

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **“ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ
РАДІОДОСТУПУ В МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ’ЯЗКУ 5G”**

Виконав: студент 6 курсу, групи
РТДМ-61
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Фенченко Д.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Дакова Л.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(прізвище та ініціали)

Київ - 2021

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	11.10.21	Виконано
2.	Аналіз технічних аспектів технології 5G	15.10.21	Виконано
3.	Технології Massive MIMO у стандартизації 5G	31.10.21	Виконано
4.	Підвищення якості технології 5G	15.11.21	Виконано
5.	Висновки, вступ, реферат	10.12.21	Виконано
6.	Розробка демонстраційних аркушів	18.12.21	Виконано

Студент

Фенченко Д.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Дакова Л.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської роботи: 75 сторінок, 23 рисунка, 1 таблиця, 26 джерел.

Об'єкт дослідження – процеси, системи та пристрої які використовуються в технології 5G.

Предмет дослідження – технології та методи використання технології та кодування в безпроводових мережах.

Мета роботи – дослідити технології для підвищення якості радіодоступу в мережах мобільного зв'язку 5G.

Методи дослідження – теорія теоретичні методи дослідження використання технології 5G.

В роботі приведено основні відомості про системи та мережі безпроводового зв'язку та виявлено тенденції їх сучасного розвитку.

Досліджено принципи роботи роботи технології 5-го покоління , визначено їх технічні специфікації в системах зв'язку. Проаналізовано різні типи технологій безпроводної системи та методи їх вдосконалення.

Галузь використання – безпроводова мережа зв'язку.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ АСПЕКТІВ ТЕХНОЛОГІЇ 5G	11
1.1 Архітектура бездротової мережі 5G	11
1.2 Технології в мережі 5G	14
1.2.1 Наскрізна мобільна архітектура.....	18
1.3 Інноваційні технології та переваги мережі 5G в різних технологічних областях.....	21
1.4 Використання та безпека мережі 5G.....	24
2. ТЕХНОЛОГІЇ MASSIVE MIMO У СТАНДАРТИЗАЦІЇ 5G	28
2.1 Massive MIMO як основна технологія 5-го покоління мобільного зв'язку	30
2.2. Розгортання малих стільників із застосуванням макросів із спрямованою антенною решіткою	34
2.3 Проблеми Massive MIMO в 5G розгортання мережі	39
2.4 Покриття мережі 5G.....	42
2.5 Впровадження великомасштабної антенної решітки технології 5G	44
2.6 Еволюція багатопроменевого базового покриття до тривимірного	46
2.7. Формування променя технології Beamforming.....	48
2.8 Переваги для користувача та оператора зв'язку	52
3 ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ 5G	55
3.1 Дослідження якості оцінки каналу зв'язку	55
3.2 Складність реалізації технології для підвищення якості зв'язку	58
3.3 Практичні перешкоди у системі Massive MIMO.....	61
3.4 Оцінка каналу передачі даних по висхідній та низхідній лініях	62
3.5 Нові стандарти та проекти для покращення мережі	65
ВИСНОВКИ.....	77
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	78
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ	81

ВСТУП

Успіхи в розвитку мобільних мереж зв'язку та показники ринку мобільних послуг не дають ученим і розробникам зупинитися на досягнутому в ході еволюції технологій 4G. Звичайно, перед телекомунікаційним спільнотою постає питання: що за межами 4G. Якими характеристиками повинні володіти технологією 5G? Коли можна очікувати їх появи на ринку і як при цьому зміниться мобільний світ?

У поточному році ряд провідних світових виробників телекомунікаційного обладнання і операторів мобільного зв'язку (Ericsson, Samsung, Huawei, Vodafone та ін.) На всесвітніх форумах (MWC, LTE World Summit) анонсували початок дослідницьких робіт зі створення технології 5G.

Рівень готовності до розгортання 5G-мереж в різних галузях і сферах діяльності різниться: найменший - в охороні здоров'я та обробної промисловості, найбільший - в секторі телекомунікаційного обладнання. Оперативне і успішне розгортання 5G-мереж залежить від наявності необхідних стандартів і специфікацій. Для мереж з робочою частотою до 6 ГГц підходить інфраструктура 4G-мереж. Для 5G-мереж міліметрового діапазону (більше 6 ГГц) інфраструктуру доведеться створювати з нуля, але саме ці мережі здатні реалізувати весь потенціал 5G-технологій. Важливу роль у розвитку 5G-мереж гратимуть схеми пам'яті, як вже наявні, так і перспективні. Як засіб прискорення розробки 5G-апаратури можна розглядати технологію програмно керованої радіозв'язку (SDR). І, нарешті, приватні 5G-мережі стануть одним з чинників розвитку промислового Інтернету речей.

Починається вирішальний етап розвитку технології 5G. Важливість швидкодіючих і сумісних здійснювати підключення до мережі ніколи не була настільки висока. Підприємства і споживачі завжди повинні бути на зв'язку, де б вони не знаходилися. Типові мобільні операції, що вимагають буферизації в сучасних мобільних мережах на базі 4G, в мережах 5G відбуватимуться миттєво. Але швидкодія - не єдина перевага технології 5G, яка забезпечить суттєве

зростання ємності, підвищення надійності бездротових з'єднань, а також наднизьким споживанням час очікування, необхідні для надання критично важливих послуг і масштабного поширення Інтернету речей.

Отже, очікується, що в 2021 році почнеться масове розгортання 5G-мереж. На що проходила в 2018 році в Пхенчхані Зимовій Олімпіаді південнокорейські оператори зв'язку вже експлуатували демонстраційну 5G-мережу, що охоплювала олімпійські об'єкти, Сеул і ряд інших великих міст країни. Однак на ділі це була мережа, яку можна визначити як 4G + або 4G ++. Тепер ведуться повномасштабні роботи по розгортанню мереж нового покоління, найбільш активно в Південній Кореї і США, де до 2024 року число базових станцій 5G досягне 600 тис. Комерційні послуги стаціонарних (з фіксованими вузлами) бездротових мереж вже доступні в декількох містах США, Південної Кореї і ряді інших країн. Устаткування, що розміщується на території користувача, надається найбільшими постачальниками комплектного обладнання (ОЕМ). Спроби створення аналогів робляться виробниками за оригінальними проектами (а не за ліцензіями - ODM), але їх виробниці поки поступаються в продуктивності.

Слід зазначити, що технологія 5G відрізняється «двоповерховою» структурою. Спочатку будуть розвиватися мережі, що працюють в діапазоні частот до 5-6 ГГц. Можливість використання ними інфраструктури мереж покоління 4G полегшить перехід на новий стандарт з технологічної точки зору і дозволить значно скоротити витрати. Але цей «поверх» - проміжний, перехідний етап до мереж 5G міліметрового діапазону (mmWave). Ця ще до кінця не відпрацьована технологія не подолала «хвороб зростання».

Корпорація Mobile Experts (Кампбелл, шт. Каліфорнія) спільно з декількома операторами мобільного зв'язку з різних країн відстежує попит на трафік мобільних даних. За допомогою інструменту Traffic Density контролюється рівень трафіку в різних секторах. Застосування показника «Гбіт/с - на - км² - на МГц спектра» (GkM) дає можливість зрозуміти, якими способами новітні мережі повинні задовольняти екстремальний попит в деяких містах. Порівняння GkM у різних операторів зв'язку дозволяє оцінити, що буде потрібно при розгортанні для забезпечення необхідного

обсягу трафіку - малі стільники, масові MIMO-системи або міліметрові базові станції.

Щільність трафіку, яка вимірюється в GkM, неухильно росте протягом багатьох років, що найбільш виражено на станціях метро в Сеулі і Токіо, де стоять впритул один до одного люди дивляться відеоконтент. На рідкість плавне підвищення щільності обумовлено появою нових додатків і контенту на мобільних платформах. Коли рівень щільності трафіку перевищив 0,02 GkM, з'явилася тенденція повсюдного прийняття малих сот. Іншими словами, насиченість макромережі досягалася на рівні вище 0,02 GkM, і малі стільники стали одним з рентабельних рішень нарощування ємності мереж.

Застосування в мобільних мережах спектра 5G може знизити щільність трафіку. Так, наприклад, одна з провідних південнокорейських мереж впровадила 100-МГц канали на частоті 3,5 ГГц, що має зменшити показник GkM. Додаткові 800 МГц спектра на частоті 28 ГГц дозволяють знизити щільність трафіку в точках доступу до значно більш керованих рівнів.

Таким чином, оператори можуть розглядати використання 5G-спектра як засіб управління щільністю трафіку. Коли через високої щільності нарощування ємності стає занадто дорогим, оптимальне рішення - розширення спектра.

1. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ АСПЕКТІВ ТЕХНОЛОГІЇ 5G

1.1 Архітектура бездротової мережі 5G

5G - це мобільна мережа 5 -го покоління. Це новий глобальний стандарт бездротової мережі після мереж 1G, 2G, 3G та 4G. 5G забезпечує новий тип мережі, яка призначена для з'єднання практично всіх і всього разом, включаючи машини, об'єкти та пристрої.

Бездротова технологія 5G призначена для того, щоб забезпечити більш високу пікову швидкість передачі даних у багато Гбіт / с, наднизьку затримку, більшу надійність, велику пропускну здатність мережі, підвищену доступність та більш рівномірний досвід користування для більшої кількості користувачів. Більш висока продуктивність та підвищена ефективність розширюють можливості нового користувацького досвіду та підключають нові галузі промисловості. Теоретична пікова швидкість 5G становить 20 Гбіт / с, тоді як пікова швидкість 4G становить лише 1 Гбіт /с. 5G також обіцяє меншу затримку, що може покращити продуктивність бізнес-додатків , а також інші цифрові можливості (наприклад, онлайн-ігри, відеоконференції та автомобілі, що керують автомобілем) . У той час як попередні покоління технологій стільникового зв'язку (наприклад, 4G LTE) були зосереджені на забезпеченні підключення, 5G виводить підключення на новий рівень, надаючи клієнтам підключення з хмари. Мережі 5G є віртуалізованими та керуються програмним забезпеченням, і вони використовують хмарні технології.

Мережа 5G також спростить мобільність, забезпечуючи безперебійні можливості відкритого роумінгу між стільниковим та Wi-Fi доступом. Користувачі мобільного зв'язку можуть залишатися на зв'язку під час переміщення між зовнішніми бездротовими з'єднаннями та бездротовими мережами всередині будівель без втручання користувача або необхідності повторної автентифікації користувачів.

Згідно зі стандартами та специфікаціями розробленими організацією 3GPP були визначені наступні ключові показники для наступного покоління зв'язку:

- Пікова швидкість передачі даних на лінії вниз (Downlink) 20 Гбіт/с
- Пікова швидкість передачі даних на лінії вгору (Uplink) 10 Гбіт/с
- Мінімальна затримка в підсистемі радіодоступу для сервісів URLLC – 0,5 мс, для сервісів eMBB – 4 мс;
- Максимальна щільність підключених до мережі в міських умовах пристроїв зі світу IoT – 1'000'000 пристроїв/кв.км;
- Автономна робота пристроїв зі світу IoT без підзарядки акумулятора протягом 10 років;
- Підтримка мобільності при максимальній швидкості пересування об'єктів 500 км/год;
- Висока енергетична ефективність;
- Безпека здоров'ю людини.

Платформа мережі 5G надає операторам значні переваги, які виявляються головним чином розширенні функціональних можливостей і характеристик мережі, підвищенні задоволеності користувачів (User Experience). Нижче наведено основні параметри мережі IMT2020 (5G) в порівнянні з показниками IMT-Advanced (4G).

Пікова швидкість: мережа 5G забезпечує в 20 разів більшу швидкість порівняно з 4G, тобто близько 20 Гбіт/с.

Швидкість користувача може досягати 100 Мбіт/с і більше. Ефективність використання спектра, обсяг інформації, яка може бути передана на одиницю частотного діапазону в мережі 5G, буде щонайменше втричі вищою, ніж у мережі 4G.

Мобільність користувача, швидкість, з якою користувач з терміналом 5G може переміщатися в зоні покриття мережі без втрати передачі між базовими станціями, в мережі 5G досягає швидкості 500 км/год, що дозволяє використовувати послуги 5G у високошвидкісних поїздах.

