доступу та досліджено систему Massive-MIMO в мережі 5G. Розглянуто перспективи її використання у мережах 5 покоління. Також представлено методи використання даної технології.

Оскільки розвиток технологій стрімко рухається вперед, постає необхідність для збільшення пропускної здатності, та зменшення затримок у мережі. Саме швидкість та якість передачі інформації впливають на коректну роботу у будь якій сфері діяльності.

Актуальність даної роботи полягає у підвищенні пропускної здатності та збільшення об'єму передаваної інформації за найкоротші проміжки часу, та покращення передачі даних в мобільній мережі.

Ключові слова: Multiple Access, Massive-MIMO, 5G.

ABSTRACT

Qualifying work: 59 pages, 28 figures, 3 tables.

This qualification paper analyzes 5G networks, their requirements and the technologies that apply them. Multiple access systems is analyzed and the Massive-MIMO system in the 5G network is investigated. Prospects of its use in 5th generation networks are considered. Methods of using this technology are also presented.

As technology advances rapidly, there is a need to increase bandwidth and reduce network latency. It is the speed and quality of information transmission that affect the correct work in any field of activity.

The relevance of this is to increase bandwidth and increase the amount of transmission information in the shortest possible time, and to improve data transmission on the mobile network.

Keywords: Multiple Access, Massive-MIMO, 5G.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ МЕРЕЖІ 5G.....	10
1.1 Загальна характеристика 5G	10
1.2 Використання безпілотників у мережі 5G.....	13
1.3 Застосування у Internet of Things	16
1.4 Перспективи та актуальність мережі шостого покоління (6G).....	17
Висновки до першого розділу.....	19
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ 5G МЕРЕЖ.....	20
2.1 Множинний доступ в мережах п'ятого покоління	20
2.2 Massive Orthogonal Access.....	21
2.3 Massive Non-orthogonal Access	25
2.4 Порівняння методів множинного доступу.	29
2.5 Аналіз існуючої системи MIMO.....	30
Висновки до другого розділу	40
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ MASSIVE- MIMO	42
3.1 Технологія <i>Beamforming</i>	42
3.2 Характеристика просторового каналу між базовою станцією та користувачем	45
3.3 Обробка сигналу для <i>Massive-MIMO</i>	47
3.4 <i>Massive-MIMO</i> в 5G.....	50
3.5 Особливості передачі інформації	53
3.6 Переваги системи <i>Massive-MIMO</i>	55
Висновки до третього розділу.....	57
ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	59

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

5G (5 generation) – 5 покоління;

MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) – багато входів багато виходів;

PE – ресурсні елементи;

LTE (*Long-term evolution*) – стандарт мобільної мережі 4G;

SIMO (*Single Input Multiple Output*) – один вхід багато виходів;

MISO (*Multiple Input Single Output*) – багато входів один вихід;

GSA (*Global mobile Suppliers Association*) – глобальна асоціація мобільних постачальників;

ICK – інформація про стан каналу;

FDD (*Frequency Division Duplex*) – дуплекс частотного поділу;

TDD (*Time Division Duplex*) – дуплекс часового поділу;

MR (*Maximum Ratio*) – максимальне співвідношення;

ZF (*Zero Forcing*) – нульове форсування;

MMSE (*Minimum mean-square error*) – мінімальна середньо-квадратична помилка;

RZF (*Regularized Zero Forcing*) – регульоване нульове форсування;

IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) – Інститут Інженерів Електротехніки та Електроніки;

АС – абонентська станція;

БС – базова станція;

QoS (*Quality of Service*) – якість обслуговування;

eMBB (*Extreme Mobile Broadband*) – надширокосмуговий мобільний зв'язок;

DL (*Down Line*) – лінія вниз;

UL (*Up Line*) – лінія вверх;

GPS (*Global Positioning System*) – система глобального позиціонування;

IoT (*Internet of Things*) – інтернет речей;

IoBNT (*Internet of BioNanoThings*) – інтернет біонаноречей;

MEC (*Mobile Edge Computing*) – мобільні обчислювальні технології;

БПЛА – безпілотний літальний апарат.

ВСТУП

Актуальність роботи. Завдяки тенденції розвитку технологій та мобільної мережі, кількість користувачів в мережі постійно збільшується, тим самим збільшуючи потреби кожного користувача. Ні для кого не є таємницею, що кожен користувач може використовувати декілька мобільних пристроїв. Кожен пристрій використовує певну кількість мережевого трафіку для передачі даних. Для забезпечення необхідної високошвидкісної передачі даних необхідні відповідні ресурси та технології. Адже саме швидкість та якість передачі даних впливають на коректну роботу, та забезпечують якісне виконання завдань за призначенням.

Актуальним рішенням для покращення передачі даних в мобільній мережі є використання 5G (або 5 покоління) мережі. Це покоління мережі, знаходиться на етапі розробки, але у декількох провідних країнах вже були перші тести цієї мережі. Результати показали, що швидкість передачі інформації збільшується у десятки разів. Технологію 5G можна реалізувати за допомогою методів множинного доступу. Існує декілька методів множинного доступу, які мають гарні перспективи та завдяки своїм перевагам знайдуть широке розповсюдження та одна з них стане основною частиною створення мережі 5 покоління.

Враховуючи вищесказане, в даній кваліфікаційній роботі запропоновано методику використання системи *Massive-MIMO* в мобільній мережі 5G.

Мета дослідження: проведення детального аналізу систем множинного доступу, виявлення та дослідження вимог до мережі 5 покоління, та її актуальність.

Об'єкт дослідження: мережі п'ятого покоління.

Предмет дослідження: методи множинного доступу в мережі 5G.

Виходячи з мети роботи, поставлено наступні **завдання:**

1. Проаналізувати системи множинного доступу в мережах 5G;

2. Дослідити вимоги до мережі 5G, та проаналізувати її актуальність;
3. Розробити методику застосування системи *Massive-MIMO* в мережі 5G.

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ МЕРЕЖІ 5G

1.1 Загальна характеристика 5G

5G – 5-те покоління мобільних мереж або 5-го покоління бездротових систем (рис. 1.1). Технологія 5G покликана вирішити одну з головних проблем попереднього покоління – високе енергоспоживання. Завдяки цьому пристрої підключені до нових мереж зможуть підтримувати функцію "завжди онлайн". Окрім того, передбачено що нове покоління мереж забезпечить таку швидкість передачі даних, яка конкуруватиме із дротовим інтернетом. Серед послуг, які пропонує 5G це реалізація надширокосмугового мобільного зв'язку (*Extreme Mobile Broadband, eMBB*) із метою передачі "тяжкого" контенту.



Рис. 1.1 Еволюція мобільних мереж

Хвилі міліметрового діапазону демонструють ряд переваг над частотами поточного покоління. Вони менш чутливі до перешкод у вигляді стін, перегородок і листя, володіють кращим коефіцієнтом відбивання, зберігаючи потужність сигналу і вимагають менших витрат на обладнання при розгортанні мережі.

У перспективі у технології є всі шанси не тільки зробити "Інтернет речей" доступним мейнстрімом, а й повністю замінити *Wi-Fi* обладнання, яке не прив'язуватиме абонента до точки доступу з обмеженим радіусом дії.

Серед основних вимог 5G:

- Пропускна здатність мережі до 20 Гбіт/с по *DL* (тобто до абонента) і до 10 Гбіт/с у зворотному напрямку по *UL*;
- Підтримка одночасного підключення до 1 мільйона пристроїв на квадратний кілометр;
- Скорочення тривалості затримки на радіоінтерфейсі до 0,5 мс (для сервісів міжмашинного зв'язку *URLLC*) і до 4 мс (для сервісів надширокопasmового мобільного зв'язку *eMBB*);
- Поліпшена ефективність використання радіочастотного спектру;
- Передача даних зі швидкістю 1 Гбіт/с водночас для багатьох користувачів на одному поверсі будівлі;
- Швидкість завантаження даних до 100 Мбіт/с та вивантаження до 50 Мбіт/с для одного абонента;
- Можливість абонентському пристрою рухатись зі швидкістю до 500 км/год між базовими станціями (наприклад, у швидкісному потязі);
- Можливість пристроям перемикатись між режимом заощадження енергії та повністю робочим за 10 мс.

Деякі інженери припускають, що малі затримки разом із високою швидкістю передачі даних дозволять передати дедалі більшу частину обробки і зберігання даних зі смартфонів на потужніші сервери в хмарах. Але навіть якщо кінцевий споживач і не помітить всіх переваг нових технологій, наявні у ній можливості можуть стати в нагоді пристроям типу «інтернет речей» та іншим вбудованим і «розумним» комп'ютерним системам.

Для того, щоб задовольнити всі зростаючі вимоги до мобільного зв'язку, для 5G були розроблені технології, об'єднані під загальною назвою «нове радіо

5G» або 5G *New Radio* (далі – *NR*). У порівнянні з радіо-інтерфейсом в мережах 4G, 5G *NR* має кілька важливих переваг.

Розробка 5G *NR* велася практично «з нуля», з урахуванням вимог до мереж 5G і з застосуванням кращих технологій, які будуть доступні до моменту повномасштабного розгортання мереж 5G. Таким чином, в 5G *NR* використовуються новітні технології модуляції, освіти форм хвиль і технологій радіодоступу які, в т.ч., забезпечуватимуть високу швидкість передачі даних і подовження терміну служби батарей призначених для користувача пристроїв 5G.

Основні відмінні риси радіо-технології 5G *NR* - такі:

Додавання нових діапазонів радіо-спектра, згідно з вимогами до швидкості передачі сигналів, числа пристроїв, зростання трафіку численних додатків 5G. Нові діапазони 5G *NR* лежать в межах від 2,5 до 40 ГГц. Ведуться обговорення про використання спектра до 100 ГГц.

Оптимізована технологія *OFDM* (*Orthogonal frequency-division multiplexing*) - мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів. Ця технологія вже була успішно застосована в 4G / *LTE-A*, а також в останніх версіях *Wi-Fi*.

Формування променів (*Beamforming*). Це технологія, яка лише в останні роки перейшла від концепції до реалізації, і яка здатна реалізувати багато переваг 5G. *Beamforming* дає можливість направляти промінь радіохвиль від базової станції на певні пристрої, як рухомі, так і нерухомі, без впливу на інші промені, спрямовані на ті ж пристрої.

Технології спільного використання спектра. Багато спектрів радіочастот, відповідним чином розподілені, часто не використовуються ефективно. Для вирішення цього завдання були розроблені технології *Spectrum sharing*.

Уніфікована міжчастотна взаємодія. Оскільки в 5G *NR* додано безліч нових частотних діапазонів, важливо забезпечити інтерфейс взаємодії при переході каналу з однієї частоти на іншу при хендовері між базовими станціями.

Маленькі стільники. Ущільнення мережевого покриття веде до того, що число базових станцій має збільшуватися. Тому було запропоновано рішення невеликих стільників – рішення недорогих, простих в установці і обслуговуванні базових станцій невеликої потужності. Їх можна розвішувати на щоглах вуличного освітлення, на стінах будинків та інших об'єктах. Мережа 5G здатна ефективно координувати їх роботу, перерозподіляючи навантаження між антенами.

При цьому можна використовувати розподілені антенні системи *DAS* (*Distributed Antenna System*) фактично «закриваючи» однією або декількома базовими станціями багатоповерхові будівлі. Невеликі антени з радіо-блоками можна розташовувати практично в кожному приміщенні, забезпечуючи найкращу якість зв'язку.

1.2 Використання безпілотників у мережі 5G

Компанії *Optus* і *Ericsson* поставили в Австралію перший 5G телекерований дрон (рис. 1.2). Він керується через живу мережу 5G. Політ був завершений в студентському містечку *Optus Macquarie Park*, де безпілотник одночасно передавав відео високої чіткості через телефон 5G за допомогою живої мережі *Optus 5G* в рамках демонстрації майбутнього використання 5G [1].

Безпілотник продемонстрував свою здатність інтелектуально ідентифікувати і відстежувати об'єкти, використовуючи процесори в хмарі, через з'єднання 5G. Це буде грати важливу роль в забезпеченні можливості безпілотних літальних апаратів виходити за межі прямої видимості.



Рис. 1.2 Телекерований дрон мережі 5G

В майбутньому, технологія 5G, може використовувати дрони для забезпечення відеоспостереження, потокової передачі в реальному часі і оперативних даних віддаленому оператору з місць, де лінія прямої видимості неможлива. Наприклад, у небезпечних, віддалених або важкодоступних місцях.

Основні переваги використання безпілотних літальних апаратів наступні:

- Подолання складного рельєфу місцевості. Дрони долають складну місцевість легко, що в свою чергу дозволяє скоротити маршрут, та доставити необхідні матеріали швидко, та без затримок.
- Незалежність від інфраструктури. Розбиті дороги, мінні поля, залізничні лінії, озера, річки і т.д. ніяк не впливають на роботу безпілота.
- Малі габарити та вертикальна посадка. Завдяки своєму не великому розміру, дрон має можливість просуватися навіть у густо засаджених лісах, а вертикальна посадка дозволяє приземлятись навіть у малих галявинах в гущі лісів.
- Економія ресурсів. Дрони можуть виконувати певні завдання у важкодоступних місцях, тому це значно зменшить витрати ресурсів для виконання того чи іншого завдання.