Затримка мережі 5G зменшується до 1 мс або менше, тоді як мережа 4G може досягати затримки щонайменше 10 мілісекунд. Це дозволяє використовувати технологію 5G для критично важливих комунікацій та відеоспостереження, тактильних Інтернет-послуг, AR/VR і т.д.

Щільність терміналів у мережі 5G збільшується на порядок і може сягати кількох мільйонів пристроїв на 1 кв. км, тобто на одному квадратному метрі поверхні може бути кілька десятків або навіть сотень мініатюрних пристроїв (таких як датчики IoT).

Енергоефективність мережі 5G на порядок краща, ніж у мережі попереднього покоління.

Робоча ємність на одиницю площі, тобто швидкість передачі даних на квадратний метр зони покриття мережі, 5G на два порядки вище, ніж у мережі 4G.

4G доступний більше десяти років. За цей час MNO побудували величезну інфраструктуру 4G, і новатори знайшли рішення для вирішення недоліків 4G. 5G відкрив нові можливості, але разом з ним прийшли й деякі нові проблеми.

Менше покриття.

Вищі радіочастоти мають меншу довжину хвилі. А це означає, що вони не можуть подорожувати так далеко. Це означає, що «комірочки» стільникової мережі 5G мають бути меншими, якщо MNO хоче надати доступ до цих високочастотних діапазонів. Мережі 5G вимагають більшої інфраструктури, і ця інфраструктура пропонує менше покриття.

Крім того, більш високі частоти важче проникають у будівлі, а це означає, що вони мають погане покриття всередині приміщень. 5G також може використовувати діапазони на низьких і середніх частотах, але в приміщеннях часто не можна використовувати вищі діапазони.

Підключення 5G є найбільш корисним у великих містах, де є більша концентрація стільникових пристроїв (і більший попит на високошвидкісний Інтернет з низькою затримкою). Але MNO потрібен час, щоб створити інфраструктуру, необхідну для забезпечення широкого покриття 5G.

Збільшені витрати.

Взагалі кажучи, чим довше існує мережа і чим менш складна її базова технологія, тим більше модемів мають вибирати виробники Інтернету речей, і тим менше ці модеми коштують. 5G є абсолютно новим, і вам потрібні високотехнологічні модеми та модулі для підключення до мереж 5G. Це може значно збільшити ваші витрати на розробку. Однак 5G mMTC спеціально розроблений для стільникового IoT і буде коштувати значно дешевше, ніж інші технології 5G.

1.2 Технології в мережі 5G

Для задоволення постійно зростаючих потреб бездротового зв'язку було розроблено стандарт 5G під загальною назвою «Нове радіо 5G». Розробка 5G NR проходила практично з нуля з урахуванням вимог мереж 5G та з використанням кращих технологій. Тому в 5G NR використовується новітня технологія модуляції, формування хвиль і технології радіодоступу (RAT), яка, крім іншого, забезпечує високу швидкість передачі даних і продовжує термін служби батареї для пристроїв 5G.

Основні відмінні риси радіотехнології 5G NR:

Оптимізована технологія OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing – мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналу). Ця технологія вже успішно використовується в 4G/LTE-A. OFDM являє собою комбінацію модуляції та мультиплексування. Як правило, мультиплексування включає незалежні сигнали, що надходять з різних джерел. В OFDM завдання мультиплексування застосовується до окремих сигналів, але ці окремі сигнали є набір з одного основного сигналу.

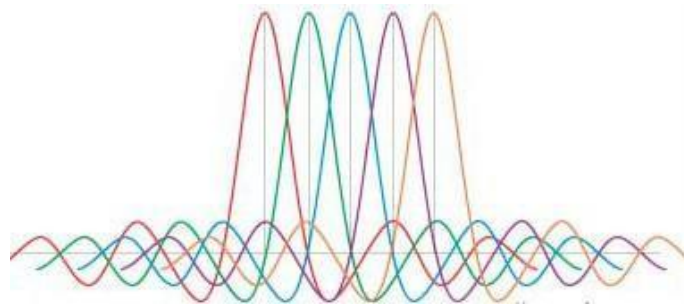


Рис. 1.1. Частотні канали, що перекриваються з ортогональними несучими

Найбільш важливою відмінністю технології OFDM від простого поділу радіосигналу по кількох паралельних частотних каналах є ортогональність сигналів OFDM, що піднесуть у груповому спектрі.

Фізичне значення ортогональності полягає в тому, щоб змішувати в структурі кожної піднесе спеціальну мітку унікального числа синусоїдальних коливань сигналу, які відрізняються по фазі на 90 градусів (ортогональні функції), дозволяючи демультіплексуру розділяти сигнали піднесе на основі аналізу цих міток, навіть частотних діапазонів. Вибір несучих у загальному спектрі звичайного багатоканального сигналу через обмежені технологічні можливості сучасних смугових частотних фільтрів вимагає досить великого частотного поділу несучих, що обмежує збільшення їх кількості в даній смузі частот.

Виділення несучої у груповому спектрі сигналу OFDM під час демультіплексування здійснюється за допомогою ортогональних перетворень сигналу. Це дозволяє перекривати спектри сусідніх піднесучих, що може значно збільшити густину частот їх розташування у спектрі сигналу та підвищити ефективність використання спектра.

Формування променя (Beamforming). Для зменшення споживання енергії та збільшення дальності використовується технологія формування променя – динамічна формування радіопроменя для конкретного користувача. Базова станція запам'ятовує, звідки надійшов сигнал і коли (не тільки з вашого телефону, але і як відбитий про перешкоди), і використовує методи триангуляції для розрахунку приблизного розташування, а потім створює оптимальний шлях проходження сигналу. Однак необхідність відстежувати положення приймача призводить до

невеликих відмінностей для фіксованих та мобільних випадків використання, що відображається у різних випадках використання.

MIMO (Multiple Input Multiple Output). MIMO - метод просторового кодування сигналу, який дозволяє збільшити ширину смуги каналу, який вже застосовується в мережах Wi-Fi і 4G, значно покращився в 5G, особливо в розрахованому на багато користувачів MU-MIMO (Multi-User-MIMO) в 5G Базові станції gNB, антени яких складаються з матриці випромінюючих елементів. Це дозволяє підвищити рівень сигналу для конкретного користувача, мінімізуючи вплив сигналу інших користувачів.

Генерація променя з використанням антен MIMO вже давно не нова технологія і вже існує на ринку з такими осередками, як AAS (Active Antenna System). Встановлені на базовій станції антени AAS MIMO ділять зону покриття на комірки, рахунок цього збільшується ефективність використання діапазону, як і кількість каналів. Однак нинішні перевантажені мережі потребують динамічної генерації цифрових променів для ще більш ефективного використання спектра.

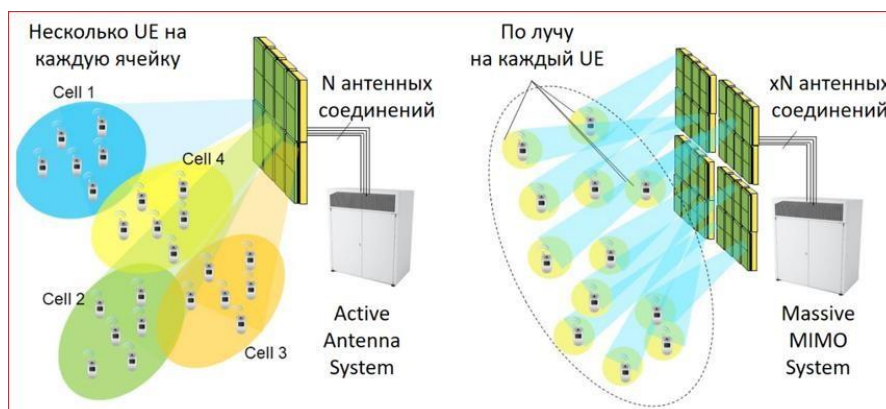


Рис.1.2. 2D MIMO антена (ліворуч) та Massive MIMO антена (праворуч)

Використання антен MIMO в міліметровому діапазоні FR2 стає більш актуальними, оскільки міліметрові радіохвилі мають гарну спрямованість завдяки збільшеній кількості антенних елементів на антену. Набір таких антенних елементів (256 або більше) може бути об'єднаний в масивну антену MIMO. Керуючи фазою

та амплітудою сигналів, така антена може динамічно створювати багато сильних та гострих променів у напрямках конкретних пристроїв.

Технології спільного використання спектру (Spectrum sharing). Багато розподілені спектри радіочастот часто не використовуються ефективно. Для вирішення цієї проблеми було розроблено технології спільного використання спектру.

Уніфікована міжчастотна взаємодія (Unified design across frequencies). Оскільки багато нових частотних діапазонів були додані до 5G NR, важливо забезпечити інтерфейс взаємодії при перемиканні каналів з однієї частоти на іншу при передачі між базовими станціями. У цьому нам допомагає технологія уніфікованої міжчастотної взаємодії.

Маленькі стільники (Small cells). Ущільнення покриття мережі призводить до збільшення кількості базових станцій. Тому було розроблено рішення для малих осередків - рішення, яке дешево, легко встановлюється та обслуговується за низького енергоспоживання базових станцій. Їх можна повісити на стовпи вуличного освітлення, стіни будинку та інші предмети. Мережа 5G здатна ефективно координувати свою роботу та перерозподіляти навантаження між антенами. У поєднанні з формуванням променя, маленькі осередки можуть забезпечити дуже швидке покриття з низькою затримкою. Малі стільники - включають безліч елементів - макро базові станції, метросоти, розподілені антенні системи для зовнішніх і внутрішніх мереж (або DAS), малі стільники і багато іншого - всі вони працюють разом у гетерогенній мережі.

5G працюватиме у більш високих частотних діапазонах, тому малі стільники матимуть вирішальне значення цих частотах, оскільки сигнали що неспроможні проникати крізь стіни чи будівлі, а розмір сот буде мати радіус охоплення менше 500 метрів. Протягом багатьох років на додаток до систем, що використовуються сьогодні для невеликих осередків, можуть виникати перешкоди у мережах 5G. У цьому випадку можна використовувати розподілену антенну систему (DAS) для «закриття» однієї або декількох багатоповерхових будівель базової станції.

Невеликі антени з радіоблоками можна встановити практично у будь-якій кімнаті, забезпечуючи найкращу якість зв'язку. Єдина інфраструктура базової станції та DAS можуть використовуватись кількома операторами зв'язку одночасно.

Технологія SRS (Sounding Reference Signal) є чудовим доповненням до формування променя. Завдяки їй базова станція може дізнаватися якість каналу через спеціальний пакет, відправлений від пристрою. Більшість пристроїв зазвичай підтримують передачу SRS тільки через свою основну антену, і базова станція може приймати інформацію каналу тільки для цієї антени. Але при використанні технології вибору передаючої антени можна отримати всю інформацію про канал всіх антен пристрою. Отже, базова станція може направляти промінь у напрямку UE у найкращому напрямку. В результаті швидкість передачі UE значно збільшується, а у віддалених та середніх місцях від базової станції збільшуватись до + 40%. [2]

Нарізка сітки або Network Slicing. Ця концепція дозволяє операторам розділити мережу на шари мережі. Кожен шар у своїй буде ізольований друг від друга. Це необхідно для того, щоб мережу 5G можна було будувати в залежності від ключових параметрів, необхідних для різних сценаріїв застосування. Але привести це в реалізацію можна лише при переході до нового покоління ядра мережі.

1.2.1 Наскрізна мобільна архітектура

Будь-яка нова наскрізна мобільна мережа, розгорнута сьогодні, повинна прийняти основні принципи архітектури системи 5G, навіть якщо вона використовує доступ LTE. Оператори повинні прийняти ключові принципи, які лежать в основі архітектури системи 5G.

Монолітна функціональна реалізація, така як базова приймальна станція (BTS), є прикладом того, чому поточний ланцюг постачань мобільного зв'язку застарів.

З цією реалізацією оператори повинні вибрати одного постачальника на кожен ринок і гармонізувати ринки макростачальників до набору функцій «найменшого спільного знаменника». Результатом є обмежений набір додатків, які оператори можуть надати своїм клієнтам. Іноді залежності від постачальників і блокування можуть поширюватися на інші домени, коли власні функції реалізовано. Наприклад, об'єкти керування мобільністю (MME) часто реалізуються з постачальником RAN, а невеликі комірок часто підключаються до макросів RAN за допомогою таких функцій, як HetNet

Нова хмарна архітектура RAN вирішує, серед іншого, проблеми побудови мультипостачальних мереж та гармонізації із загальним набором функцій. Однією з основних характеристик є декомпозиція стека обробки радіосигналів за допомогою стандартизованих розщеплень

Стек обробки радіосигналів як в 5G NR, так і в LTE є «ланцюжком послуг» функцій, які обробляються послідовно. Цими функціями керують за допомогою сигналізації, отриманої від пакетного ядра, зокрема MME в розвиненому ядрі пакетів (EPC), і функції управління доступом і мобільністю (AMF) в 5GC.

Cloud RAN. Щоб допомогти оператору отримати вигоду від підходу багатьох постачальників, необхідно, щоб програмна реалізація функцій RAN була розбита з апаратного забезпечення. Функції CU для розгортання хмарної RAN можна створити на сервері Intel x86 масового виробництва.

Функції віртуалізовані на програмній платформі віртуалізації мережевих функцій оператора (NFV). Функції DU, засновані на наявності типу транспорту, можуть бути віртуалізовані на аналогічній платформі NFV або можуть бути реалізовані як мережева функція на сервері Intel x86 поблизу стільникового сайту.

Кластер віддалених радіоблоків (RRU) може бути об'єднаний в DU. У свою чергу, кілька DU можуть бути об'єднані в CU. Архітектура рішення дозволяє оператор масштабує свою мережу в міру збільшення кількості стільників, шарів MIMO, частот і ємності користувача. У випадку, коли і функції DU, і CU віртуалізовані, масштабування може спричинити створення екземплярів більше віртуалізованих функцій CU (vCU) або віртуалізованих DU (vDU) як функцій

віртуальної мережі (VNF) на платформі NFV або це може спричинити розширення можливостей обробки існуючого VNF.

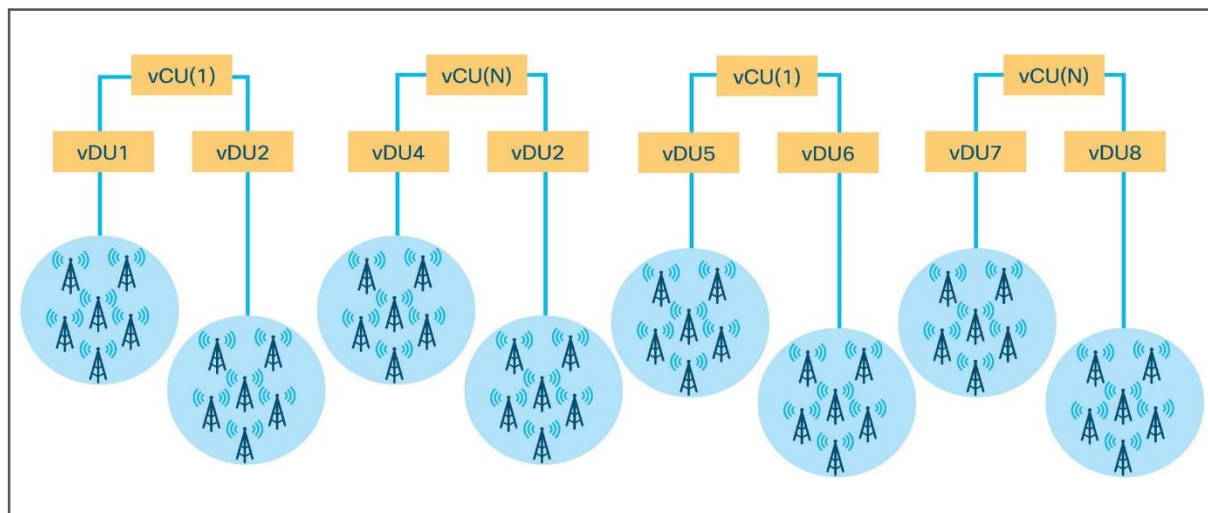


Рис. 1.3. Масштабування мережі Cloud RAN

Дезагрегація апаратного забезпечення основної смуги частот від програмного забезпечення забезпечує гнучкість. Оператори можуть вибрати для розгортання найкращі в своєму роді рішення з точки зору RRU, апаратного та програмного забезпечення основної смуги частот. Побудова хмарної архітектури RAN має багато переваг, оскільки вона кардинально змінює спосіб закупівлі, створення та експлуатації мереж. Ось деякі з переваг:

Ефективність роботи та скорочення руху вантажівок до осередку за рахунок надання, введення в експлуатацію та керування послугами лише за допомогою програмного забезпечення:

- Гнучкість, швидкість інновацій та прискорений час монетизації послуг, одночасно знижуючи вартість на одного користувача та вартість одиниці продуктивності;
- Ефективне розділення мережевих функцій і ресурсів для підтримки випадків використання 5G, таких як покращений мобільний широкопasmовий зв'язок, наднадійна низька затримка (URLLC) і Інтернет речей (IoT), за допомогою

таких технологій, як програмно-визначені мережі, граничні обчислення, ланцюжок функцій служби та оркестровка послуг;

- Попереднє надання ресурсів основної смуги частот у хмарній мережі RAN не потрібно для максимальної ємності сайту. Ураховуючи прибуток від об'єднання, ресурси базової смуги надаються для профілю трафіку всієї мережі. Ці профілі трафіку можна збільшувати або зменшувати під час використання в години пік або у випадку інтенсивного трафіку;

- Масштабування для швидкої та економічно ефективною адаптації до різних мережевих топологій і випадків використання;

- Підвищена доступність і надійність мережі, вже вбудовані в технології NFV, такі як OpenStack, менеджер віртуальної інфраструктури та оркестратор послуг;

- Дезагрегація апаратного забезпечення від програмного забезпечення з використанням готового в продажі апаратного забезпечення з високою щільністю обробки та відкритих інтерфейсів;

- Увімкнення просунутих алгоритмів, таких як кооперативне багатоточкове та міжсайтове об'єднання несучих.

Сьогодні RMN розгортає архітектуру системи 5G з віртуалізації/NFV, vRAN, SDN, автоматизацією ядра пакетів CUPS, граничні обчислення, розділення, масштабування та ємність, які притаманні архітектурі RMN. Ця архітектура створює основу, яка дозволяє легко додавати можливості 5G за допомогою оновлення програмного забезпечення, що може скоротити час виходу на ринок.

1.3. Інноваційні технології та переваги мережі 5G в різних технологічних областях

5G зробить наші смартфони набагато розумнішими з більш швидкими та рівномірними швидкостями передачі даних, меншою затримкою та ціною за біт, а це, в свою чергу, призведе до загального прийняття нових іммерсивних технологій, таких як Virtual Reality та Augmented Reality.

5G матиме зручність ультранадійних, низьких затримок зв'язків, які дозволять галузям інвестувати більше проектів, які потребують віддаленого управління критичною інфраструктурою в різних галузях, таких як медицина, авіація тощо.

Augmented Reality and Virtual Reality.

Хоча деякі останні технології, пов'язані з віртуальною реальністю та розширеною реальністю, дійшли до Непалу, розвиток мережі п'ятого покоління може радикально застосувати поле в тенації. Віртуальна реальність (VR) та розширена реальність (AR), які перебувають у стадії свого розвитку, будуть недотично змінювати підключення четвертого покоління. Такі покращені AR та VR не лише покращать захоплюючі засоби розваги, але й забезпечать неймовірну якість відеоконференцій, дозволяючи передавати 4K та 8K відео.

Device to Device.

D2D – комунікація спрямована на підвищення продуктивності звичайних стільникових мереж (з точки зору показників, таких як споживання енергії, ефективність спектру, пропускна здатність тощо), використовуючи безпосередню взаємодію між пристроями, що знаходяться в безпосередній близькості. У літературі досліджено декілька рішень, надано різні класифікації.[2]

Це може бути або ліцензований стільниковий спектр, наприклад, для стільникового зв'язку (тобто, вхідний зв'язок), або неліцензовані смуги, такі як Wi-Fi. Рішення вхідної смуги може бути додатково класифіковано в режимі підкладеного вхідного діапазону D2D та режимі накладання в діапазон D2D. У першому D2D та стільниковий зв'язок поділяють один і той же ліцензований стільниковий спектр; в такому випадку головним питанням є пом'якшення втручання між D2D та стільниковим зв'язком. В останньому частина стільникових ресурсів присвячена комунікаціям D2D для уникнення проблем з перешкодами; у цьому випадку розподіл ресурсів стає ключовим питанням, щоб уникнути витрачання дорогоцінних ресурсів спектру. Рішення позашляховика спрямоване на

усунення перешкод між D2D та стільниковою ланкою, але потребує додаткових інтерфейсів, таких як Wi-Fi Direct або Bluetooth. Тому йому потрібно координувати зв'язок у двох різних діапазонах радіочастотного спектру (наприклад, коли задіяні стільниковий та Wi-Fi Direct радіоінтерфейс).[1]

Координація між радіоінтерфейсами контролюється або BS/AP, тобто керованим режимом або ж користувачем, тобто автономним режимом на рис. 1.4.

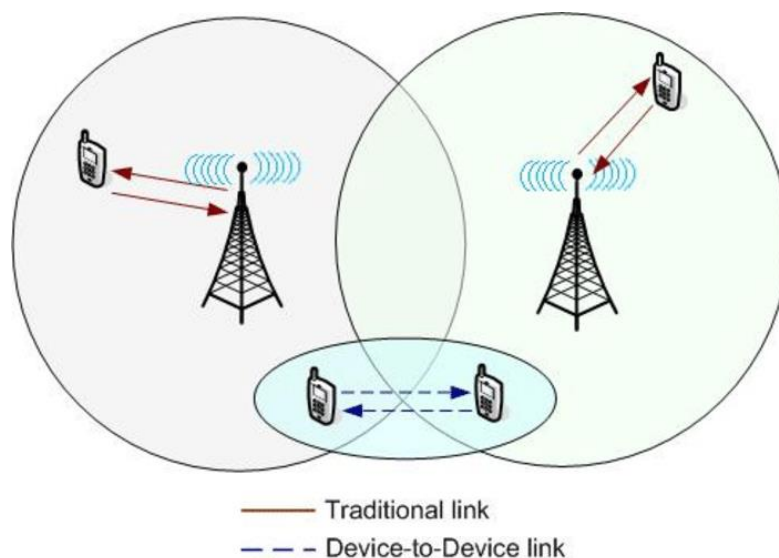


Рис. 1.4. Встановлення D2D зв'язку

Отже, дослідження щодо вихлопного типу D2D передбачають як аспекти споживання енергії, так і міжетехнологічне архітектурне проектування.

Функції D2D, що сприятимуть майбутньому розвитку 5G IoT:

1. Висока швидкість передачі даних/низька затримка. Комунікації короткого діапазону, як правило, характеризуються більш високою пропускнуою здатністю, меншою затримкою та споживанням енергії в порівнянні з комунікаціями на великій відстані. Це призводить до величезного збільшення спектральної ефективності. Аналогічно, більша швидкість передачі даних по посиланнях D2D використовується для розповсюдження мультимедійного вмісту, а також для багатоадресної відеозйомки в соціальній мережі.

2. Комунікація з низьким споживанням енергії. D2D-комунікації гарантують менше споживання енергії. До класичних способів передачі, коли

пристрої передають інформацію BS/AP. Ця особливість робить зв'язок D2D дуже привабливим з огляду на задоволення вимог енергоефективності IoT. Менше споживання енергії є прямим наслідком нижчої потужності передачі, необхідної при з'єднанні на ближньому відстані з сусідніми пристроями

1.4. Використання та безпека мережі 5G

Домашній інтернет Бездротові мережі 5G стануть альтернативою дротовому інтернету в наших квартирах. Якщо раніше кабель заходили у квартиру, то в майбутньому – сигнал передаватиметься від вежі 5G до роутера, який роздаватиме його, як звичайний домашній WiFi. Типовий маршрутизатор 5G забезпечує швидкість завантаження 2-3 Гбіт/с. Так оператори вирішують проблему «останньої милі» та знизять вартість прокладки кабелів.