Також, не зважаючи на свої переваги, деякі недоліки все ж є:

- Невелика вантажопідйомність (до 5 кг). Так як дрони не великих розмірів, то вони не зможуть переносити велику вагу.
- Обмеження часу автономної роботи (до 30 хв безперервної роботи). Через малий об'єм батареї, радіус дії дрона становить до 5 км, враховуючи час повернення.

Оскільки керування дронами в мережі здійснюється через звичайний смартфон в мережі 5G, то це не буде становити важкості в управлінні ним. Для повного та ефективного керування оператору пройти декілька курсів управління.

Зараз Державний кордон західної України моніторять за допомогою безпілотних авіаційних комплексів "*Spectator-M*". Наразі повітряний моніторинг державного кордону та контрольованих прикордонних районів здійснюються зовнішніми екіпажами безпілотних авіаційних комплексів Львівського, Мукачівського, Подільського, Луцького прикордонних загонів, 10 мобільного прикордонного загону "Дозор" та Навчального центру ДПСУ.

Польоти виконуються за допомогою безпілотних авіаційних комплексів БпАК-МП-1 "*Spectator-M*", розроблений вітчизняними виробниками та вже довів свою ефективність. В майбутньому Держприкордонслужба планує лише збільшувати активність використання цих авіаційних одиниць та за рахунок цього підвищувати ефективність контролю кордону.

Переваги застосування мережі БпЛА:

- Підвищується продуктивність мережі за рахунок: використання радіоканалів між БпЛА з більшою пропускну здатністю в порівнянні з радіоканалом МБС-МБС.
- Забезпечується задана якість обслуговування абонентів (QoS) за рахунок застосування детермінованих протоколів множинного доступу.
- Забезпечується дистанційний збір розвідувальної інформації або її знімання з датчиків сенсорних мереж.

Недоліки застосування мережі БпЛА:

- Вплив ефекту Доплера на якість каналів зв'язку в само організованих мережах БПЛА.
- Діючі вузли можуть відключатися, а нові вузли – приєднуються до мережі під час виконання місії.
- Топологія мережі схильна до швидких і частих змін.

1.3 Застосування у Internet of Things

В світі вже почались розробки наступного покоління 6G зі швидкостями від 100 Гбіт/с до 1 Тбіт/с при управлінні мережі штучним інтелектом, яке планують на 2026-30 рр. В свою чергу, розширення номенклатури сервісів на базі хмарних обчислень дало значний поштовх до розвитку нових напрямків застосування Інтернету. Як наслідок, швидко впроваджуються різноманітні концепції на основі Інтернету речей (Internet of Things, IoT). Як відомо, такий підхід надає можливість підключення до Інтернету будь-якого об'єкту, оснащеного датчиками або сенсорами, що можуть отримувати, передавати та обробляти інформацію, і виконувати певні дії в залежності від отриманої інформації (рис. 1.3). В якості прикладів можна вказати «розумний будинок», «розумне місто», та ін. Реалізація зв'язку між об'єктами можлива через Інтернет з використанням технологій Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee та ін.

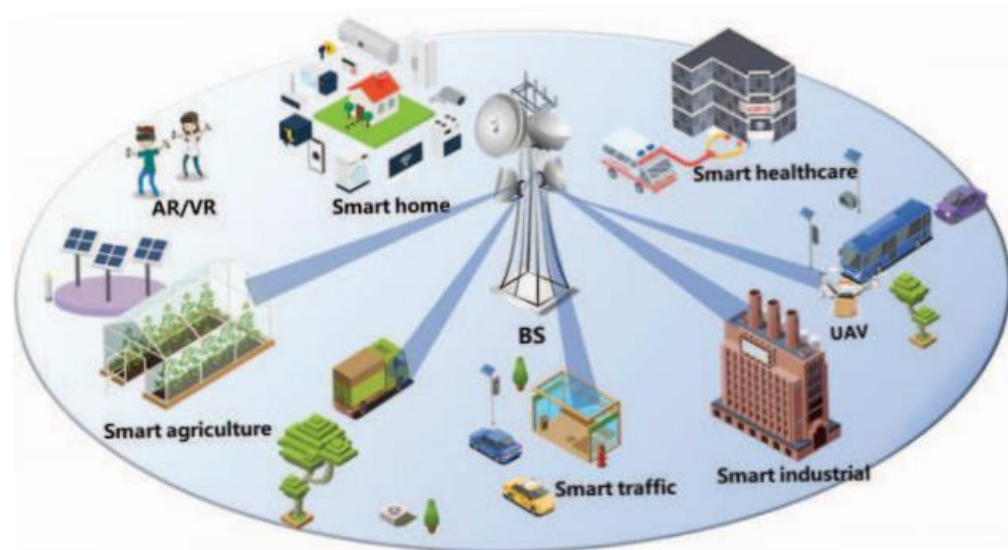


Рис. 1.3 Стільниковий IoT, заснований на бездротових мережах 5G

Ще одним, досить новим напрямком є концепція Інтернету біонаноречей (Internet of BioNanoThings, IoBNT). Як відомо, жива клітина – вже є своєрідною наномашиною яка керується генетичною програмою. Процесором і пам'яттю виступає ядро клітини, мітохондрії служать батареєю а білки-рецептори на поверхні цієї клітини – це сенсори, які можуть сприймати сигнали, а їх щільні контакти з іншими клітинами, можуть відправляти сигнали. Залишається лише перепрограмувати їх для свої потреб. При цьому, потрібно ще організувати зв'язок не тільки між самими клітинами, але і з мережею Інтернет. Клітина може передавати побітову інформацію в залежності від стану, але з дуже низькою швидкістю. Одним з варіантів реалізації комунікацій може стати MIMO.[2]

1.4 Перспективи та актуальність мережі шостого покоління (6G)

6G (шосте покоління бездротових мереж) є спадкоємцем стільникової технології 5G - мережі 6G зможуть використовувати більш високі частоти, ніж мережі 5G, забезпечуючи значно більшу пропускну здатність і значно меншу затримку. Однією з цілей Інтернету 6G буде підтримка однієї мікросекунди затримки зв'язку, що представляє в 1000 разів швидшу - або 1/1000 затримки - пропускну здатність в одну мілісекунду.

Очікується, що ринок технологій 6G сприятиме значним вдосконаленням у сферах візуалізації, технології присутності та інформування про місцезнаходження. Працюючи спільно зі штучним інтелектом, обчислювальна інфраструктура 6G зможе автономно визначити найкраще місце для обчислень; це включає рішення щодо зберігання, обробки та обміну даними.

Очікується, що 6G підтримує швидкість передачі даних 1 терабайт в секунду (Тбіт/с). Цей рівень ємності та затримки буде безпрецедентним і розширить продуктивність додатків 5G, а також розширить сферу можливостей для підтримки все нових та інноваційних програм у сферах бездротового зв'язку, пізнання, зондування та обробки зображень. Більш високі частоти 6G дозволять значно вищі частоти дискретизації, крім того, забезпечать значно кращу пропускну здатність і вищі швидкості передачі даних. Очікується, що поєднання хвилі до мм (наприклад, довжини хвиль менше одного міліметра) та використання частотної вибіркової для визначення відносних швидкостей електромагнітного поглинання призведе до потенційно значного прогресу в технології бездротового зондування.

Крім того, хоча додавання мобільних обчислювальних технологій (MEC) є предметом розгляду як доповнення до мереж 5G, MEC буде вбудований у всі мережі 6G. До моменту розгортання мереж 6G крайові та основні обчислення стануть набагато більш плавно інтегрованими як частина комбінованої інфраструктури комунікацій / обчислень. Це забезпечить багато потенційних переваг, оскільки технологія 6G почне працювати, включаючи покращений доступ до можливостей штучного інтелекту.

Очікується, що 6G буде комерційно запущений в 2030 році. 6G розробляється у відповідь на все більш розподілену мережу радіодоступу (RAN) та бажання скористатися терагерцовим (ТГц) спектром для збільшення пропускну здатності, зниження затримки та підвищення ефективності спільного використання спектру. Хоча кілька ранніх дискусій відбулися з метою визначення 6G, науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи

розпочнуться серйозно в 2020 році. Багато проблем, пов'язаних із розгортанням радіосигналу міліметрової хвилі для нового радіостанції 5G, як очікується, будуть вирішені вчасно для мережових дизайнерів для вирішення проблем 6G.

Більше ніж коли-небудь раніше, шосте покоління стільникових мереж інтегруватиме набір раніше неоднакових технологій, включаючи глибоке навчання та аналіз великих даних. Впровадження 5G відкриває шлях для більшої частини цієї конвергенції.

Потреба в розгортанні крайових обчислень для забезпечення загальної пропускної здатності та низької затримки для наднадійних комунікаційних рішень з низькою затримкою є важливим фактором 6G, як і необхідність підтримувати взаємодію між машинами в Інтернеті речей (IoT). Крім того, було виявлено міцну взаємозв'язок між майбутніми рішеннями 6G та високопродуктивними обчисленнями (HPC). Хоча частина даних IoT та мобільних пристроїв буде оброблятися за допомогою крайніх обчислювальних ресурсів, більша частина з них потребуватиме обробки більш централізованими ресурсами HPC.[3]

Висновки до першого розділу

Отже, в даному розділі було проаналізовано актуальність використання мобільної мережі 5G.

Вказана можливість використання дронів. Зазначено тісний зв'язок між 5G та технологією Internet of Things. Проаналізовано перспективи та актуальність мережі шостого покоління.

Очевидно, що якість мереж 5G напряду залежить від методу доступу до цієї мережі. Існує декілька методів множинного доступу, які можуть бути використані для побудови мереж п'ятого покоління.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ 5G МЕРЕЖ

2.1 Множинний доступ в мережах п'ятого покоління

Множинний доступ, також відомий як масове підключення або множинний зв'язок машинного типу, є одним з основних випадків використання бездротових мереж п'ятого покоління (5G) і поза 5G. Типовим застосуванням масового доступу є стільниковий Інтернет речей (IoT) (рис. 2.1). На відміну від звичайного спілкування людського типу, множинний доступ має на меті реалізацію ефективних та надійних комунікацій для величезної кількості пристроїв IoT. Отже, основними характеристиками масового доступу є низька потужність, масивне підключення та широке охоплення, що вимагає нових концепцій, теорій та парадигм для проектування стільникових мереж наступного покоління.



Рис. 2.1 Схема приєднання пристроїв до стільникового Інтернету речей

Методи доступу організовують обмін даними між активними пристроями та базовими станціями (далі БС). У попередніх поколіннях стільникових мереж були прийняті методи ОМА, такі як TDMA, FDMA та OFDMA. Методи ОМА виділяють кожен блок частотно-часових ресурсів на унікальний пристрій, що веде до простої структури приймача. Однак через обмежений радіочастотний спектр, доступний для стільникового зв'язку, важко підтримувати множинний доступ за допомогою звичайних методів ОМА. Для вирішення цієї проблеми існує два можливі напрямки масового доступу до бездротових мереж 5G. З одного боку, нові бездротові ресурси, наприклад, новий спектр, можуть бути використані для прийому більшої кількості пристроїв. З іншого боку, ефективність використання ресурсів може бути додатково покращена для підтримки масового доступу. Далі описано дві різні масивні методики доступу, які йдуть за вищезгаданими напрямками.

2.2. Massive Orthogonal Access

Звичайні методи ОМА з обмеженим радіочастотним спектром не можуть задовольнити жорсткі вимоги QoS щодо масового доступу, а отже, бездротові мережі 5G повинні застосовувати нові масивні ортогональні методи доступу, використовуючи додаткові ступені свободи. Через суворі обмеження затримки ресурси тимчасових доменів обмежені і не можуть використовуватися для масового доступу. Натомість використання додаткових просторових та частотних ресурсів є більш привабливим.

Massive MIMO

У мережах довгострокової еволюції 4G (LTE) були застосовані багатоантенні методи для збільшення швидкості передачі та підвищення надійності каналів, використовуючи додаткові просторові ступені свободи. Однак БС 4G LTE можуть бути обладнані лише до восьми антен. Таким чином, просторові ступені свободи, пропоновані багатоступеневими БС з LTE, обмежені і далеко не достатні для полегшення масового доступу. Щоб значно

збільшити доступні просторові ступені свободи, БС бездротових мереж 5G повинні розгорнути широкомасштабну антенну решітку з 64 або більше антенами, реалізуючи Massive MIMO (рис. 2.2). Тому велика кількість пристроїв може одночасно отримати доступ до мережі, а БС може розділити їх у просторовій області, наприклад множинний доступ з просторовим поділом (SDMA).