Місця масового скупчення людей. Одним із основних недоліків використання стільникового зв'язку попередніх поколінь є проблематичне використання мережі в місцях, де багато людей, мережа стає перевантаженою. Але 5G може допомогти вирішити цю проблему, тому ця технологія є важливою для таких сценаріїв. Samsung разом із японським оператором зв'язку KDDI провели тестування з використанням 5G на 30-тисячному стадіоні. Використовуючи тестові планшети 5G, вони змогли одночасно транслювати відео 4K на кілька планшетів.

Транспорт. З'явилася ідея обладнати залізницю 5G з'єднанням для розваг та комфорту пасажирів. Дослідження показало, що для досягнення високошвидкісного безшовного зв'язку необхідно обладнати залізницю точками доступу на відстані 800 метрів одна від одної. Випробування були успішно проведені поїздом під Токіо - вони проводилися компанією Samsung, разом із оператором зв'язку KDDI. Під час тестів була досягнута швидкість 1,7 Гбіт/с, під час тесту було завантажено 8K- та 4K-відео.

Connected car. Основною перевагою є низька затримка, яка дозволяє транспортним засобам зв'язуватися один з одним на швидкості до 500 км/год. На відміну від людей-водіїв автомобілі можуть нарешті домовлятися про маневри

один з одним або з фіксованою інфраструктурою, що підвищує безпеку дорожнього руху. Система також враховуватиме погодні умови. Основними завданнями при використанні підключеного автомобіля є всебічна безпека дорожнього руху та ефективність водіння. На безпеку також можуть розраховувати велосипедисти та пішоходи зі смартфонами 5G. Сервіс заснований на принципі роботи під контролем вбудованого в автомобіль потужного штучного інтелекту. Автомобіль приймає ситуаційне рішення на основі візуальної інформації та радіолокаційних даних (Waymo).

Sky Office. На ранніх етапах комерційного розгортання 5G, крім смартфонів, ключовим продуктом 5G, як очікується, буде ноутбук, підключений до Sky Office. Sky Office – це концепція передачі обчислювальної потужності ноутбука у хмару, коли ноутбук оснащений вбудованим модемом 5G. У хмарне сховище можуть бути поміщені не тільки файли користувача (Cloud Drive), але і такі програми, як MS Office 365 (Cloud Office) або ігрові програмні продукти (Cloud Games). У цій концепції ноутбук просто стає екраном із клавіатурою та камерою.

Як і 4G LTE, 5G також базується на OFDM (ортогональне мультиплексування з частотним поділом) і працюватиме за тими самими принципами мобільних мереж. Однак новий 5G NR (Нове радіо) повітряний інтерфейс ще більше покращить OFDM, щоб забезпечити набагато вищий ступінь гнучкості та масштабованості.

5G не тільки забезпечить швидші та кращі послуги мобільного широкопasmового доступу в порівнянні з 4G LTE, але й розширить доступ до нових сфер обслуговування, таких як критично важливі комунікації та підключення до масового Інтернету речей. Це забезпечується багатьма новими методами проектування повітряного інтерфейсу 5G NR, такими як нова автономна конструкція підрамника TDD.

Технологія 5G запровадить досягнення в архітектурі мережі. 5G New Radio, глобальний стандарт для більш потужного бездротового інтерфейсу 5G, охоплюватиме спектри, які не використовуються в 4G. Нові антени будуть включати технологію, відому як масивний MIMO (кілька входів, кілька виходів),

що дозволить кільком передавачам і приймачам передавати більше даних одночасно. Але технологія 5G не обмежується новим радіочастотним спектром. Він розроблений для підтримки конвергентної, неоднорідної мережі, що поєднує ліцензовані та неліцензійні бездротові технології. Це збільшить пропускну здатність, доступну для користувачів.

5G також покращує цифровий досвід завдяки автоматизації, що підтримує машинне навчання (ML). Попит на час відгуку протягом частки секунди (наприклад, для автомобілів, що керують автомобілем самостійно) вимагає від мереж 5G забезпечити автоматизацію ML і, врешті-решт, глибоке навчання та штучний інтелект (AI). Автоматизоване надання та проактивне керування трафіком та послугами знизять вартість інфраструктури та покращать підключення

Безпека мережі 5G. У зв'язку із розширеною кількістю загроз і нових технологій, що забезпечує користувачам альтернативне програмувати своїх власних пристроїв (навіть на рівні радіодоступу), захист від атак на радіо мережі повинен бути більш чітко вираженим в новій архітектурі мереж 5G, що має враховувати захист від загроз таких як DoS (відмова в обслуговуванні) через потенційно некоректно працюючі пристрої і додаючи заходів з пом'якшення наслідків нового дизайну радіопротоколу.

Хоча радіомережі LTE мають відмінний захист від криптографічного підслуховування, немає ніякого захисту проти зміни або ін'єкцій трафіку в площині абонента. Тому в 5G цей напрям досліджень також заслуговує значної уваги, особливо зважаючи на важливі можливі застосування 5G.

Гнучка і масштабована архітектура безпеки. У зв'язку із можливістю віртуалізації і більш динамічної конфігурацій, що входять до бачення 5G, здається логічним, розглянути більш динамічну і гнучку архітектуру безпеки для неї. Безпека для синхронних аспектів, таких, як сигналізація RAN, може бути розташована поряд з доступом з високим ступенем незалежності від асинхронних аспектів безпеки, таких як ті, що пов'язані з користувацькою площиною. Це дозволить більш ефективно забезпечення безпеки, а також обмежить загрози для чутливої користувацької інформації в той же час. Нові проекти безпеки з високим

рівнем гнучкості можуть також краще слугувати для вирішення непотрібних конфліктів між зручністю і безпекою.

Супутниковий зв'язок 5G - безпосередньо з неба до пристрою – незабаром стане реальністю.

Справді, нове покоління супутників забезпечить вбудовані можливості 5G для забезпечення повного покриття Землі 5G на додаток до наземних мобільних мереж 5G.

Зокрема, з космічними системами 5G запропонує вищу доступність, надійність і стійкість, а також можливості мовлення та багатомовлення.

Очікується, що 5G підтримуватиме широкий спектр додатків (наприклад, сільське господарство, логістика, громадська безпека), щоб усі у світі могли бути підключені.

2. ТЕХНОЛОГІЇ MASSIVE MIMO У СТАНДАРТИЗАЦІЇ 5G

Однією з найбільших речей нашої ери є те, що 5G допомагає реалізувати інтелектуальний Інтернет всього (ІоЕ), внесення великих змін до життя людей, багатьох вертикальних галузей і всього суспільства, створюючи світ а краще підключений і цифровий. Масивний MIMO, як одна з основних технологій 5G, є ключем до досягнення високого рівня вимоги до продуктивності та нові вимоги до обслуговування цієї дивовижної нової ери.

Незважаючи на те, що Massive MIMO дійсно пропонує великі перспективи для високопродуктивного 5G з ширшою пропускнуою здатністю, більшою кількістю з'єднань, менша затримка та краща надійність, реалізація її повного потенціалу вимагає ефективних відповідей на виклики покриття мережі, користувацький досвід і можливості мережі, що актуально для всіх операторів мобільних мереж і постачальників систем.

Після впровадження технології Massive MIMO, диференціація та гнучкість покриття бездротової мережі у тривимірному просторі були значно покращені. Модель поширення радіохвилі, поведінка користувача та розподіл послуг, керування променями та формування променів є більш складними, гнучкими і важко піддаються вимірюванню. Розташування проблем у бездротових мережах, ефективність рішень реагування, а також ефективність і вплив нових функцій ускладнюється в міру збільшення масштабу мережі. Як ефективно передбачити, знайти, і заздалегідь оцінити оптимальне рішення до того, як складна реальна мережа зіткнеться з проблемами?

Хоча Massive MIMO забезпечує 5G із набагато більшою різноманітністю та гнучкістю доступності та можливостей мережі в тривимірний простір, складність мережі викликає питання у визначенні мережевих проблем, пропонування ефективні рішення та максимізація переваг нових технологій, не сплачуючи занадто високої ціни. Як чи можемо ми передбачити, які проблеми мережі виникнуть за яких обставин, і знайти оптимальний варіант рішення та оцінити їх,

перш ніж проблеми справді виникнуть? У цій білій книзі буде розглянуто всі ці проблеми з деякими аналізами та пропозиціями.

Оскільки концепція Massive MIMO була представлена кілька років тому, вона з кожним роком набирала нових висот. Це стало однією з найгарячіших тем для досліджень у спільноті бездротового зв'язку завдяки його величезним перевагам у стандартизації 5G.

Нинішні системи MIMO не змогли впоратися з масовим припливом бездротового трафіку даних. З впровадженням таких концепцій, як IoT, комунікація між машинами, віртуальна реальність і доповнена реальність, поточна система не може забезпечити необхідну спектральну ефективність. Недавні експерименти в масивній системі MIMO довели свою цінність, показавши рекордну спектральну ефективність.

Дослідження, проведене Лундським університетом разом з Брістольським університетом у 2015 році досягли спектральної ефективності 145,6 біт/с/Гц для 22 користувачів, кожен з яких модулюється 256-квадратурною амплітудною модуляцією (256-QAM), на спільному радіоканалі 20 МГц на частоті 3,51 ГГц із 128 антенами на базовій станції. [2]

Ефективна робота масивних систем MIMO була підтверджена в різних середовищах, як усередині, так і на вулиці. Також було доведено, що масивна система MIMO забезпечує надійну роботу з низькою складністю радіочастотної та основної смуги частот. Апаратна реалізація масивної системи MIMO також була успішно протестована, і було доведено, що ці системи можуть бути побудовані з дуже низькою складністю і недорогим обладнанням як для цифрових базових, так і для аналогових радіочастотних ланцюгів. Крім того, багато алгоритмів попереднього кодування, виявлення, планування та вирівнювання були розроблені для подальшого зниження вартості та потужності. Усі ці нові інновації та розробки в масиві MIMO сприяють привабливому розгортанню цієї технології, необхідної для бездротових мереж 5G і за його межами. [3]

Масовий MIMO вже впроваджено в Китаї та Японії в контексті 4G LTE. SoftBank Group Corp. в Японії розгорнула величезний MIMO у своїй мережі в 2016

році. У 2017 році Vodafone і Huawei разом провели реальний експеримент з тестування систем Massive MIMO і досягли швидкості 717 Мбіт/с. У 2018 році Nokia випустила легкий і енергоефективний чіпсет для масивної конструкції антени MIMO, і він отримав назву чіпсет ReefShark. Цей чіпсет міг би зменшити величезний розмір антени MIMO до половини, і він розглядався як одна з перспективних технологій для розгортання Massive MIMO. Samsung також продемонстрував, що масивний MIMO може забезпечити одночасну високошвидкісну потокову відеотрансляцію без затримок у людних місцях, експериментуючи на переповненому стадіоні в Південній Кореї. У січні 2019 року Sprint Mobile здійснив перший у світі дзвінок даних 5G 2,5 ГГц і масивний MIMO на новій комерційній мережі 3GPP 5G

Теоретично, системи Massive MIMO можуть мати нескінченну кількість антен на базовій станції. Але зазвичай від 64 до 128 використовуються практично в масивних базових станціях MIMO. Нещодавно Sprint Network співпрацюючи з такими компаніями, як лідери Ericsson, Nokia та Samsung Electronics, розгорнули 128 антен масивних систем MIMO (64 антени для прийому сигналу та 64 антени для передати сигнал). Однією з визначних переваг масивного MIMO є те, що нам потрібно лише складне обладнання на базовій станції, тоді як UE може мати одну антену та просту конструкцію антени. Таким чином, для масивного MIMO більша кількість антени потрібна лише на базовій станції, але не в UE. Сучасні смартфони мають від 2 до 4 антен. Сучасні смартфони мають від 2 до 4 антен, але для масивного MIMO достатньо мати лише одну антену на UE.

2.1 Massive MIMO як основна технологія 5-го покоління мобільного зв'язку

Очікується, що BS з великими антенними решітками зіграють ключ роль у подоланні зростаючого трафіку в майбутніх бездротових мережах мережі. Дійсно, вони обіцяють велику спектральну ефективність підвищується, а при використанні в поєднанні з дрібними клітинами і нові діапазони частот, вони можуть забезпечити значний наскрізний приріст на одиницю площі, необхідний для задоволення зростаючого трафіку вимоги

Технології MIMO використовують наявність кількох антен на кожній BS та/або UT, щоб забезпечити значний приріст спектральної ефективності. У контексті передачі єдиного потоку MIMO дає змогу отримати вигоду у формуванні променя за допомогою відповідної просторової фільтрації на передавачі (попереднє кодування) та/або приймач. Ці коефіцієнти формування променя можна збільшити з більшою кількістю антенних елементів, що призводить до підвищення ефективного співвідношення сигнал/завада плюс шум (SINR), і, в свою чергу, вища спектральна ефективність.

MIMO може забезпечити посилення мультиплексування. Враховуючи, за наприклад, низхідна лінія зв'язку (DL) стільникової системи, BS з кілька антен можуть надсилати кілька потоків одночасно до кількох (одних або кількома антенних) UT через MU-MIMO, а таким чином, щоб кожна UT «бачила» та декодувала лише потрібні потоки.

Масовий MIMO доводить ці атрибути до крайності.

Зв'язок багатьох високошвидкісних потоків (багато більше ніж у звичайних системах) можна досягти за допомогою важеля великомасштабних антенних решіток на БС, за рахунок чого кількість антенних елементів на БС потенційно набагато більше ніж загальна кількість антен на UT. Дійсно, як описано далі в цьому опитуванні, встановлення додаткових тенен на кожному місці не тягне жодних додаткових витрат з бажаними режимами отримання CSI. В результаті, використання великих антенних решіток може призвести до дуже великого підсилення формування променя на кожному приймачі для потрібного потоку водночас він ефективно пригнічує перешкоди від всі інші передані потоки.

На додаток до значних покращень продуктивності, які обіцяє масивний MIMO по відношенню до звичайного MIMO, існує також ряд додаткових властивостей, які є унікальними для масивного MIMO. Деякі з цих властивостей, які пропонує масова MIMO, виділені в документі та включають наступне:

- Велика спектральна ефективність: масивний MIMO може одночасно створювати кілька дуже різких променів. Як результат, багато високошвидкісних потоків можна мультиплексувати ті самі ресурси передачі;
- Майже оптимальна продуктивність з простими трансиверами: Великі масиви дозволяють досягти навіть хорошої продуктивності з елементарною технологією попереднього кодування, як-от сполучене формування променів, яка ігнорує багатокористувацькі втручання при проектуванні користувацьких променів;
- Набагато екологічніша технологія: величезний набір дозволяє створення гострих променів, що спрямовують випромінювані живлення до потрібного UT. В результаті випромінюється потужність за доставлений біт може бути значно знижено;
- Простіший гібридний ARQ і планування: незважаючи на те що канал кожного користувача змінюється відповідно до часу когерентності та пропускної здатності його каналу, швидкість, яка може бути доставленим користувачеві можна точно передбачити а апріорі, не знаючи каналу малого масштабу завмирання.
- Значно покращена продуктивність граничних користувачів: while бажаний сигнал на межі клітини приймача збирає а «масовий MIMO» посилення формування променя, перешкоди сигнали, що надходять від сусідніх БС, не мають а посилення формування променя. В результаті масивний MIMO може пропонують високі коефіцієнти SINR для користувачів на межі стільникового зв'язку, що різко контрастує до звичайних систем MIMO, де користувачі на межі стільникового зв'язку відчують низький SINR;
- Гнучка розвантаження та балансування навантаження: завдяки той факт, що велике посилення формування променя відчувається лише бажаним

сигналом, мережа може служити граничний користувач із достатньо високим SINR з будь-якого поблизу BS. Це забезпечує додаткову гнучкість у балансуванні навантаження трафіку по мережі і може забезпечити велике покращення користувацького досвіду.

CSI необхідний на BS передавач (CSIT) щодо каналів між UT і масивний масив на БС, щоб увімкнути БС створювати гострі промені в напрямку УЦ, і досяг посилення формування променя та мультиплексування. Придбання CSI Механізм є важливою частиною масивного MIMO як Компроміси накладні витрати на отримання CSI/якість CSI безпосередньо впливають на ефективну масову продуктивність MIMO.

Масивний MIMO спочатку був представлений як технологія макроелементів шляхом навчання в UL, чи то для UL або передачі DL. Справді, як стверджується, використання масового розгортання макрокомірки MIMO з повторним використанням 7 і рудиментарними прекодерами та планувальниками може в принципі призвести до 10-кратного підвищення продуктивності системи. навіть щодо найсучаснішого (на той час) LTE при наявності рухливості.

Операція DL на основі UL навчання використовує взаємність радіоканалу, тобто факт що радіоканали UL і DL між будь-якою парою елементи антени фактично однакові, коли обидва канали вимірюються в межах часу когерентності та смуги когерентності каналу. Отже, масивний MIMO на основі навчання UL природно підходить для систем TDD. Навчання в UL, для даних UL або DL трансмісії, було визнано кращим методом навчання-накладного каналу збору, як єдиний пілот з антени UT дозволяє навчати необмежену кількість антен інфраструктури поблизу.

Багато робіт з того часу використали цю операцію для просторового мультиплексування великих кількості користувачів на один і той же час і частотні ресурси і забезпечують дуже велику сукупну спектральну ефективність низькі накладні витрати. Розділ 2.1 представлений огляд масивних схем MIMO з отриманням каналу на основі пілотного сигналу UL.

Масовий MIMO також розглядався в контексті розгорнутих систем збору каналів в LTE на основі FDD, які покладаються на навчання DL та UL зворотній зв'язок. У розділі 2.2 представлений огляд DL MIMO схеми на основі навчання DL та зворотного зв'язку UL, які є спеціально налаштований на масивний MIMO. Інші аспекти, включаючи роботу над OFDM та практичну реалізацію міркування коротко розглянуті в розд. 2.3

З моменту введення масивної MIMO, багато роботи було зосереджені на розгортаннях, пов'язаних із мас макромірками MIMO. Частково це пов'язано з форм-фактором, необхідним для розгортання масивних масивів на частотах порядку 2 ГГц.

2.2. Розгортання малих стільників із застосуванням макросів із спрямованою антенною решіткою

Масове розгортання MIMO в малих осередках є перспективним для збільшення пропускної здатності даних на одиницю площі шляхом комбінування висока щільність мережі та велика спектральна ефективність. Як показано на рис 2.1 розглядається архітектура малих осередків із підтримкою макросів (також відома як фантомна комірка), де макро BS використовує нижчі діапазони частот, щоб забезпечити безперебійну роботу покриття, а маленькі осередки використовують вищі частотні смуги щоб збільшити пропускну здатність даних.

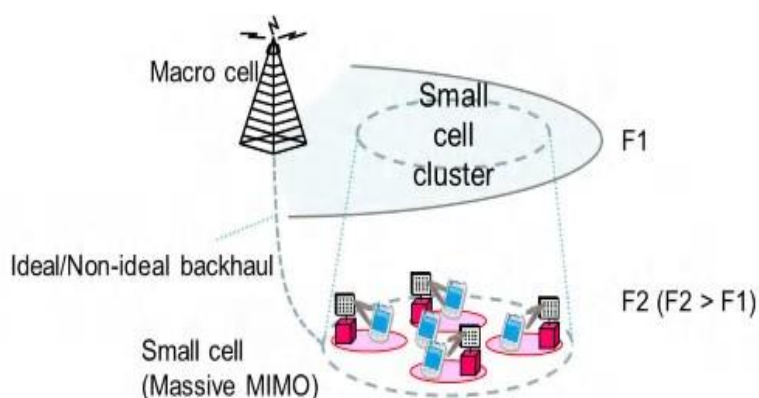


Рис. 2.1. Масивний MIMO в невеликих комірках із підтримкою макросів

Була визначена кластеризована модель розгортання малих осередків в 3GPP де мала комірка BS з 2D AAS буде розміщувати на краю невеликих осередків, з огляду на антенну решітку, спрямована на центр маленької комірки, як показано на малюнку на рис 2.2 з спрямованою антенною решіткою, а також з вузький промінь, створений масивним MIMO, сигнали, що випромінюються обслуговуючою БС, можуть передаватися на призначену користувачам ефективніше зі зменшеним впливом поза клітиною порівняно з розгортанням малих сот із всеспрямованою антеною, що забезпечує переваги ущільнення

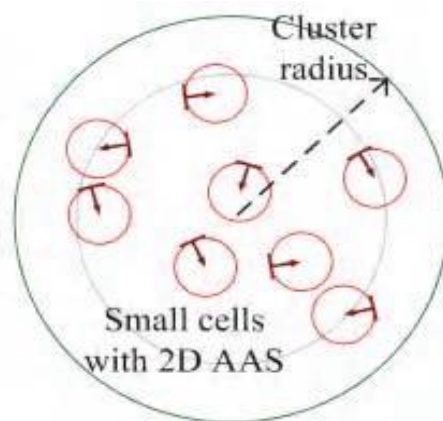


Рис. 2.2. Кластерне розгортання малих осередків із 2D AAS

Щоб проілюструвати приріст продуктивності, який може запропонувати масивний MIMO та ущільнення малих осередків, ми оцінюємо пропускну здатність мережі в Синдзюку, невеликій зоні гарячої точки розміром 120 м × 150 м у Токіо, на основі даних каналу трасування променів. Хоча читач може прочитати повний текст статті в ми коротко підсумуємо деякі спостереження в цьому розділі.

На малюнку 2.3 показана карта досліджуваного нами району Синдзюку з точками, що представляють BS. Зокрема, кожен набір часто забарвлених точок відповідає конкретному розгортанню, що включає фіксовану (і в кожному випадку різну) кількість BS, кількість яких коливається від 3 BS до 12 BS з малими комірками. У нашому моделюванні ми припускаємо, що частота несучої становить 3,5 ГГц, а доступний діапазон - ширина 20 МГц.

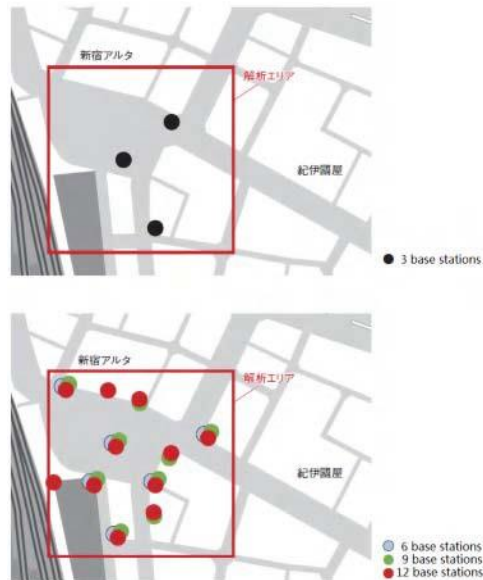


Рис. 2.3. Розгортання BS в Синдзюку, Токіо

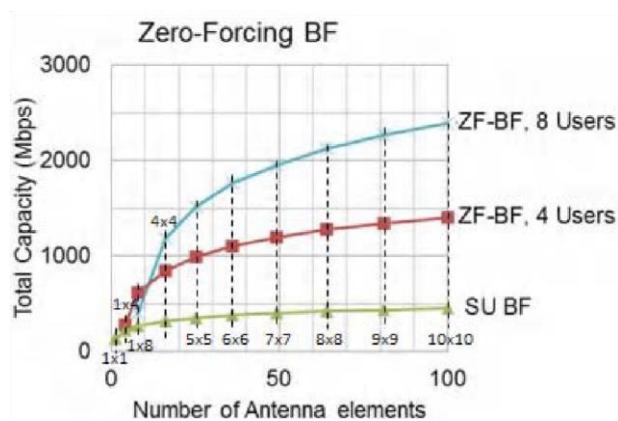


Рис.2.4. Пропускна здатність мережі за допомогою ZFBF на BS щодо кількості антен на кожній BS

Припускаючи, що 6 BS увімкнено, рис.5 показує всю продуктивність мережі щодо кількості антен, обладнаних на кожній BS для трьох схем. Зокрема, зелена крива представляє продуктивність однокористувацького формування променя на кожній BS, де BS обслуговує лише одного користувача щоразу. Зверніть увагу, що у випадку, коли кількість антен дорівнює 1, цей режим передачі зменшується до передачі SISO «точка-точка».