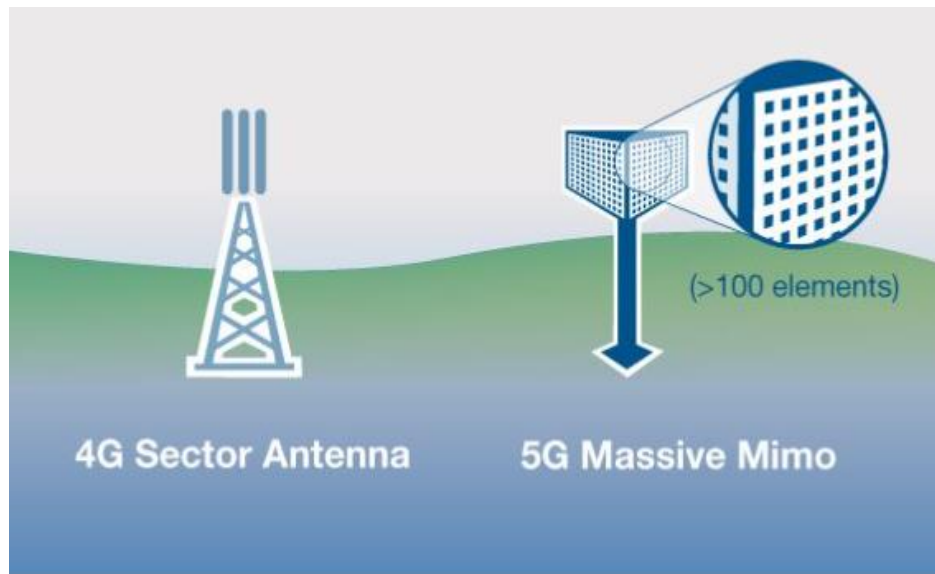


Рис. 2.2 Порівняння антени 4G(LTE) з антеною 5G Massive MIMO

Новітні дослідження Massive MIMO показують, що перешкоди спільного каналу зникають асимптотично навіть за допомогою простих лінійних попередніх кодерів та комбінаторів, оскільки кількість антен БС має тенденцію до нескінченності через зміцнення каналів. Більше того, було показано, що як спектральну, так і енергетичну ефективність можна значно покращити за допомогою Massive MIMO. У випадку масового доступу Massive MIMO не тільки підвищує точність виявлення активного пристрою, але й покращує продуктивність передачі. Однак є два найважливіші питання для впровадження масового доступу до систем Massive MIMO. Перше питання стосується отримання інформації про стан каналу (ІСК) у БС. Точність ІСК на БС визначає продуктивність масового доступу на основі Massive MIMO. Оскільки БС знаходиться на стороні передавача для низхідної лінії зв'язку, неможливо

отримати ІСК безпосередньо. У традиційних системах з кількома антенами існує два методи збору ІСК. У системах дуплексного поділу частот (FDD) пристрої спочатку отримують ІСК шляхом оцінки каналу, а потім передають квантований ІСК в БС. Для множинного доступу, заснованого на Massive MIMO, необхідна кількість бітів зворотного зв'язку на кожному пристрої велика через високий розмірний вектору каналу. Таким чином, загальна кількість відгуків, необхідних для великої кількості пристроїв, може бути надмірною. Іншими словами, звичайні методи квантованого зворотного зв'язку не застосовуються для масового доступу на основі Massive MIMO. Однак, якщо канал розріджений, кілька ефективних методів можуть зменшити обсяг зворотного зв'язку. Фахівцями було проведено дослідження, уякому отриманий пілот-сигнал кожного пристрою передавався в БС, а розріджений ІСК всіх пристроїв спільно відновлювався за допомогою методу CS на основі l_1 -регуляризації. Більше того, в іншому досліді було використано глибоке навчання для стиснення розрідженого ІСК, завдяки чому обсяг зворотного зв'язку став доступним. Вимога розрідженого ІСК обмежує придатність вищезазначених методів до систем FDD. Отже, Massive MIMO зазвичай передбачається для роботи в режимі дуплексного поділу часу (TDD). У системах TDD пристрої відправляють пілотні послідовності до БС у висхідній лінії зв'язку, а БС отримує ІСК низхідної лінії зв'язку, оцінюючи канали висхідної лінії зв'язку, використовуючи взаємність каналу. Перешкодою для реалізації придбання ІСК в системах TDD є так звана проблема забруднення пілотних сигналів. Зокрема, через обмежену довжину піотної послідовності, доступну для обслуговування величезної кількості пристроїв, однакові пілотні послідовності доводиться використовувати повторно в різних пристроях. Отже, точність оцінки ІСК знижується через перешкоди спільного каналу. Оскільки пілотні послідовності в масивному доступі не можуть бути повністю ортогональними, необхідно підвищити точність ІСК. З цією метою була запропонована схема управління потужністю передачі пілот-сигналу, щоб поліпшити загальну продуктивність. Оскільки точність ІСК залежить від енергії

передачі пілотного сигналу, для даної потужності передачі довжина послідовності пілотного сигналу повинна бути оптимізована.

Друге питання стосується споживання енергії та пов'язаних із цим витрат. Використання Massive MIMO для масового доступу вимагає великої кількості ланцюгів радіочастот (РЧ) та відповідних модулів аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Якщо кожна антена обладнана виділеним радіочастотним ланцюгом, кількість радіочастотних ланцюгів може бути дуже великою, що призводить до великого споживання енергії. Щоб зменшити кількість радіочастотних ланцюгів, але зберегти переваги Massive MIMO, потрібні гібридні методи попереднього кодування, що дозволяють декільком антенам спільно використовувати однакові радіочастотні ланцюги. У порівнянні зі звичайними схемами цифрового попереднього кодування, гібридне попереднє кодування спричиняє високу складність проектування, але низьку вартість впровадження. Був запропонований метод розроблення подвійного розкладання на основі розкладання гібридного попереднього кодування, який гарантується зближенням до рішення Каруша-Кун-Таккера (ККТ) проблеми гібридного попереднього кодування за деяких м'яких припущень. Для зменшення складності проектування був представлений двократний гібридний метод попереднього кодування, який побудував аналогове формування променя на основі повільно мінливих у часі статистичних ІСК. Більше того, висока вартість АЦП є життєво важливим питанням для масового MIMO. Оскільки вартість АЦП головним чином визначається роздільною здатністю квантування, АЦП з низькою роздільною здатністю є кращою для масового доступу на основі Massive MIMO ціною втрати продуктивності. Було запропоновано схему розподілу часу для оцінки каналів та передачі даних для полегшення впливу АЦП з низькою роздільною здатністю.

Міліметрові хвилі/терагерци

Відповідно до теореми про потужність Шеннона, збільшення пропускної здатності є простим, але ефективним способом покращення ємності бездротового зв'язку. Поточні стільникові мережі працюють в смугах частот 12 ГГц, що забезпечують обмежену пропускну здатність, і вони переповнені. Високочастотні смуги ж навпаки мають великі вакантні спектри. Отже, для бездротових мереж 5G використання міліметрового діапазону і навіть ТГц є привабливим для реалізації масового доступу в частотній області. Критичною проблемою для комунікацій мм/ТГц є серйозні втрати на поширення, що призводять до короткої відстані передачі. Для вирішення цієї проблеми мм/ТГц зазвичай поєднують з Massive MIMO або навіть надмасивним MIMO, що використовує більше тисячі антен. Таким чином, отримання та попереднє кодування ІСК ускладнюються для зв'язку мм/ТГц. На щастя, канали мм/ТГц мають дві важливі характеристики. По-перше, канал мм/ТГц є дуже розрідженим, так що CS та Байєсівські методи можуть бути використані для отримання ІСК, необхідного для проектування матриці попереднього кодування.

2.3 Massive Non-orthogonal Access

Перспективним підходом для збільшення кількості підтримуваних пристроїв доступу за обмеженим радіочастотним спектром є використання неортогональних методів багаторазового доступу (NOMA), що дозволяють декільком пристроям спільно використовувати один і той же частотно-часовий ресурсний блок. Отже, NOMA є кандидатом для бездротових мереж 5G. Порівняно з методами ОМА, методи NOMA можуть покращити спектральну ефективність. Іншими словами, для заданої необхідної спектральної ефективності на пристрій та заданої смуги пропускання NOMA може приймати значно більше пристроїв, ніж ОМА. Таким чином, NOMA здатна підтримувати множинний доступ в обмеженому радіочастотному спектрі. Однак методи

NOMA призводять до серйозних перешкод спільного каналу, особливо в сценарії масового доступу. Ключем до реалізації масивної NOMA є управління перешкодами. Наразі наукові кола та промисловість запропонували кілька схем NOMA, які можна класифікувати на дві категорії, а саме non-NOMA домену потужності (PD-NOMA) та NOMA кодового домену (CD-NOMA).

Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access

PD-NOMA передає радіочастотний спектр за допомогою кодування суперпозиції з потужностями передачі як ваговими факторами. У цьому випадку пристрої доступу можуть бути розділені в домені живлення. Для того, щоб зменшити перешкоди спільного каналу, спричинені неортогональною передачею, послідовне припинення перешкод (SIC) зазвичай виконується на приймачі. Зокрема, приймач спочатку декодує заважаючий сигнал з найбільшою потужністю передачі і видаляє його з прийнятого сигналу. Потім він декодує перешкодний сигнал із наступною найбільшою потужністю передачі, поки бажаний сигнал не відновиться. Отже, розподіл потужності має великий вплив на продуктивність PDNOMA. Інтуїтивно зрозуміло, що пристрою з невеликим коефіцієнтом посилення каналу призначається висока потужність передачі, щоб гарантувати точність. Проте виконати оптимальний розподіл потужності в PD-NOMA не є тривіальним завданням, оскільки існують залишкові інтерференційні перешкоди від пристроїв з меншими потужностями передачі. Було запропоновано схема розподілу когнітивної потужності для PD-NOMA для двох користувачів. Оскільки SIC скасовує лише часткові перешкоди спільного каналу, спричинені пристроями з більшими потужностями передачі, пристрої з невеликим коефіцієнтом посилення каналу все ще можуть страждати від сильних перешкод спільного каналу після SIC, що призводить до низької продуктивності. Щоб гарантувати точність, спеціалістами було запропоновано схему розподілу потужності, яка максимізує швидкість пристрою з найменшим коефіцієнтом посилення каналу.

PD-NOMA покращує спектральну ефективність за рахунок високої обчислювальної складності завдяки використанню приймача SIC для

пом'якшення перешкод. Складність обчислень зростає із збільшенням кількості пристроїв. У сценарії масового доступу обчислювальна складність та затримка обробки сигналу можуть бути надмірними, якщо SIC виконується для всіх пристроїв. Можливим рішенням для подолання цих проблем є проведення кластеризації пристроїв. Таким чином, пристрої групуються в кілька кластерів, де кожен кластер містить невелику кількість пристроїв. SIC виконується в кожному кластері, що ефективно знижує обчислювальну складність. Було запропонована схема кластеризації в частотній області, де два пристрої, призначені одній і тій же піднесучій системі OFDMA, утворюють кластер. Кластеризація частотних доменів гарантує ортогональність між кластерами, але зменшує спектральну ефективність. Враховуючи, що БС бездротових мереж 5G будуть оснащені широкомасштабною антенною решіткою, може бути кращим виконувати кластеризацію пристроїв у просторовій області, де кожен кластер може займати весь спектр. Оскільки кластеризація просторових пристроїв спричиняє додаткові перешкоди між кластерами, для боротьби з перешкодами необхідно застосовувати просторове формування променя у поєднанні з розподілом потужності. Для подальшого розкриття потенціалу неортогональної сигналізації існує повністю неортогональна схема для масового доступу, де для оцінки ІСК з невеликими накладними витратами використовувались неортогональні пілотні послідовності для дизайну просторового формування променя для припинення перешкод. Насправді, проектування великої кількості просторових променів, що скасовують міжкластерні перешкоди, також тягне за собою велику складність у сценарії масового доступу. З метою зменшення обчислювальної складності проектування променя в [4] була запропонована неортогональна схема багатопрофільного доступу, яка побудувала передавальні промені на основі статистичного ІСК. У порівнянні зі схемами формування променя, що базуються на миттєвій ІСК, схема, що базується на статистичній ІСК, призводить до зменшення складності ціною втрати продуктивності.

Code-Domain Non-Orthogonal Multiple Access

CD-NOMA призначає різні коди пристроям для мультиплексування. На відміну від звичайного CDMA, призначені коди розріджені. Однак розріджені коди все ще можуть запропонувати посилення для зменшення небажаних перешкод спільного каналу. Отже, для виявлення розріджених послідовностей CD-NOMA необхідний лише простий алгоритм передачі повідомлень (MPA) на приймачах. Підпис CDMA з низькою щільністю (LDS-CDMA) та поширення OFDM з низькою щільністю (LDS-OFDM) є двома прямими продовженнями CD-NOMA. Зокрема, в LDS-CDMA символ, що підлягає передачі, поширюється у часовій області, тоді як у LDS-OFDM мікросхеми передаються в частотній області. LDS-CDMA та LDS-OFDM можна вибрати на основі вимог до масивної системи доступу.