Червона та синя криві представляють продуктивність MU-MIMO, де кожна BS обслуговує 4 та 8 користувачів відповідно через ZFBF та рівномірне

розподілення потужності на потік. Кожна UT пов'язана з BS, з якої він має найвищу силу отриманого сигналу.

Кожна BS обслуговує своїх користувачів за допомогою кругової системи планування. Легко помітити, що пропускна здатність істотно збільшується, коли кількість антен зростає, а посилення пропускної здатності стає ще більшим, коли вбудована MU-MIMO.

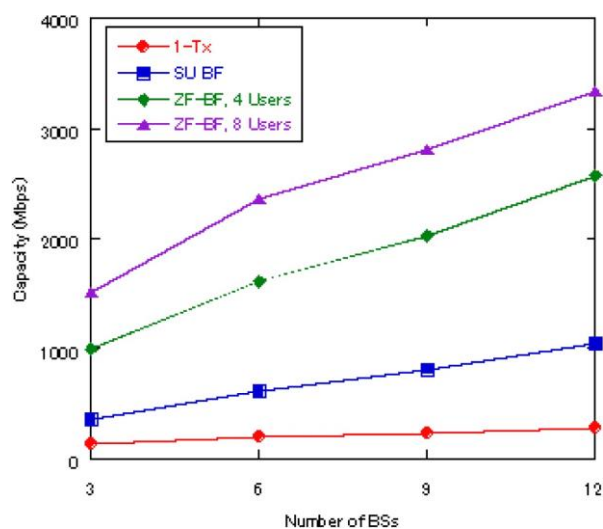


Рис. 2.5. Пропускна здатність мережі за допомогою ZFBF на BS щодо кількості BS у мережі

Так, коли кожна BS оснащена 25 антенами, але кількість BS зростає з 3, 6, 9 до 12, тобто відбувається процес ущільнення невеликих осередків. Зокрема, червона крива всюди представляє випадок однієї антени; синя крива позначає випадок однокористувацького формування променя; а інші дві криві представляють схему MU-MIMO ZFBF, де кожна BS щоразу обслуговує 4 та 8 користувачів відповідно. Спостереження на рис.6 показує, що, окрім підвищення продуктивності, що забезпечує масивний MIMO, процес ущільнення малих осередків також дає помітне збільшення пропускної здатності.

Масивні малі комірки MIMO обіцяють високу спектральну ефективність на одиницю площі і, природно, є одним з найбільш перспективних застосувань масивного MIMO. Оскільки пропускна здатність, як очікується, стане доступною на все більших і вищих несучих частотах, стане все більш можливим реалізувати

масивний MIMO у відносно невеликих БС і в межах розумного форм-фактора. На частоті 3,5 ГГц реалізація БС з малими елементами, яка використовує, наприклад, антенний патч $20 \text{ см} \times 20 \text{ см}$, зможе підтримувати лише близько 25 елементів антени, розташованих на половині довжини хвилі (близько 4,3 см). На відміну від цього, на частоті 30 ГГц, де довжина півхвилі становить 5 мм, загалом можна підтримувати 1600 антен в межах одного антенного патча розміром $20 \text{ см} \times 20 \text{ см}$.

Оскільки пропускна здатність на більш високих частотах стає доступною, це дозволить збільшити вигрощ у формуванні променя, що забезпечується БС з малими стільниками, таким чином дозволяючи стільниковим операціям забезпечити «дуже щільні» операції масивного типу MIMO та переваги.

Однак робота на більш високих частотах супроводжується додатковими проблемами, такими як загасання втрат на траєкторії, яке добре відомо з квадратом довжини хвилі. Насправді, багато інших проблем виникає при розгортанні масивних невеликих осередків MIMO на більш високих частотах.

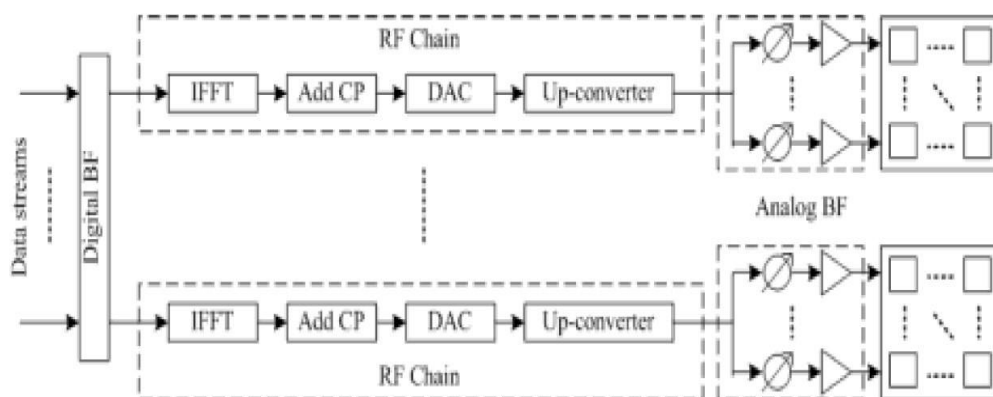


Рис. 2.6. Гібридна структура формування променя

Масивний MIMO є привабливим для високочастотних діапазонів, де набагато більше антенних елементів може бути розміщено в компактній решітці, а велике посилення формування променя, яке забезпечує масивний MIMO, може ефективно компенсувати серйозні втрати на шляху в діапазонах високих частот. Хоча структура повної цифрової решітки може максимізувати гнучкість формування променя, її вартість може бути занадто високою через один окремий

радіочастотний ланцюг для кожного елемента антени. Крім того, недоцільно розміщувати таку кількість радіочастотних ланцюгів за компактним масивом.

Гібридне формування променя забезпечує можливе рішення для масового розгортання MIMO у високочастотних діапазонах, де антенна решітка включає в себе кілька аналогових підрешіток, і кожен підмасив, що складається з кількох антенних елементів, підключений до одного РЧ-ланцюга, як показано на рис.... При гібридному формуванні променя напрямок променя спільно керується аналоговим формуванням променя на передньому кінці РЧ і цифровим формуванням променя в основній смузі.

Однак, як для повного цифрового формування променя, так і для гібридного, загальні канали та сигнали не можуть отримати вигоду від користувацького підсилення формування променя. Тому ретельний дизайн цих каналів і сигналів є важливим для забезпечення покриття.

2.3 Проблеми Massive MIMO в 5G розгортання мережі

Після визначення компонування та розгортання мережі, іншою проблемою для обмеження продуктивності мережі є те, як боротися з перешкодами, оскільки більшість UT, особливо UT на краю стільника, не обмежені по шуму, а обмежені перешкодами. Один підхід до пом'якшення перешкод називається кооперативною багатоточковою передачею (CoMP), коли невелика кількість BS спочатку обмінюється даними, призначеними для користувача, за допомогою зворотного зв'язку та обмінюється CSI, а потім вони одночасно передають ті самі дані цьому користувачеві за допомогою попереднього кодування над тими BS. Оскільки всі ці BS утворюють нову віртуальну BS з усіма їх антенними елементами, які фактично розташовані разом, CoMP, по суті, є типом централізованого MIMO за ціною обміну даними користувача та всіх CSI, що використовуються для попереднього кодування.

На відміну від централізованого MIMO, інший підхід до пом'якшення перешкод називається розподіленим MIMO. Ми розробили дуже просту схему, за якою невелика кількість BS спочатку обмінюється лише даними, призначеними для користувача за допомогою зворотного зв'язку, щоб утворити кластер, а потім ці BS одночасно передають ті самі дані цьому користувачеві, але попереднє кодування незалежно обчислюється на кожній BS, тобто попереднє кодування на кожній BS залежить лише від CSI цієї клітинки. Роблячи це, кожен користувач може отримати не тільки локальне посилення формування променів для кожної БС, але також вигреш кластерного формування променя за ціною втрати посилення бітового мультиплексування. У порівнянні з централізованим MIMO, цей тип розподіленого MIMO вимагає набагато менше накладних витрат на попереднє кодування, що призводить до покращення пропускної здатності мережі і особливо швидкості користувачів стільникового зв'язку під час розгортання певної мережі.

Massive MIMO, широкомасштабна антенна технологія, є основною технологією 5G, яка може покращити покриття мережі, користувач досвід і можливості мережі. У той час як традиційні радіопристрої часто мають лише два, чотири або максимум вісім каналів TRX, радіопристрої на основі технології Massive MIMO може мати 32 або 64 канали TRX, з до 512 або навіть більше антен елементів, що може призвести до значно більшого збільшення потужності, ніж традиційне обладнання. Крім того, в той час як традиційні пристрої більше фокусуються на охопленні в горизонтальному вимірі, Massive MIMO також пропонує набагато кращу гнучкість у вертикальному вимірі. Massive MIMO може значною мірою використовувати ресурси космічного виміру та увімкнути. Користувачі на одній базовій станції використовувати однакові тимчасові та частотні ресурси, що значно покращує пропускну здатність мережі без більш щільних базових станцій і ширшої смуги частот. Технологія Massive MIMO вперше була введена в мобільні мережі в епоху Pre5G. З розгортанням 5G в усьому світі вона набула широкого поширення у великих масштабах.

Масивна технологія MIMO може значно покращити ємність системи, але все ще існує багато проблем, можна подолати під час розгортання реальних мереж.

Ці проблеми пов'язані в основному з трьома ключовими аспектами розгортання 5G: покриття мережі, користувацький досвід і можливості мережі.

Наведені вище три аспекти отримують значну користь від типових технічних характеристик і переваг Massive MIMO, і одночасно будуть вирішені відповідні технічні труднощі. Взевши за приклад конфігурацію сигналу синхронізації та блоку PBCH (SSB), SSB визначає основне покриття продуктивності мережі. Канал мовлення 4G надсилається з фіксованим широким променем, і його покриття не змінюється в більшості випадків. Однак 5G SSB можна налаштувати з до 7 (структура кадру 2,5 мс) або 8 (структура кадру 5 мс) балки за конструкцією каркаса. Більше променів SSB призводить до гнучкої конфігурації, тобто кількох горизонтальних променів можна налаштувати, або комбінацію горизонтальних і вертикальних балок можна налаштувати.

Промені можуть бути різні гнучко конфігурується з різною шириною та висотою, так що конфігурація променів 5G SSB може підтримувати велику кількість сценарії та точно відповідають вимогам диференційованого покриття. Однак збільшення гнучкості також приносить а значне збільшення складності конфігурації. Існує більше десятків тисяч комбінацій антен конфігурація параметрів для променів 5G SSB. Тут виникає величезна технічна проблема, як швидко і точно знайти серед десятків тисяч параметрів антени конфігурацію, яка найбільше підходить для поточного сценарію, і ефективно узгоджувати конфігурацію зі зміною сценаріїв і режимів поведінки користувачів.

На основі квазі-ортогональних характеристик багатокористувацьких каналів, Massive MIMO може значно покращити пропускну здатність мережі через SDMA. Через складність поширення бездротового каналу і випадковість розподілу користувачів і послуг, проект базової станції вимагає добре виконаного алгоритму низхідного зв'язку передача та прийом висхідної лінії для отримання стабільного багатокористувацького підсилення SDMA та продуктивності захисту від перешкод.

За умови заданої кількості антен, складність алгоритму Massive MIMO швидко зростає з збільшення кількості користувачів і максимальної кількості рівнів

мультиплексування MU-MIMO, що стає одним із ключові технічні труднощі, що впливають на потужність системи.