На практиці LDS-CDMA та LDS-OFDM поширюють сигнал, використовуючи заздалегідь визначений розріджений код для кожного пристрою. Насправді, якщо пристрій має кілька кодів розповсюдження, можна додатково покращити продуктивність масового доступу. Натхненню цією ідеєю, було запропоновано спільний доступ для кількох користувачів (MUSA). Для MUSA існує набір розширювальних кодів. Кожен пристрій довільно вибирає код розширення для кожного символу, і, отже, в каналах затухання середні перешкоди придушуються завдяки використанню різних кодів розширення за рахунок приймача високої складності.

На відміну від вищезазначених схем CD-NOMA, розріджений код із множинним доступом (SCMA) відображає символ у розріджений код. Кожен пристрій має заздалегідь визначену кодову книгу, що містить кілька розріджених кодів, де ненульові елементи знаходяться в однакових положеннях. Символ, що передається, відображається на індекс, і відповідний розріджений код у кодовій книзі вибирається для передачі. Враховуючи вимоги масового доступу, було запропонована схема SCMA із спільною оцінкою каналу та декодуванням даних.

2.4 Порівняння методів множинного доступу.

Проаналізувавши методи множинного доступу в мережі п'ятого покоління ми можемо дійти висновку, що найбільш актуальним та зручним на даний момент часу є Massive MIMO. Він має великий потенціал та незначні недоліки, з якими можна працювати з існуючими технологіями.

Для методу міліметрових хвиль критичною проблемою для комунікацій є значущі втрати на поширення, що призводять до короткої відстані передачі.

Порівняння різних масивних неортогональних схем доступу наведено в таблиці 1.1. Таким чином, як PD-NOMA, так і CD-NOMA використовують нові рівні свободи для спільного використання каналів, щоб підтримувати масовий доступ через обмежені бездротові ресурси. Однак обидва масивні методи доступу вимагають складних приймачів-передавачів для боротьби з перешкодами спільного каналу. Враховуючи, що матриці каналів у масивному доступі мають великі розміри через розгортання великомасштабних антенних решіток на БС, обчислювальна складність на трансиверах може бути непосильною. Тому проектування простих, але ефективних трансиверів є важливою темою для майбутніх досліджень.

Табл. 1.1

Масивні не ортогональні схеми доступу

Тип	Характеристика
PD-NOMA	Кодування суперпозиції на передавачі та SIC на приймачі
LDS-CDMA	Поширення переданих символів у часовій області за допомогою коду низької щільності та MAP на приймачі
LDS-OFDM	Поширення переданих символів у частотній області за допомогою коду низької щільності та MAP на приймачі
MUSA	Розподіл переданих символів за кодом, вибраним з безлічі розріджених кодів та MAP на приймачі
SCMA	Зіставлення переданих символів у кодове слово кодової книги, що складається з декількох розріджених кодів та AMP на приймачі

А отже, розглянемо більш детально що собою представляє існуюча система MIMO.

2.5 Аналіз існуючої системи MIMO

Multiple Input Multiple Output (далі – *MIMO*) — системи зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами (рис. 2.3). Їх використання дозволяє проводити просторову і часову обробку сигналів, ефективніше використовувати випромінювану передавачем потужність і знижувати негативний вплив завад. Внаслідок цього пропускна спроможність *MIMO* теоретично може бути збільшена пропорційно числу антенних елементів у порівнянні зі звичайними системами зв'язку, що використовують одноелементні антени (без збільшення повної випромінюваної потужності і смуги частот).[5]

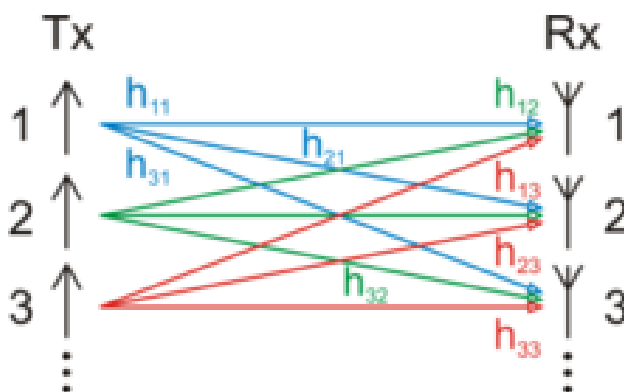


Рис. 2.3 Модель каналу MIMO

Високошвидкісний потік даних розбивається на M незалежних послідовностей з $1/M$ швидкості, які потім передаються одночасно з декількох антен, відповідно використовуючи тільки $1/M$ їх первинної смуги частот.

Перетворювач потоку даних на передавальному кінці лінії зв'язку перетворює послідовний потік у паралельний, а на приймальному — виконує зворотне перетворення.

До основних функцій *MIMO* можна віднести наступні:

1. збільшення якості зв'язку за рахунок просторового тимчасового / частотного кодування і формування променів
2. підвищення швидкості передачі при застосуванні просторового мультиплексування.

Особливості побудови та використання технології *MIMO*

MIMO використовує переваги багатоканальності (коли різні сигнали приходять в приймач в різний час). Для організації технології *MIMO* необхідна установка декількох антен на передавальній і на приймальній стороні (рис. 2.4).

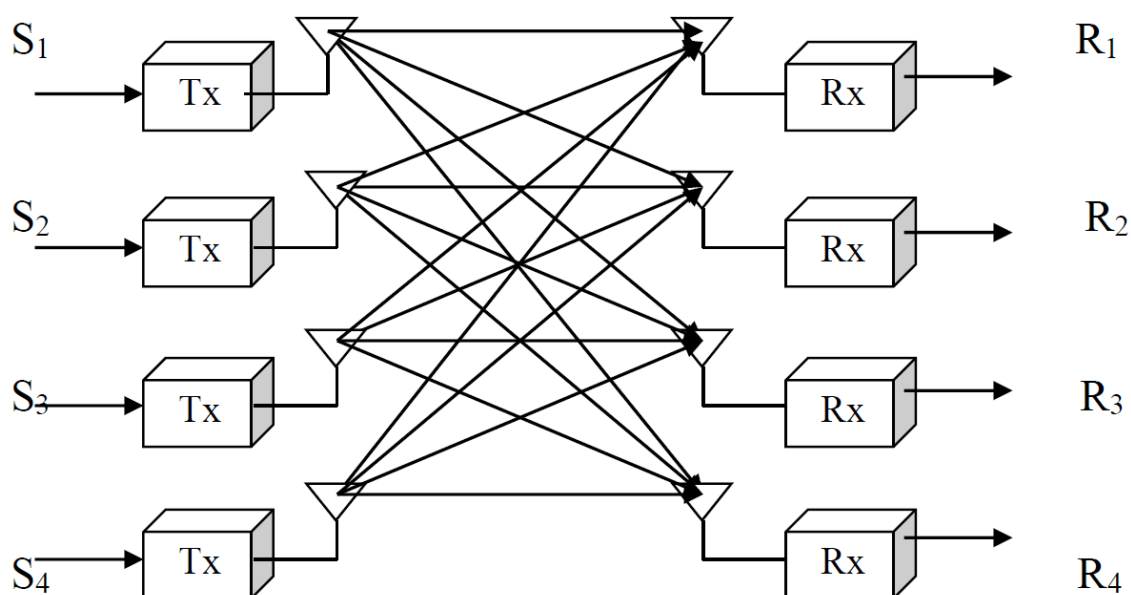


Рис. 2.4 Організація технології *MIMO*

Для роботи потрібні зміни в структурі передавача. Розглянемо один із способів організації технології *MIMO*. На передавальній стороні необхідний дільник потоків, який буде розділяти дані, призначені для передачі на кілька низько-швидкісних субпотоків, число яких залежить від числа антен. Надалі кожен їх даних потоків повинен бути переданий через свою антену.

Анени на передачі встановлюються з просторовим рознесенням, щоб забезпечити більше число побічних сигналів, які виникають в результаті перевіддзеркалень.

Один із способів організації технології *MIMO* сигнал передається від кожної антени з різною поляризацією, що дозволяє при прийомі його ідентифікувати (рис. 2.5).

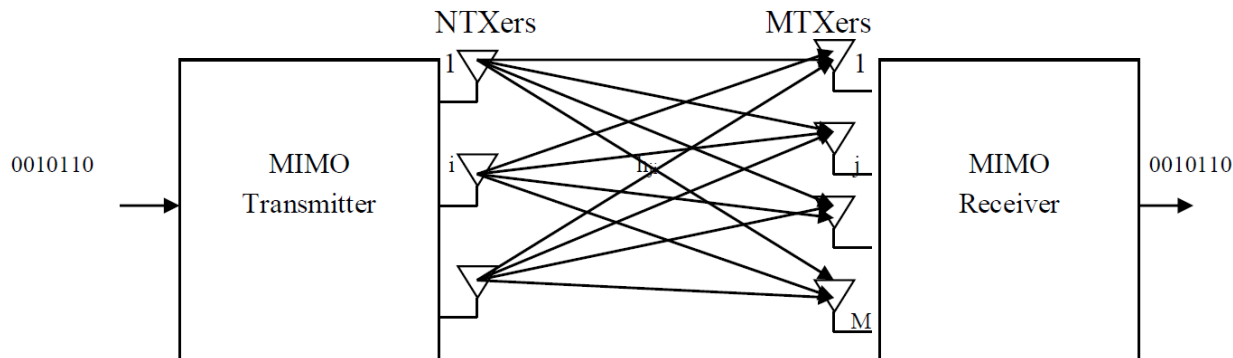


Рис. 2.5 Принцип передачі сигналу

Приклад системи: Кількість просторових потоків (H) $< \min(M, N)$.

N – кількість антен на передавальній стороні, M – кількість антен на приймальній стороні.

Матриця комплексних чисел:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} \end{bmatrix} \quad (1)$$

У матриці H кожен h_{ij} є комплексним числом: $a + jb$ (амплітуди і фази) .

Але в простому випадку кожен з переданих сигналів виявляється зміненим самим середовищем передачі (затримкою в часі, загасанням і іншими спотвореннями). У міському середовищі сигнали будуть відбиватися від дерев, будівель тощо. Об'єктів і продовжувати свої шляхи не тільки до точки прийому, але і в інших напрямках. На приймальній стороні антени приймають сигнал з радіоефіру з шумами.

Приклад для системи 3×3 :

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} + \text{Шум.}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{b}_1 \\ \hat{b}_2 \\ \hat{b}_3 \end{bmatrix} = H^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}.$$

(2)

Також антени встановлюються з просторовим рознесенням, за рахунок чого забезпечується рознесений прийом. На кожен з приймачів сигнали надходять від усіх антен системи. Кожен суматор бере із загального потоку енергію сигналу тільки того тракту, за який він відповідає. Він виділяє або за передбаченою ознакою, яким був забезпечений кожен з сигналів, або за допомогою аналізу затримки, загасання, зсуву фази, тобто набору спотворень або середовища поширення. Залежно від принципу роботи системи переданий сигнал може повторюватися через певний час, або передаватися з невеликою затримкою через інші антени.

MIMO включає в себе просторове тимчасове рознесення передачі, просторове мультиплексування, поєднання ліній *MIMO*.

- Просторове тимчасове рознесення передачі (*STTD*) - одні й ті ж дані закодовані передані різними антенами які подвоюють енергію в каналі. Це покращує стабільність сигналу.

- Просторове мультиплексування (*Spatial Multiplexing*) - паралельні потоки даних за допомогою використання багатоканальні. Дозволить збільшити швидкість в 2 рази (*2x2 MIMO*) і до 4 разів (*4x4 MIMO*) і т.д.

MIMO збільшує пропускну здатність за допомогою просторового мультиплексування - кілька передач в одному каналі (рис. 2.6)

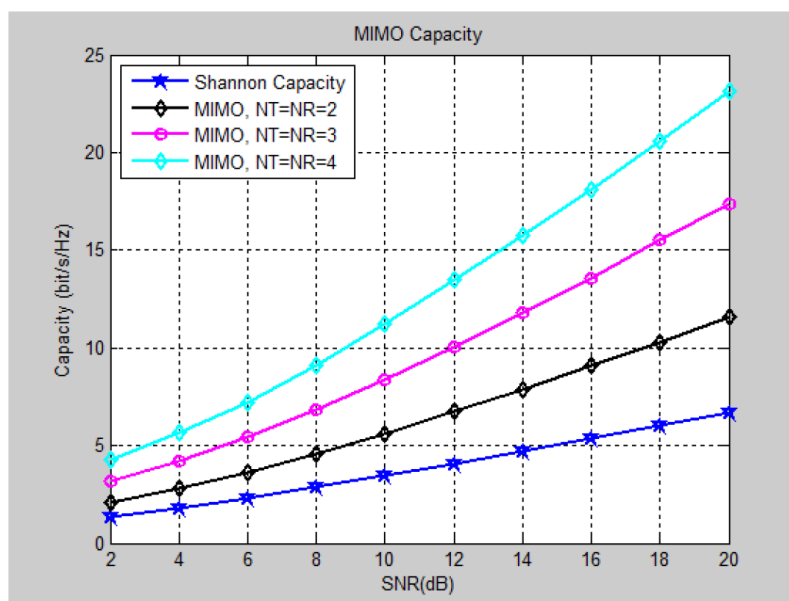


Рис. 2.6 Переваги просторового мультиплексування

– Поєднання ліній - підсилює сигнали в пристрої. Два пристрої можуть спільно передавати на одному суб-каналі, в якому подвоюється швидкість передачі даних.