2.4 Покриття мережі 5G

Подібно до розгортання 4G, 5G також виконує кілька кроків і починається з густих міських районів, де радіосередовище може бути дуже різноманітним і складним, включаючи діловий район з хмарочосами, різноманітними торговими центрами та офісними будівлями, житлові райони, ділові вулиці та площі.

Перше завдання — розгорнути 5G із гідним покриттям для всіх цих різних сценарії розгортання, особливо коли розгортання макробазових станцій на ранніх етапах розгортання 5G є набагато більш пріоритетним ніж розгортання спеціалізованих внутрішніх систем. Масовий MIMO має бути повністю використаний разом із гнучкістю та точністю SSB, щоб закласти міцну основу для оптимальної роботи користувачів і чудових мережевих можливостей.

З точки зору мережі радіодоступу, користувацький досвід в першу чергу сильно залежить від покриття мережі та мобільності продуктивність. Взагалі кажучи, чим далі користувач знаходиться від базової станції, тим слабший сигнал він отримує, і отже, тим нижча швидкість передачі даних. Грань стільникового зв'язку часто є найслабшим місцем мережі як з точки зору покриття, так і з точки зору користувача досвід. Масивний MIMO з його здатністю формувати більш точні та зосереджені на енергії промені може значно покращити сигнали отримані на межі осередку, зменшують перешкоди для сусідніх осередків і покращують роботу користувача.

Ще один типовий випадок поганого досвіду користувача – це коли користувачі рухаються дуже швидко, що є основою хорошого сервісу Massive MIMO. Продуктивність – достовірні інформація про стан каналу та оцінка каналу – сумнівна. У випадках середньої або високошвидкісної мобільності радіоканали між терміналом і базовою станцією постійно і швидко змінюються, що призводить

до старіння каналу, а отже погіршення надійності інформації каналу та оцінки каналу (табл. 2.1).

Мережа повинна точно визначити канал своєчасно надавати інформацію та відповідати відповідним політикам алгоритму та конфігураціям параметрів. Наприклад, скоротити період передачі опорного сигналу, покращити швидкість зворотного зв'язку та точність інформації про стан каналу, і зробити формування променів каналу служби більш точним, щоб забезпечити користувацький досвід.

Мережа 5G може отримати додаткові переваги від Massive MIMO на інших фронтах, ніж просто покриття та досвід, так що 5G не лише пропонує краще покриття та більшу швидкість, але також допомагає створювати більше значень. Одна справа - це подальше використання простору, коли спектр обмежений, щоб задовольнити постійно зростаючі потреби даних. У той же час, QoS на основі диференціації послуг і smart розподіл ресурсів можна використовувати, щоб запропонувати розширені послуги з ще більшими можливостями та матеріалізувати потенціал мережі покращення фінансових показників функціонування мережі. У щільних зонах, наприклад, мультиплексування з космічним поділом MU-MIMO можна додатково оптимізувати, щоб збільшити максимальну кількість одночасних користувачів, підвищити ефективність передачі, а також зменшити час, необхідний для передачі даних, а отже, зниження споживання енергії та вуглецевого сліду мережі. Для тих термінали, які мало рухаються, можна визначити оптимальний шлях перемикання, а потім використовувати для більш плавного використання. Як для районів із моделями припливного руху можна використовувати інтелектуальне керування променями, щоб забезпечити більш точні промені, націлені на високу цінність області та користувачів.[2]

Крім того, деякі служби, чутливі до затримок, такі як масштабні інтерактивні онлайн-ігри та промислові роботи, також вимагають можливості мережі, більш пристосовані до їхніх особливих потреб. Наприклад, SU-MIMO, а не MU-MIMO, може бути а кращий варіант для служб, чутливих до затримок, щоб зменшити ймовірність повторної передачі через перешкоди сполучення MU-MIMO.

Характеристики ключових технічних моментів у кожному аспекті розвитку та застосування мережі 5G

Розвиток мережі	Основні проблеми	Ключові технології Massive MIMO
Покриття мережі	Покриття в різних сценаріях, наприклад у висотних будинках. Управління різними типами перешкод	Точна та інтелектуальна конфігурація SSB Технології пом'якшення перешкод
Досвід користувача	Покращення досвіду користувачів у сценаріях із низькою продуктивністю, таких як межі осередку та висока мобільність.	Точне формування променя та контроль внутрішньої і міжстільникових перешкод. Конфігурація опорних сигналів і сигналів демодуляції, щоб зробити інформацію зворотного зв'язку більш своєчасною та точною.
Можливість мережі	Підтримка доступу до більшої кількості користувачів і додаткових послуг. Краща диференціація користувачів і послуг і створення цінності	SDMA каналів управління та сервісних каналів збільшує пропускну здатність. Диференційоване керування QoS та інтелектуальне розподілення ресурсів, що забезпечує точні можливості обслуговування на рівні користувача

2.5 Впровадження великомасштабної антенної решітки технології 5G

Передача каналу керування трансляцією та покриття 4G – як у випадку 2G та 3G, – здійснюється через широкий промінь. В епоху 5G впроваджується технологія великомасштабної антенної решітки. Як і канал обслуговування

PDSCH, завдяки співпраці всіх антенні елементи та радіочастотні канали передачі в антенній решітці, система 5G забезпечує вузьке формування променя SSB. Кілька вузьких променів SSB можна сканувати та передавати у часовій та просторовій областях. Таким чином, SSB не може досягти тільки така ж продуктивність покриття, що й сервісний канал, але також тривимірний гнучкий режим покриття в горизонтальному та вертикальні розміри.

5G, з іншого боку, використовує технології формування променя, засновані на масиві антенних елементів і радіочастотної передачі. Канали для передачі кількох вузьких променів SSB як у часовій, так і в просторовій областях, таким же способом PDSCH спосіб передавання. Це допомагає досягти однакового покриття SSB та каналів обслуговування та дуже гнучкого покриття в тривимірному просторі.

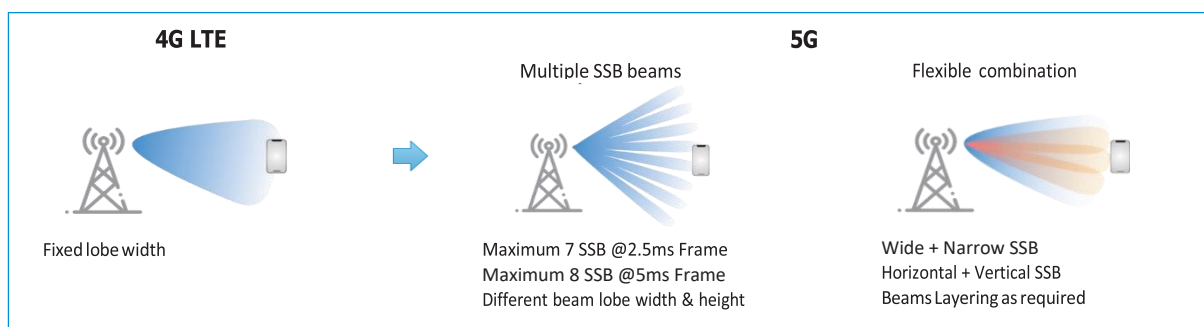


Рис 2.7. Порівняння між каналом мовлення 4G та 5G SSB

П'ятивимірні параметри антени технології Massive MIMO включають ширину горизонтального променя, ширину вертикального променя, горизонтальний азимут, вертикальний нахил і кількість пучків SSB. Існує п'ять ключових параметрів, які визначають конфігурацію Massive MIMO SSB: ширина горизонтального променя, ширина вертикального променя, горизонтальний азимут, вертикальний нахил і кількість пучків SSB. Це допомагає досягти великої гнучкості у задоволенні різних вимог до покриття.

У той час як 4G використовує фіксований широкий промінь для каналу мовлення, 5G має гнучкі варіанти передачі SSB:

- Кожна комірка передає один фіксований широкий промінь, а сусідні клітини передають свої промені в часовій області;
- Кожна комірка передає один фіксований широкий промінь без переміщення променів сусідніми осередками – краще використання ресурсів, але гірші перешкоди;
- Розгортка променя. Це метод передачі, при якому кілька променів SSB надсилаються в різних напрямках, при цьому вони розподіляються в часовій області, що не тільки гарантує, що кожен промінь SSB націлює свій власний передбачуваний напрям, але також допомагає пом'якшити перешкоди між сусідніми осередками. В даний час він широко використовується в комерційних мережах.

Багатопроменева SSB забезпечує значно краще покриття, ніж однопроменева SSB. Тест приводу в комерційній мережі показав, що горизонтальна 8-променева SSB має посилення RSRP від 7 до 8 дБ і ще 7-8 дБ посилення SINR порівняно з горизонтальними однопроменевими SSB. У 5% найгіршій області з точки зору покриття RSRP було покращено на 13-14 дБ і SINR на 7-8 дБ після того, як однопроменева SSB була змінена на багатопроменева SSB.

В іншому місці, де проводили ще один тест, RSRP із горизонтальним 7-проміньовим промінням був на 6 дБ кращим, ніж з горизонтальним одинарним широким променем, а SINR був на 6 дБ кращим.

2.6 Еволюція багатопроменевого базового покриття до тривимірного

У щільних міських районах, де багато висотних будинків, покриття SSB у вертикальному вимірі потребує більше уваги, крім горизонтального розміру.

Одним з інноваційних рішень є використання одного широкого горизонтального променя SSB з підвищеною потужністю передачі, щоб

забезпечити базовий рівень покриття, а також використання гнучкої кількості вертикальних променів, вузьких або широких, залежно від постійно мінливого розподілу користувачів і вимоги до покриття. У той час як горизонтальне покриття цього рішення може бути приблизно такого ж рівня, як і багатопроменевий SSB, вертикальне покриття можна істотно покращити, покращуючи продуктивність мережі у багатоповерхових будинках.

Це рішення має три наступні переваги:

- Вертикальне покриття можна розширити без витрат на горизонтальне покриття. Як згадувалося раніше, широкий промінь може забезпечити горизонтальне покриття, а гнучке число вертикальних променів може забезпечити вертикальне покриття на вимогу, в цілому реалізуючи розширене тривимірне покриття;
- Простіша схема конфігурації пучка SSB економить ресурси, а також зменшує споживання енергії. Кількість необхідних SSB-променів може бути набагато меншою, ніж у випадку горизонтальної багатопроменевої схеми SSB. Без впливу на продуктивність покриття можна зменшити накладні витрати на ресурси доступу, таким чином можна зробити доступними більше ресурсів каналу обслуговування. Крім того, зменшується коефіцієнт завантаження часових інтервалів SSB-променів, а споживання енергії пристроями може бути додатково зменшено, якщо ввімкнено відключення символів під час періодів низького навантаження;
- Ефективне уникнення перешкод. Одинарний широкий промінь SSB із збільшеною потужністю передачі розподілений у часовій області, щоб ефективно вирішити проблему взаємних перешкод між обслуговуючою коміркою та сусідніми інтерференційними елементами. Як згадувалося раніше, сусідні осередки можуть координувати свої горизонтальні широкі промені у часовій області, щоб ефективно пом'якшувати міжстільникові перешкоди.

Випробування в зоні комерційної мережі з висотними будинками та вулицями показали, що, хоча горизонтальне покриття широкопроменевими SSB з

потужністю може досягати такого ж рівня горизонтального 8-променевого SSB, покриття висотних будівель покращилося більш ніж на 30 %. Це інноваційне рішення, порівняно з горизонтальним 8-променевим рішенням, може запропонувати на 30% більше пропускної здатності та на 5% більше можливостей обслуговування, коли навантаження високе, і на 10% менше споживання електроенергії, коли навантаження є низьким.

Оскільки існують десятки тисяч можливих комбінацій п'яти ключових параметрів конфігурації SSB, осередків і кластерів осередків, більша гнучкість технології Massive MIMO супроводжується більшою складністю конфігурації та оптимізації мережі. Щойно фізичне розгортання базової станції 5G буде завершено, параметри Massive MIMO необхідно оптимізувати на основі розподілу користувачів стільникового зв'язку, шаблону трафіку та статусу покриття, що перекривається, слабкого покриття та перевищення стільникового зв'язку. Щоб досягти цього, передовий розумний алгоритм, заснований на штучному інтелекті та великих даних, може допомогти досягти високоефективної та автоматичної оптимізації SSB-променів з оптимальним набором параметрів.