Різновиди реалізації технології *MIMO*

На наведи нижче малюнках представлені варіанти реалізації різних варіантів технології *MIMO*. Залежно від кількості передавачів і приймачів з протилежних сторін каналу зв'язку розрізняють режим кілька передавачів - кілька приймачів (рис. 2.7) (це власне *MIMO*), кілька передавачів - один приймач (рис. 2.8) (*MISO*), один передавач - кілька приймачів (рис. 2.9) (*SIMO*). Можливі варіанти *MIMO* 2x2, 2x3, 4x4, *MISO* 2x1, *SIMO* 1x2, 1x3.

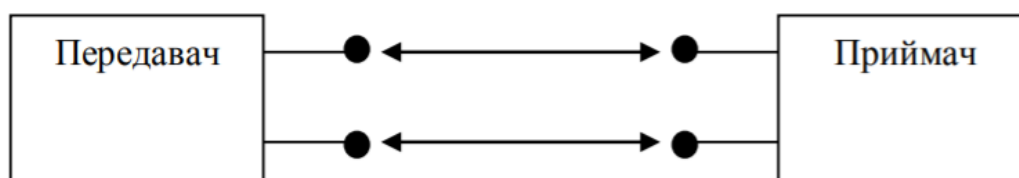
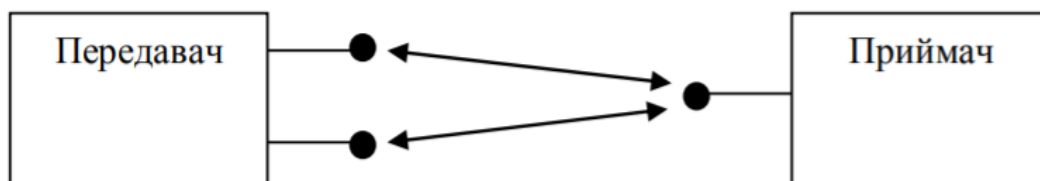
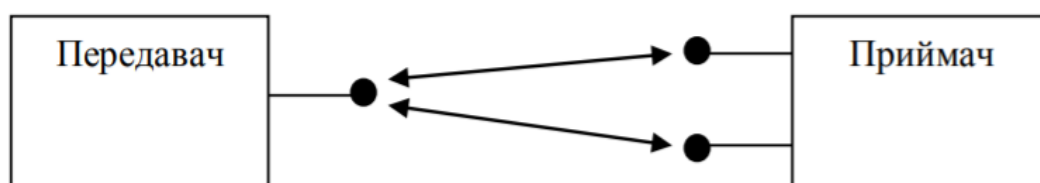


Рис. 2.7 Реалізація *MIMO* 2*2

Рис. 2.8 Реалізація *MISO* 2*1Рис. 2.9 Реалізація *SIMO* 1*2

Версія *MIMO* з декількома вихідними сигналами *SIMO* або одиночного входу відбувається, коли передавач має одну антену, а у приймача - кілька антен. Це також відомо як отримання різноманітності. Його часто використовують для включення приймальної системи, яка приймає сигнали з ряду незалежних джерел для боротьби з наслідками згасання. Він використовується протягом багатьох років на короткохвильових станціях прослуховування / прийому для боротьби з впливом іоносферного згасання та перешкод. Перевага *SIMO* в тому, що його досить легко здійснити, хоча він має деякі недоліки в тому, що обробка потрібна в приймачі. Використання *SIMO* може бути цілком прийнятним у багатьох програмах, але там, де приймач розташований у мобільному пристрої, такому як слухавка мобільного телефону, рівні обробки можуть бути обмежені розміром, вартістю та витратою акумулятора.

MISO також називається різноманітністю передачі. У цьому випадку одні й ті ж дані передаються надмірно з двох передавальних антен. Тоді одержувач може приймати оптимальний сигнал, який потім може використовувати для отримання необхідних даних. Перевагою використання *MISO* є те, що множина антен і надмірність кодування / обробки переміщуються від приймача до передавача. У таких випадках, як стільниковий

телефон, це може бути суттєвою перевагою з точки зору простору для антен та зниження рівня обробки, необхідного в приймачі для кодування надмірності. Це позитивно позначається на розмірі, вартості та ресурсі акумулятора, оскільки нижчий рівень обробки вимагає меншої витрати акумулятора.

Варіанти реалізації *MISO* і *SIMO* самі по собі не збільшують пропускну здатність радіоканалу, але істотно підвищують стійкість і протистояння багатопроменевої інтерференції. Це в кінцевому рахунку також може підвищити пропускну здатність радіоканалу за рахунок кращого рівня сигналу, меншого рівня помилок і, як наслідок, використання *OFDM* модуляції більш високого рівня.

На даний момент відомо два варіанти реалізації *MU-MIMO* в 802.11ac [6]:

1. *SDMA (Space Division Multiple Access)* дозволяє передавати дані різним клієнтам з різних просторовим потокам (для цього потрібен *Beamforming*);

2. *Downlink MIMO* дозволяє розбити підносійні *OFDM* на групи, і динамічно виділяти кожного клієнта потрібне число тих, що піднесуть. Таким чином, навіть якщо на точці доступу будуть клієнти 2x2: 2 *MIMO* - все одно можна буде використовувати весь потенціал каналу. Навіть якщо обмежити максимальну швидкість мережі одним Гбайт, стандарт 802.11ac дає істотні вигоди як для домашніх (високі швидкості), так і для корпоративних мереж (ефективна утилізація цих найвищих швидкостей в мережах з великим числом клієнтів) [6].

Розробляючи стандарт 802.11ac, група *TGac* побудувала на можливості формування променю зі стандарту 802.11n новий механізм, який дозволяє точці доступу спілкуватися з декількома клієнтськими пристроями в різних

Передавач Приймач Передавач Приймач Передавач Приймач 38 напрямках одночасно, використовуючи один і той же канал, кілька антен і просторове мультиплексування. Ця технологія була названа *MU-MIMO* (розрахована на багато користувачів *MIMO*). Вона додана в 802.11ac для того, щоб забезпечити

вимогу сумарної пропускної здатності 1 Гбіт / с при роботі з декількома пристроями.

У стандарті 802.11n, точка доступу повинна використовувати тимчасовий поділ для мультиплексування декількох станцій і обслуговувати їх по черзі один за одним, таким чином, скорочуючи їх ефективну пропускну здатність. Стандарт 802.11n допускав використання максимально чотирьох просторових потоків, призначених одному пристрою в один момент часу (режим *SU-MIMO*). У стандарті 802.11ac в режимі *MU-MIMO* точка доступу (або інша станція) передає незалежні потоки даних декільком станціям в один і той же час в одному і тому ж частотному діапазоні (рис. 2.10).

Передбачається використання до восьми просторових потоків, які можуть бути розділені максимально між чотирма станціями, кожна з цих станцій може виділяти різну кількість просторових потоків (але не більше чотирьох на один пристрій). При цьому підтримка більше одного просторового потоку клієнтською станцією за стандартом не обов'язкова. Збільшення кількості просторових потоків дозволило подвоїти максимальну теоретичну пропускну здатність всієї мережі 802.11ac в порівнянні з 802.11n [7].

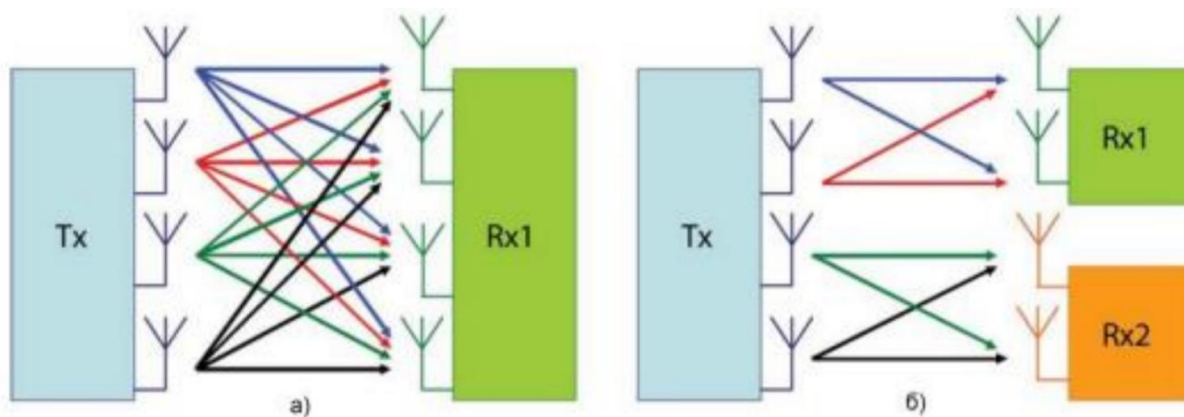


Рис. 2.10 Режими *SU-* і *MU-MIMO*

а) Режим *SU-MIMO*, один користувач, 4 просторових потоки;

б) Режим *MU-MIMO*, два користувача, два просторових потоки до кожного.

Якщо точку доступу 802.11n можна розглядати як аналог концентратора *Ethernet (hub)*, то точку доступу 802.11ac можна розглядати в якості бездротового комутатора (на низхідному каналі). При проходженні через бездротовий канал, потоки об'єднуються, і задача приймача розділити їх і розшифрувати. Шляхом попередньої обробки потоків даних в передавачі (аналогічно, як і при формуванні променя), перешкоди від накладення різних потоків, призначених для різних станцій, усуваються в приймачі кожної станції. Таким чином, кожна станція отримує свої необхідні дані, вільні від перешкод паралельних передач. Однак використання модуляцій високого порядку, наприклад 256 QAM, небажане, так як вони більш чутливі до спотворень.

На рисунку 2.11 показаний приклад роботи з трьома станціями в режимі формування променя. Для передачі даних користувачеві 1, точка доступу формує до нього потужний промінь, це показує верхня пелюстка кривої. У той же час точка доступу зменшує до мінімуму енергію променя до користувача 1 в напрямку користувачів 2 і 3. Це називається "нульове управління" (управління становищем нуля діаграми спрямованості антени) і показано на кривій користувачів 2 і 3.

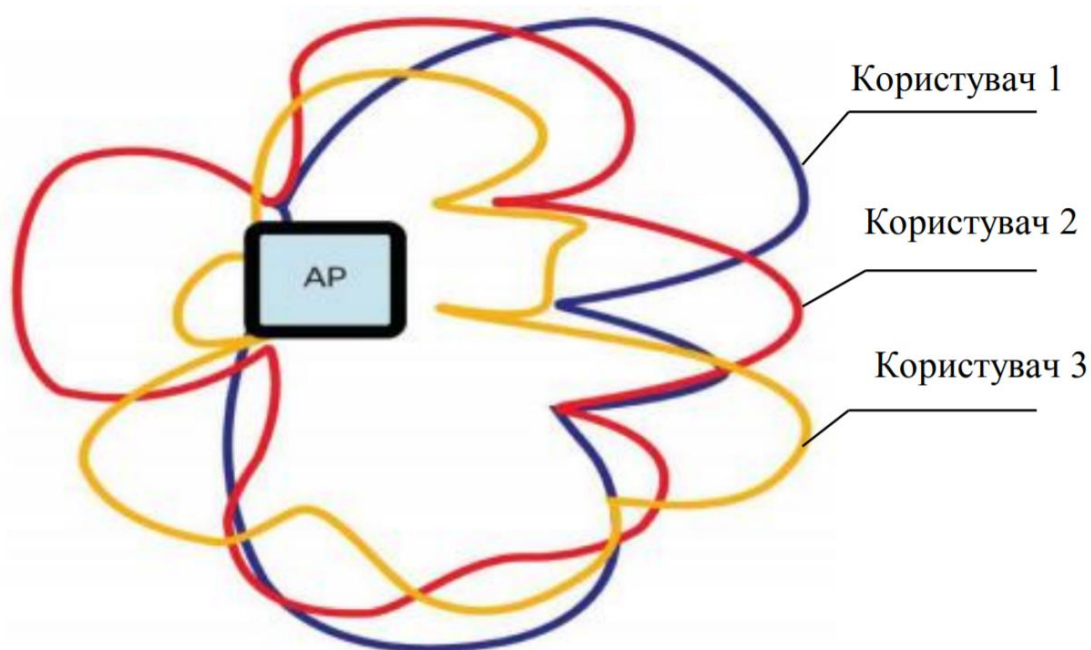


Рис. 2.11 Використання поєднання формування променя і "нульового управління" для кількох користувачів

Аналогічно в той же час, точка доступу посилає дані користувачам 2 і 3, формуючи промінь і утворюючи «вирізи», як показано на кривих користувачів 2 і 3. Таким чином, кожен з користувачів 1, 2 і 3 приймає сильний сигнал переданих саме йому даних, лише в незначній мірі пошкоджений накладенням даних для інших користувачів.

Складність реалізації *MU-MIMO* лягає головним чином на точку доступу, де і відбувається попередня обробка. Точка доступу повинна дуже точно знати характеристики бездротового каналу між собою і усіма станціями. Так як характеристики каналу змінюються з плином часу, вона повинна вести постійні вимірювання, які додають накладні витрати. Приймаючі станції повинні мати можливість повідомляти інформацію про канал точки доступу. Необхідна інформація про канал дуже схожа на ту, що потрібно для формування променя в режимі явного зворотного зв'язку.

В технології *SU-MIMO* просторова надмірність (додаткові антени) використовуються в основному в цілях підвищення достовірності передачі і збільшення пропускної здатності в напрямку від точки доступу до станції. У *MU-MIMO* до них додалася і вийшла на перший план ще одна - створення незалежних передач різним станціям.

При однаковій пропускній здатності систем *SU-MIMO* і *MU-MIMO*, остання дозволяє знизити вимоги до кількості антен клієнтів, що в свою чергу веде до зниження вартості пристрою і його розмірів.

Недолік *MU-MIMO* в тому, що кількість часу, в якому середовище зайняте, визначається найповільнішим каналом серед усіх пар «точка доступу-станція» (або каналом, який вимагає найбільше часу для завершення його передачі). Нові дані не можуть бути передані кожній зі станцій доти, поки всі передачі станціям в багатокористувацькій групі не будуть закінчені. Якщо існує велика різниця в кількості переданих даних або пропускній здатності до різних станцій, це може привести до неефективного використання бездротового середовища.

MU-MIMO є складною технологією і вимагає часу для правильної реалізації, тому вона не буде доступна в пристроях першої хвилі стандартизації. По суті, розширення можливостей системи досягається за рахунок значно більш дорогої обробки сигналу і її підвищеної складності. З цієї причини, технологія *MU-MIMO* включена в стандарт 802.11ac як додаткова.

Висновки до другого розділу

В даному розділі було розглянуто методи множинного доступу в 5G мережах. А саме: ортогональний множинний доступ (Massive Orthogonal Access), що включає в себе Massive MIMO та метод міліметрових хвиль/терагерців, та не ортогональний множинний доступ (Massive Non-orthogonal Access), що включає PD-NOMA та CD-NOMA. Виявлено, що серед цих методів для реалізації технології 5G на сьогоднішній день найкраще підходить Massive MIMO. Було вирішено розглянути та проаналізувати систему *MIMO*, як систему зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами. Було розглянуто як працює ця технологія, що в себе включає, і які принципи лежать в її основі, як реалізується *MIMO* в техніці. Переваги та недоліки *MIMO* перед іншими технологіями. Метою *MIMO* є збільшення швидкості передачі даних при тій же обмеженій смузі частот.

Технологія *MIMO*, реалізована в стандарті 802.11n, забезпечує одночасну роботу передачі / прийому даних між пристроями мережі. Але в конкретний момент часу тільки один пристрій може отримувати і відправляти дані, тоді як інші чекають своєї черги. Стандарт 802.11ac значно покращує цю ситуацію. В рамках стандарту була реалізована технологія множинного *MIMO*.

MU-MIMO створює багатопотоковий канал передачі, при використанні якого інші пристрої не чекають своєї черги. Пристрої з підтримкою *MU-MIMO* можуть забезпечувати одночасну передачу чотирьох потоків даних (до чотирьох клієнтів). Це дозволило реалізувати більш ефективне використання безпроводної мережі і скоротити затримки (час очікування на обслуговування), які виникають при значному збільшенні числа клієнтів в мережі. В результаті

вдалося підвищити швидкість передачі і розширити зону покриття за допомогою технології *MIMO*, завдяки збільшенню ширини каналу в два і чотири рази.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ *MASSIVE-MIMO*

MIMO розшифровується як множинні входи з множинними виходами. Хоча це включає декілька технологій, *MIMO* по суті може бути зведений до цього єдиного принципу: бездротової мережі, яка дозволяє передавати та приймати більше одного сигналу даних одночасно по одному і тому ж радіоканалу.

Стандартні мережі *MIMO* зазвичай використовують дві або чотири антени. *Massive-MIMO*, з іншого боку, є системою *MIMO* з особливо високою кількістю антен.

Немає встановленого числа того, що являє собою набір антен *Massive-MIMO*, але опис, як правило, застосовується до систем з десятками або навіть сотнями антен. Наприклад, *Huawei*, *ZTE* та *Facebook* продемонстрували системи *Massive-MIMO* з цілою кількістю 96 - 128 антен.

Ericsson AIR 6468 від компанії *Ericsson*, який, як стверджує компанія, є "першим в світі радіозв'язком 5G NR", використовує 64 передавальні та 64 приймальні антени.

3.1 Технологія *Beamforming*

Ненаситний попит на високошвидкісні мобільні дані створює низку нагальних дизайнерських проблем, оскільки сучасні базові станції стільникового зв'язку напружуються для управління все більш насиченим спектром радіочастот. У багатьох щільних міських районах здатність постійно прискорювати швидкість передачі та прийому даних знаходиться під загрозою.

Один шлях вперед - це розгортання базових станцій з великою кількістю антен, які одночасно спілкуються з декількома просторово відокремленими терміналами користувача на одному і тому ж частотному ресурсі та використовують багат шарову передачу. Ця технологія, яку часто називають масовим множинним входом, множинним виходом, також описується як

формування пучка з великою кількістю антен. Але це викликає питання: що таке формування пучка?

Формування пучка (англ. *Beamforming*) - це слово, яке означає різні речі для різних людей. Відповідно до його основного визначення, це можливість адаптувати схему випромінювання антенного масиву до певного сценарію. У просторі стільникового зв'язку багато людей думають про формування променю як направляючу частину потужності в певному напрямку до користувача (рис. 3.1). Відносні амплітудні та фазові зсуви застосовуються до кожного антенного елемента, щоб вихідні сигнали з антенного масиву узгоджено склалися для певного кута передачі / прийому і деструктивно скасовували один одного для інших сигналів. Просторове середовище, в якому знаходяться масив та користувач, взагалі не враховується. Це дійсно променеве формування.

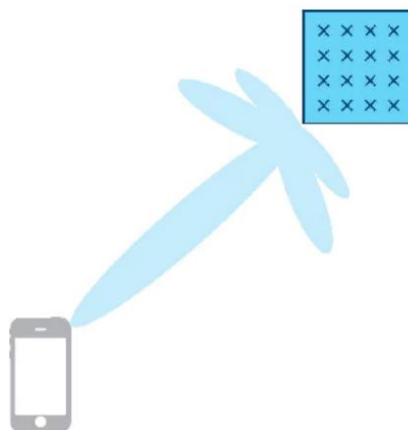


Рис. 3.1 Формування пучка

Massive-MIMO можна розглядати як форму формування пучка в більш загальному розумінні цього терміну, але цілком вилучено із традиційної форми. *Massive* просто означає велику кількість антен в антенному масиві базової станції. *MIMO* позначає той факт, що антенний масив обслуговується декількома просторово розділеними користувачами в один і той же час і частотним ресурсом.

Massive-MIMO також показує, що в реальних системах дані, що передаються між антеною та користувацьким терміналом, і навпаки, піддаються фільтруванню з навколишнього середовища. Сигнал може бути відбитий від будівель та інших перешкод, і ці відбиття матимуть пов'язані із цим затримку, ослаблення та напрямки прибуття (рис. 3.2). Між антеною та користувацьким терміналом може навіть не бути прямого огляду.

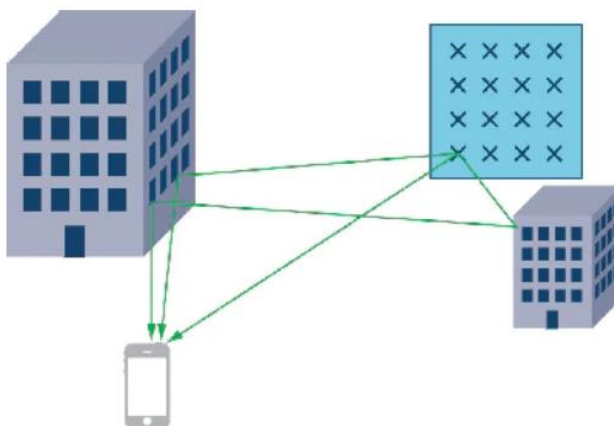


Рис. 3.2 Відбиття сигналу від перешкод

Для того, щоб скористатися кількома шляхами, необхідно охарактеризувати просторовий канал між елементами антени та терміналами користувача. У літературі цей термін зазвичай називається інформацією про стан каналу (далі – ІСК). Це фактично сукупність функцій просторової передачі між кожною антеною та кожним терміналом користувача. Така просторова інформація збирається в матриці (рис. 3.3).

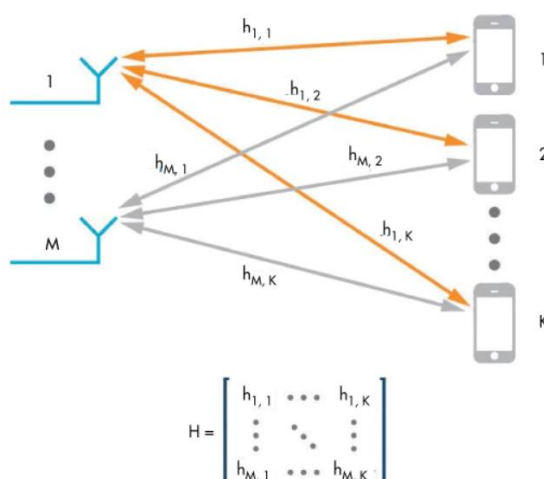


Рис. 3.3 Матриця відображення

ІСК використовується для цифрового кодування та декодування даних, переданих з антенного масиву та отриманих ними.[8]

3.2 Характеристика просторового каналу між базовою станцією та користувачем

Цікавою аналогією є врахування, що повітряна куля вискакує в одному місці, а звук цього імпульсу записується в іншому (рис. 3.4). Звук, записаний у положенні мікрофона - це просторовий імпульсний відгук, який містить інформацію, унікальну для конкретного положення як повітряної кулі, так і мікрофона в навколишньому середовищі. Звук, який відбивається від перешкод, послаблюється та затримується порівняно з прямим шляхом.

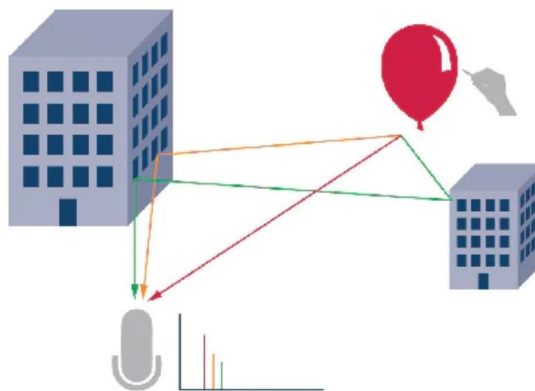


Рис. 3.4 Відбиття звуку

Якщо ми розширимо аналогію для порівняння з антенним масивом / корпусом терміналу користувача, нам потрібно більше повітряних куль (рис.3.5).

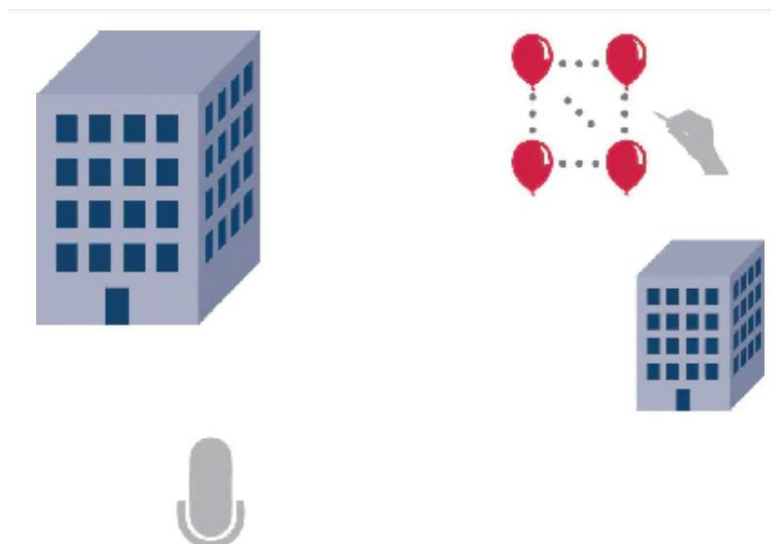


Рис. 3.5 Аналогія з багатьма кулями

Зауважте, що для характеристики каналу між кожною кулею та мікрофоном нам потрібно розривати кожну кулю в окремий час, щоб мікрофон не записував відображення для різних повітряних кульок, що перекриваються. Інший напрям також потрібно охарактеризувати (рис. 3.6).

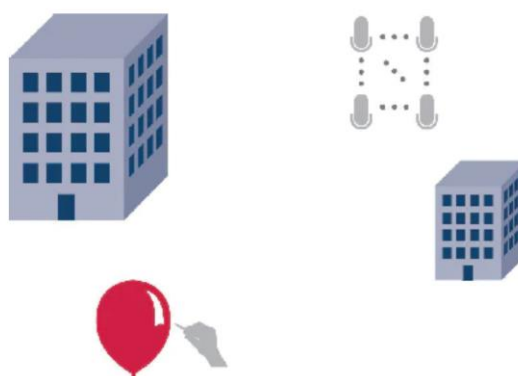


Рис. 3.6 Аналогія з багатьма мікрофонами

У цьому випадку всі записи можуть бути виконані одночасно, коли повітряна куля вискакує в позиції користувальницького терміналу. Це явно набагато менше часу!

У радіочастотному просторі пілотні сигнали використовуються для характеристики просторових каналів (рис. 3.7). Канали передачі по повітрю між антенами та терміналами користувача є зворотними, тобто канал однаковий в обох напрямках. Це залежить від системи, яка працює в дуплексному режимі

ділення за часом (далі – *TDD*) на відміну від дуплексного режиму поділу частоти (далі – *FDD*).



Рис. 3.7 Використання сигналів

У режимі *TDD* передачі висхідної та низхідній лінії зв'язку використовують один і той же ресурс частоти. Припущення про взаємність означає, що канал потрібно характеризувати лише в одному напрямку. Канал висхідної лінії зв'язку - це очевидний вибір, оскільки з терміналу користувача повинен бути відправлений лише один пілотний сигнал, який приймають усі елементи антени.

Складність оцінки каналу пропорційна кількості терміналів користувача, а не кількості антен у масиві. Це є надзвичайно важливим, оскільки користувацькі термінали можуть рухатися, і, отже, оцінку каналів потрібно буде проводити часто. Ще одна істотна перевага характеристики на основі висхідної лінії зв'язку полягає в тому, що вся оцінка важких робочих каналів та обробка сигналу проводиться на базовій станції, а не на кінцевому користувачі.

3.3 Обробка сигналу для *Massive-MIMO*

У попередньому підрозділі ми описали, як оцінюється ІСК (позначений матрицею H). Матриці виявлення та попереднього кодування обчислюються на основі H , і існує ряд методів обчислення цих матриць.

Рисунки 3.8 та 3.9 дають опис того, як працює обробка сигналів у висхідній та низхідній лінії зв'язку, відповідно до трьох лінійних методів, згаданих раніше. Для попереднього кодування може також бути якась матриця

масштабування для нормалізації потужності в масиві, який для простоти був опущений.

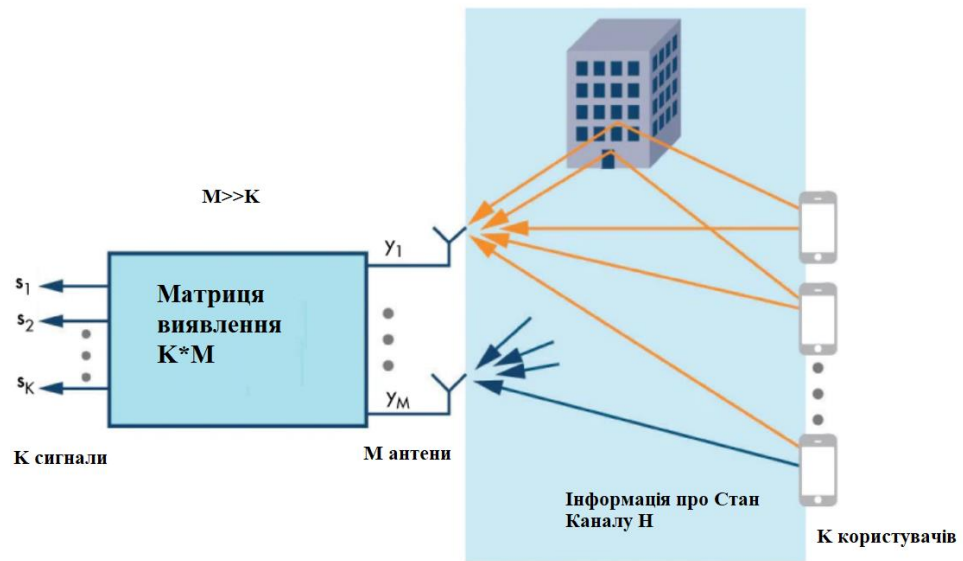


Рис. 3.8 Зображення висхідної лінії зв’язку

Табл. 3.1

Тип виявлення сигналу (до рис.3.8)

Тип виявлення	Характеристика сигналу
<i>MR</i>	$s = H^H y$
<i>ZF</i>	$s = (H^H H)^{-1} H^H y$
<i>MMSE або RZF</i>	$s = (H^H H + \beta I)^{-1} H^H y$

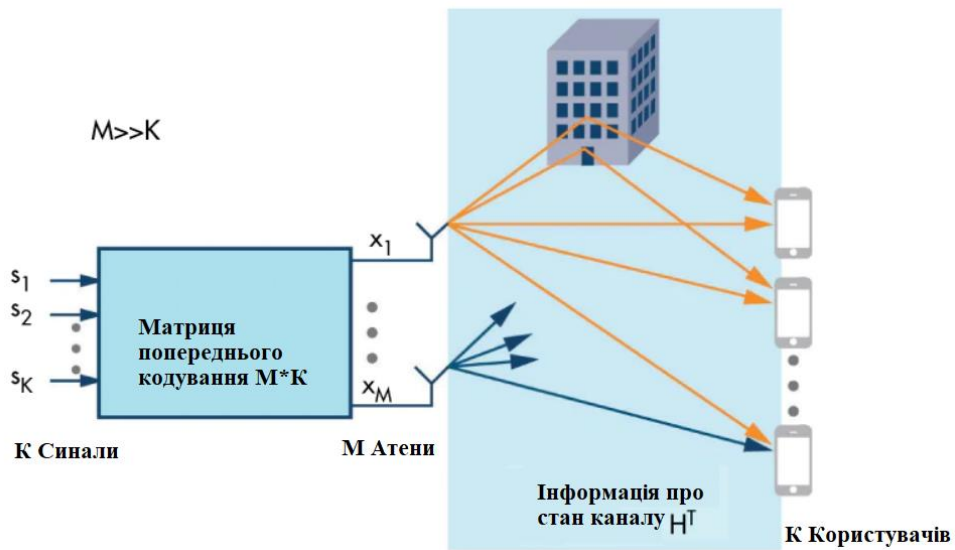


Рис. 3.9 Зображення низхідної лінії зв’язку

Табл. 3.2

Тип виявлення сигналу (до рис.3.9)

Тип виявлення	Характеристика сигналу
MR	$x = H^* s$
ZF	$x = H^* (H^T H^*)^{-1} s$
MMSE або RZF	$x = H^* (H^T H^* + \beta I)^{-1} s$

* позначає сполучник;

Максимальне відношення фільтрації (далі – *MR*), спрямоване на максимальне співвідношення сигнал / шум. Це найпростіший підхід з точки зору обробки сигналів, оскільки матриця виявлення / попереднього кодування є лише сполучником матриці ІСК, H . Великий недолік цього методу полягає в тому, що втручання між користувачами – ігноруються.

Нульове форсування (далі – *ZF*) попереднього кодування намагається вирішити проблему інтерференції між користувачами, створивши критерії оптимізації для мінімізації для неї. Матриця виявлення / попереднього кодування є псевдо-інверсією матриці ІСК. Обчислення псевдо-інверсії обчислювально дорожче, ніж складний кон'югат, як у випадку з максимальним співвідношенням. Однак, зосереджуючись настільки ретельно на мінімізації перешкод, отримана потужність у користувача страждає.

Мінімальна середньо-квадратична помилка (*MMSE*) намагається знайти баланс між отриманням найбільшого посилення сигналу та зменшенням перешкод. Цей цілісний вигляд має складність обробки сигналу як ціну. Підхід до мінімальної середньо-квадратичної помилки вводить в оптимізацію термін регуляризації - позначений як β на рис. 3.8 і 3.9 - що дозволяє знайти баланс між коваріацією шуму та потужністю передачі. Іноді це також називається в літературі як регульоване нульове форсування (*RZF*).

Це не вичерпний перелік методів попереднього кодування / виявлення, але дає огляд основних лінійних підходів. Також можуть застосовуватися нелінійні методи обробки сигналів, такі як кодування "брудного паперу" та послідовне скасування перешкод. Хоча ці методи пропонують оптимальну ємність, вони дуже складні і важкі у виконанні.

Описані лінійні підходи, як правило, достатні для *Massive-MIMO*, де кількість антен стає значною. Вибір методики попереднього кодування / виявлення залежатиме від обчислювальних ресурсів, кількості антен, кількості користувачів та різноманітності конкретного середовища, в якому знаходиться система. Для великих антенних масивів, де кількість антен значно більша, ніж кількість користувачів, підхід максимального співвідношення цілком може бути достатнім.

3.4 *Massive-MIMO* в 5G

В даний момент 5G все ще знаходиться на стадії планування, багато приватних компаній і галузеві групи виробляють спільні дослідження, щоб зрозуміти, що ж буде відбуватися з цим поколінням мереж в найближчі кілька років. В мірі збільшення числа користувачів необхідно забезпечити всіх високою швидкістю та збільшити об'єми трафіку. Для цього потрібні відповідні базові станції, що становлять стільникові мережі.

У сучасній базовій станції четвертого покоління 4G є з десятків портів для антен, що обробляють весь трафік: вісім працюють на передачу і чотири на прийом. Але розробники вирішили на цьому не зупинятися і прийшли до висновку, що базові станції 5G повинні підтримувати близько сотні портів і цілий масив антен. Це означає, що базова станція зможе відправляти і приймати сигнали від колосальної кількості користувачів одночасно, збільшуючи пропускну здатність мобільної мережі в десятки і сотні разів (рис. 3.10).

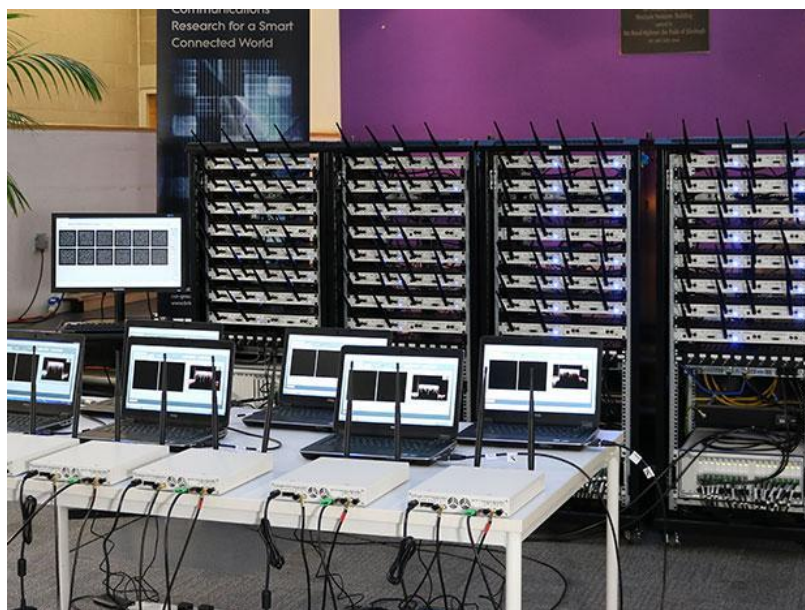


Рис. 3.10 Експериментальне обладнання *Massive-MIMO*

Як вже було описано раніше, ця технологія отримала назву *Massive-MIMO*, і дана технологія використовує набагато більше радіомодулів для прийому-передачі інформації. Тим самим виводить цю концепцію на радикально новий рівень, пропонуючи використовувати десятки і сотні антен *MIMO* в одному масиві (рис. 3.11).



Рис. 3.11 Порівняння кількості антен *MIMO* та *Massive-MIMO*

Використання великої кількості додаткових антен допоможе сфокусувати енергію на більш дрібні області простору, що в свою чергу позитивно позначиться на збільшенні пропускної спроможності та ефективності використання випромінюваної енергії. В інституті інженерів електротехніки та електроніки (далі – *IEEE*) вказують також і інші переваги використання *Massive-MIMO*, - це більш дешеве виробництво окремих компонентів антеною системи, більш низькі затримки в мережі і спрощення роботи на рівні MAC [9].

В експерименті, зображеному на рисунку 3.10, була досягнута швидкість передачі даних в 145,6 (б/с) / Гц для одночасного підключення 22-х користувачів. Для кожного користувача забезпечувалася модуляція 256-QAM. Ширина радіоканалу стандартна - 20 МГц, як і в звичайному *Wi-Fi*, навіть без додаткового об'єднання каналів. Частота роботи антен 3.51 ГГц. При демонстрації експерименту використовувалася гнучка платформа прототипування від *National Instruments* з програмним забезпеченням *LabVIEW* і апаратним забезпеченням *PXI*.

Характерною особливістю вимог до мереж мобільного зв'язку 5G є реалізація наступних цільових показників ефективності:

- досягнення пікової швидкості передачі даних до 20 Гбіт/с на лінії від базової станції (далі – БС) до абонентської станції (далі – АС) – *Down line* (далі – *DL*), та 10 Гбіт/с на лінії від АС до БС – *Up Line* (далі – *UL*);
- забезпечення швидкості передачі даних 100 Мбіт/с одночасно для багатьох користувачів в умовах мегаполісу;
- підвищення спектральної ефективності до 30 біт/с/Гц для *DL* та 15 біт/с/Гц для *UL*;
- одночасне підключення декількох сотень тисяч безпроводних датчиків;
- досягнення надвисокої надійності мережі (вірогідність успішної доставки пакета протягом 1 мс повинна досягати 99,9999%);

- зниження затримки на рівні управління в мобільному зв'язку до 5 мс, в супутниковому зв'язку – до 600 мс;
- збереження якості обслуговування (далі – QoS) при швидкості руху мобільних терміналів до 500 км/год;
- збільшення об'єму мережі до 1 000 000 терміналів на 1 км²;

3.5 Особливості передачі інформації

Звичайно, для повноти інформації, що приводиться не можна промовчати про те, що зазначені результати є все ж експериментальними і будуть дуже далекі від того, що вийде при комерційній реалізації системи. Представлені експериментальні вимірювання були отримані в середовищі без перешкод і відсутності сигналів від інших стільникових пристроїв. Крім того, користувачі залишалися нерухомими, в той час як реальні абоненти все частіше знаходяться в русі, а антени їх бездротових пристроїв можуть перебувати під абсолютно різними кутами в просторі щодо базової станції. І, як ви можете собі уявити, розгортання системи з сотнями і тисячами антен і терміналів не можна назвати "плавним" переходом до мереж наступного покоління. Це вимагає складної обробки одержуваних даних в вузлах, і кожен вузол повинен мати можливість визначати дані які передаються від N-й антени і вміти відрізнити їх від даних, що передаються антеною M. В іншому випадку ефективна робота *Massive-MIMO* буде неможлива, тому потрібна доробка методів обробки інформації.

Також, не можна не відзначити, що установка великої кількості антен для обробки стільникового трафіку викликає великі перешкоди в разі накладення цих сигналів (рис. 3.12).

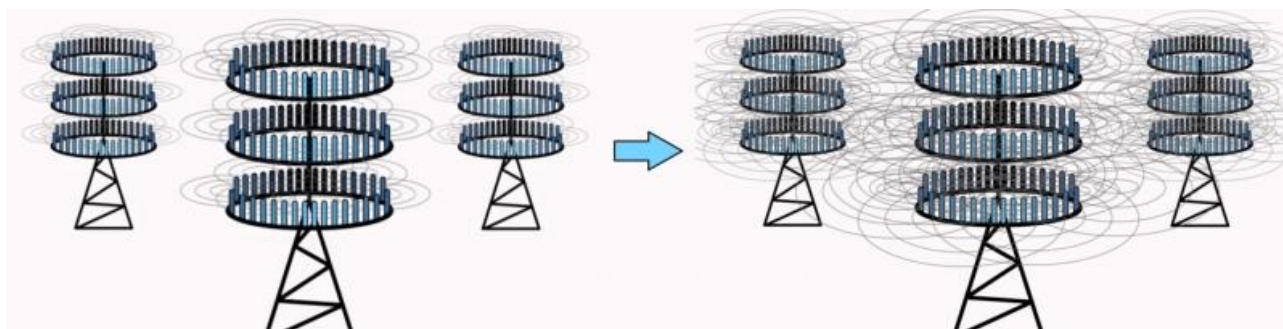


Рис. 3.12 Приклад перешкод

Тому для зменшення перешкод в 5G повинні використовуватися такі технологічні рішення:

- Використання довжини хвилі міліметрового діапазону;
- Організація стільників невеликих розмірів;
- Технологія beamforming і повно-дуплексна передача даних.

Massive-MIMO буде перспективним рішенням з точки зору масштабованості 5G. Не дивлячись на те, що приведені вище результати отримані в лабораторних умовах, ефективність спектру була збільшена більше ніж у два десятки разів. Це говорить виключно про високий потенціал даної технології.

На даному рисунку зображена модель практичної реалізації технології *Massive-MIMO* у лабораторних умовах в Університеті Лунд у Швеції (рис. 3.13). В основі цього обладнання *USRP RIO* (зліва) і крос-поляризованої антенної решітки (справа).

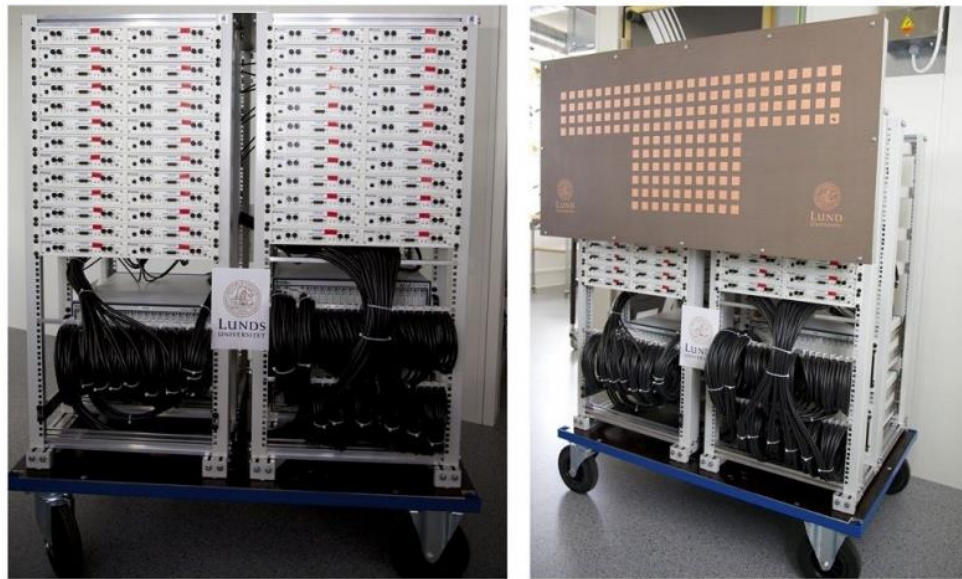


Рис. 3.13 Обладнання *USRP RIO* та крос-платформенна антенна решітка

3.6 Переваги системи *Massive-MIMO*

Виграш в просторовому рознесенні

Головна перевага *Massive-MIMO* перед традиційними системами *MIMO* полягає в можливості адаптивного діаграмо-утворення або формування множинності променів (*beamforming*) у багатокористувацькому режимі (*Multi-user Massive-MIMO*), при якому дані потоку передають за заданим користувачем напрямком (рис. 3.14).



Рис. 3.14 Формування променів для конкретних АС

При цьому одній АС виділяються ті ж найсучасніші ресурси блоку, що і іншим АС в межах одного стільника. За допомогою такого рознесення в просторі досягається економія частотно-часового ресурсу або, іншими словами, підвищується спектральна ефективність. Крім цього, так як потенційна точність концентрації направленої променю на заданий мобільний термінал досить висока, інтерференційні завади між променями мають обов'язково помітити.

За рахунок зниження інтерференційних завад, більше немає потреби у складних механізмах ортогоналізації сигналів, що значно спрощує попередню обробку сигналів і збільшує енергетичну ефективність.

Енергетична ефективність

Енергетична ефективність характеризується кількістю біт в секунду, які приходять на 1 Вт потужності сигналу, віднесеної до спектральної щільності шумів [10]. Виходячи з цього, чим більша енергетична ефективність, тим менше відношення сигнал/шум необхідне для передачі одного біта даних. Застосування в системах мобільного зв'язку технологій *Massive-MIMO*, які володіють високою енергетичною ефективністю, дозволяє зменшити енергоспоживання обладнання, покращити електромагнітну сумісність за рахунок зниження випромінюваної потужності, а також підвищити екологічну безпеку передавальних радіотехнічних об'єктів, особливо АС.

Доведено, що при збільшенні на БС кількості антен в системі *Massive-MIMO* до величини M , то потужність передачі кожної АС зменшиться пропорційно $1/M$. Дане твердження справедливе при ідеальних вимірах стану каналу на БС, тобто, якщо індикатори які містяться в групі інформації ІСК, в повній мірі характеризують стан радіоканалу. Якщо ж індикатори ІСК не ідеальні, то потужність передачі кожної АС зменшиться пропорційно $1/\sqrt{M}$.

Спектральна ефективність

Спектральна ефективність характеризується швидкістю передачі даних на одиницю ширини спектра частот і вимірюється в біт/с/Гц. Пропускна здатність системи *Massive-MIMO* збільшується пропорційно до збільшення

кількості антенних портів в системі. Наприклад для випадку використання смуги частот 20 МГц були отримані наступні результати:

- кожен термінал абонента в стільнику мав можливість отримати швидкість передачі даних до 17 Мбіт/с;
- загальна пропускна здатність стільника становить 730 Мбіт/с, що відповідає спектральній ефективності 36,5 біт/с/Гц.

Практично виміри спектральної ефективності показали високі результати станом на сьогоднішній день – 79,4 біт/с/Гц, що в свою чергу, еквівалентно швидкості передачі даних в 1,59 Гбіт/с. Якщо порівнювати ці показники з середнім значенням в *MIMO 4*4* в *LTE-Advanced*, яке складає лише 3,7 біт/с то перевага *Massive-MIMO* по спектральній ефективності стає очевидною.

Висновки до третього розділу

У даному розділі було розглянуто систему *Massive-MIMO*, її переваги та недоліки, а також технології, завдяки яким ця система набуває свого авторитету в мережах 5G. Різноманітність, яку запроваджує багатостороннє поширення, використовується для забезпечення передачі даних між базовою станцією та кількома користувачами в один і той же час.

Проаналізовано спектральну та енергетичну ефективність з просторовою модуляцією.

Було розроблено методику впровадження та використання системи *Massive-MIMO*, враховуючи її технології, такі як *beamforming*, та використання стільників невеликих розмірів, та особливості передачі інформації.

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі було проаналізовано методи множинного доступу в мережах п'ятого покоління. Розглянуто їх переваги та недоліки, складності при впровадженні та використанні. Було виявлено, що на даний момент найбільш ефективним та зручним буде використання технології Massive MIMO. Ця система працює за принципом MIMO, але має багато переваг. Завдяки використанню величезної кількості антен, надається можливість впровадженні технології *beamforming*, або ж формування променя, яка дозволяє потраплянню сигналу в віддалені місця.

У результаті виконання кваліфікаційної роботи можна зробити наступні висновки:

по-перше, встановлено, що на даний момент часу серед методів множинного доступу найбільш актуальним для реалізації у 5G є Massive MIMO.

по-друге, виявлено можливості у покращенні мобільного зв'язку при використанні *Massive-MIMO* в мережі 5G, оскільки результати дослідження показали, що отримана швидкість буде значно перевищувати попереднє покоління мережі, що в свою чергу дозволить якісніше та швидше передавати відео-потік у *Full HD* якості та використовувати процесори в хмарі.

по-третє, визначено, що технологія Massive-MIMO є актуальною майже для всіх систем бездротової передачі даних, розглянуто застосування для безпілотних дронів, в технології Internet of Things та Internet of BioNanoThings.

У цілому, мета кваліфікаційної роботи досягнута, а отримані результати показали, що використання системи Massive-MIMO в мережі 5G є актуальним.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мережі 5G та використання дронів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.miragenews.com/optus-and-ericsson-complete-australias-first-5g-drone-flight/>.
2. Prospects for the use of MIMO based on IEEE 802.11 ac in IoT. National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Випуск 4, 2020, с.126-131.
3. What is 6G Mobile Communications Technology. URL: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/6g-mobile-wireless-cellular/technology-basics.php> (дата звернення 09.05.2021).
4. R. Jia, X. Chen, C. Zhong, D. W. K. Ng, H. Lin, and Z. Zhang, “Design of non-orthogonal beamspace multiple access for cellular Internet-ofThings,” IEEE J. Sel. Topics Signal Process., vol. 13, no. 3, pp. 538-552, Jun. 2019.
5. Збірник наукових праць КПІ. – Вип.№47. – К.: НТУУ КПІ. 2018.
6. Беспровідні технології MU-MIMO [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://habrahabr.ru/post/132247>.
7. «802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi» / Cisco - Technical White Paper, August 2012.
8. Xiang Gao, Massive MIMO в реальних середовищах поширення , Лундський університет, 2016.
9. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Коваль В.А. Сети мобильной связи 5G: технологии, архитектура и услуги. – М.: Медіа Паблішер, 2019.
10. Зюко А.Г. и др. Теория передачи сигналов. – М.: Радио и связь, 1980.