2.7. Формування променя технології Beamforming

Одна антена, яка передає бездротовий сигнал, випромінює цей сигнал у всіх напрямках (якщо він не заблокований якимось фізичним об'єктом). Це природа того, як працюють електромагнітні хвилі. Але що, якщо ви хочете сфокусувати цей сигнал у певному напрямку, щоб сформувати цілеспрямований промінь електромагнітної енергії? Одна з технік для цього передбачає наявність кількох антен в безпосередній близькості, і всі вони передають той самий сигнал у дещо різний час. Хвилі, що перекриваються, створюватимуть перешкоди, які в деяких областях є конструктивними (це робить сигнал сильнішим), а в інших — деструктивними (це робить сигнал слабкішим або невиявленим). Якщо виконати

правильно, цей процес формування променя може сфокусувати ваш сигнал туди, куди ви хочете, щоб він пішов.

Переваги та обмеження формування променя. Фокушуючи сигнал у певному напрямку, формування променя дає змогу доставити сигнал вищої якості до вашого приймача — що на практиці означає швидшу передачу інформації та менше помилок — без необхідності збільшувати потужність мовлення. Це в основному святий Грааль бездротових мереж і мета більшості методів для покращення бездротового зв'язку. Як додаткову перевагу, оскільки ви не транслюєте свій сигнал у напрямках, де він не потрібний, формування променя може зменшити перешкоди, які відчувають люди, які намагаються вловити інші сигнали.

Обмеження формування променя в основному пов'язані з необхідними обчислювальними ресурсами; Існує багато сценаріїв, коли час і енергетичні ресурси, необхідні для розрахунків формування променя, зводять нанівець його переваги. Але постійне покращення потужності та ефективності процесора зробило методи формування променя достатньо доступними для вбудовування в споживче мережеве обладнання.

Формування променя і MU-MIMO. Формування променів є ключовим для підтримки багатокористувацької MIMO або MU-MIMO, яка стає все більш популярною в міру появи маршрутизаторів 802.11ac. Як випливає з назви, MU-MIMO включає в себе кілька користувачів, кожен з яких може спілкуватися з кількома антенами на маршрутизаторі. MU-MIMO використовує формування променів, щоб переконатися, що зв'язок з маршрутизатора ефективно націлений на кожного підключеного клієнта.

Є кілька способів, якими можуть працювати формування луча Wi-Fi. Якщо і маршрутизатор, і кінцева точка підтримують формування луча відповідно до стандарту 802.11ac, вони починають свою сеанс зв'язку з невеликим «рукопожатием», що допомагає сторонам встановити відповідне місце розташування та канал, за яким вони будуть спілкуватися; це покращує якість з'єднання і називається явним формуванням луча

Але все ще використовується безліч сетевих карт, які підтримують тільки 802.11n або навіть більш старі версії Wi-Fi. Маршрутизатор з формуванням діаграм спрямованості все ще може намагатися націлитися на ці пристрої, але без допомоги з кінцевою точкою він не зможе виконати настройку з такою точністю. Це називається неявним формуванням луча, а іноді й універсальним формуванням луча, тому що теоретично він працює з будь-яким пристроєм Wi-Fi.

У багатьох маршрутизаторах неявне формування луча - це функція, яку можна включати і вимикати. Стоит ли включати неявне формування луча? Руководство по маршрутизатору пропонує вам перевірити, як ваша установка працює з ним, щоб побачити, виходить чи ви від цього імпульсу. Можливо, такі пристрої, як телефони, які ви носите з собою вдома, можуть бачити розорвані з'єднання з неявним формуванням луча.

Типи формування променя. Існує два типи Beamforming: неявний (implicit) та явний (explicit). Explicit Beamforming – це коли і маршрутизатор, і клієнт підтримують Beamforming. Будь-який пристрій 802.11ac wifi, що підтримує Beamforming, матиме той самий стандарт, тому, якщо у вас є два пристрої 802.11ac Beamforming, гарантується, що вони будуть добре працювати разом. Наявність двох пристроїв, що працюють разом, дасть вам найсильнішу з'єднання, і тому явний Beamforming набагато ефективніший, ніж неявний. Слід зазначити, що підтримка 802.11ac не означає, що пристрій підтримує Beamforming.

Явне формування променя залежить від зворотного зв'язку з клієнтом. Це дозволяє точці доступу задавати свої параметри формування променя з більшою точністю, що, своєю чергою, дозволяє використовувати більш спрямований промінь. Замість того, щоб звукові кадри передавалися від клієнта до точки доступу, вони надсилаються з точки доступу клієнту. Клієнт записує, як він отримав звукові кадри та будує матрицю (описану нижче). Потім ця матриця передається у точки доступу. Завдяки їй точка доступу може точно розрахувати, як надсилати дані.

При використанні неявного формування променя точка доступу передбачає, що налаштування, які дозволяють їй краще чути клієнта, також є налаштуваннями,

які дозволяють клієнту краще чути точку. Це припущення зазвичай корисне, але не завжди точно. Налаштування для неявного формування променя дуже просте. Точка доступу просить клієнта надіслати передбачуваний набір звукових кадрів. Потім вона прослуховує ці звукові кадри, відзначаючи, коли і як вони приймаються на кожній зі своїх антен. Це дозволяє точці доступу задуматися про шаблон, який вона має використовуватиме передачі.

Явні матриці формування променя. Щоб встановити явний зв'язок з променем, точка доступу надішле клієнту низку звукових кадрів, що іноді називають Null Data Packets (NDP). Точка доступу передає їх від кожної зі своїх антен по одному за певний час. Заголовок NDP визначить, з якої антени його було відправлено. Явний пристрій, що відповідає стандарту 802.11ac, сумісний з формуванням діаграми спрямованості, зможе записувати інформацію про те, як він отримує звуковий кадр на кожній зі своїх антен індивідуально.

То дає нам відношення M до N за кількістю антен у точці доступу та кількості антен на клієнті. Клієнт реєструє дві частини даних кожного відношення MN . Перша - це сила сигналу, виміряна його амплітудою (позначається нижче за A). Другий – це час, коли він отримав сигнал. Відмінності цих часів реєструються в матриці (позначеної нижче T). Зверніть увагу, що один кадр, відправлений з точки доступу, прийматиметься на кожній антені клієнта з дещо іншою амплітудою та в дещо інший час.

В результаті виходить матриця MN з парою записів у кожному елементі. Цей процес повторюється для кожного каналу, який використовуватиметься, оскільки різні частоти можуть поширюватися трохи інакше в реальних сценаріях. Тепер це утворює тривимірну матрицю MNC , де C - кількість каналів, які хочемо відобразити. Матриця зображена нижче.

Ця матриця відома як інформація про стан каналу Channel State Information (CSI). CSI стискається та повертається до точки доступу. Для калібрування явного формування променя точка доступу повинна виконувати інверсію матриці CSI. Як

тільки це буде зроблено, точка доступу застосовуватиме параметри від інвертованої матриці до антеної решітки.

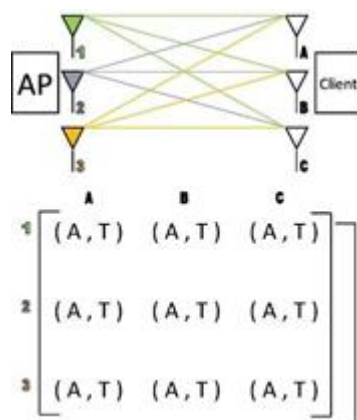


Рис.2.8. Тривимірна матриця MNC

В результаті антени, які були почуті востаннє, транслюються раніше, ніж ті, що були почуті першими. Ми можемо компенсувати невеликі амплітудні розбіжності аналогічно.

2.8 Переваги для користувача та оператора зв'язку

Формування променя з антен Massive MIMO відразу ж дає ряд переваг оператору зв'язку та споживачу, який використовує свій мобільний пристрій. По-перше, споживачам більше не доведеться махати телефоном у повітрі, щоб вручну шукати найсильніший сигнал. Антена робить це за вас за допомогою формування променя.

По-друге, формування променів дає змогу мобільним мережам використовувати нові можливості, включаючи можливість підключати та керувати транспортними засобами (V2X) та будинками (B2H) за допомогою надійних, сильних сигналів, які гарантують якість обслуговування та характеристики волокна без розкопування дороги.

По-третє, є аспект безпеки. Ваші пакети даних переміщуються в самому промені, а не по всій дузі антенного блоку, що означає менше можливостей перехопити ваші дані або перешкоди вплинути на ваш мобільний сигнал.

Поєднайте це з більш високим 256-бітним шифруванням вашої мобільної ідентифікації, місцезнаходження та даних, вбудованим у специфікацію 5G, і ваш мобільний зв'язок ніколи не був таким безпечним.

Для оператора формування променя відіграє важливу роль в управлінні потребами в електроенергії в мережі, споживаючи достатньо енергії, щоб досягти вашого телефону або іншого термінального пристрою, що добре для фінансів оператора і добре для навколишнього середовища.

Насправді, ми можемо показати, що антени 5G, які використовують формування променя, потребують приблизно однієї десятої потужності для передачі частини даних порівняно зі застарілими антенами 4G, що є безпрограшним варіантом для електронних таблиць і лісів. Крім того, здатність керувати та гарантувати характеристики якості послуг широкопasmового зв'язку за допомогою формування променів 5G означає, що нові вертикальні ринки, такі як житлові широкопasmові мережі або орендовані для бізнесу лінії, де немає волокна в землі, відкриваються для телекомунікацій, випускаючи нові потоки доходу, щоб виправдати створення мережі 5G в першу чергу.

Типи формування променя. Гібридне формування променя поєднує в собі аналогове і цифрове формування променя. Очікується, що реалізація mm-wave gNB (базова станція 5G) використовуватиме певну форму гібридного формування променя. Один з підходів полягає у використанні аналогового формування променя для грубого формування променя, а всередині аналогового променя використовують цифрову схему формування променя, якщо це необхідно, або MU-MIMO, або SU-MIMO.

Фази сигналу окремих сигналів антени налаштовуються в РЧ-доміні. Аналогове формування променя впливає на діаграму направленості та посилення антенної решітки, таким чином покращуючи покриття. На відміну від цифрового формування променів, можна сформувати лише один промінь на набір елементів антени. Підсилення підсилення антени, що забезпечується аналоговим формуванням променя, частково долає вплив високих втрат в тракці в mmWave.

Тому аналогове формування променя вважається обов'язковим для діапазону частот mmWave 5G NR.

Керування і перемикання променя. Спрямування променя досягається зміною фази вхідного сигналу на всіх випромінюючих елементах. Фазовий зсув дозволяє націлити сигнал на певний приймач. Антена може використовувати випромінюючі елементи із загальною частотою, щоб спрямовувати один промінь у певному напрямку. Промені різної частоти також можна спрямовувати в різних напрямках для обслуговування різних користувачів.

Напрямок надсилання сигналу динамічно обчислюється базовою станцією, коли кінцева точка рухається, ефективно відстежуючи користувача. Якщо промінь не може відстежувати користувача, кінцева точка може переключитися на інший промінь.

3 ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ 5G

3.1 Дослідження якості оцінки каналу зв'язку

Одна з головних вимог для реалізації нових послуг у мережах мобільного зв'язку покоління 5G - суттєве збільшення пропускної спроможності в порівнянні з мережами попередніх поколінь. Якщо в поколіннях 3G і 4G це досягалося в основному за рахунок впровадження нових сигнально-кодових конструкцій, оптимального розподілу частотного ресурсу (ЧР) та розширення частотного спектру, то нині спостерігається гострий дефіцит ЧР, а можливості його розширення дуже обмежені. Розвиток технологій мобільного зв'язку за таких умов змушує шукати нові шляхи та вирішувати складні технічні завдання, що забезпечують виконання вимог щодо збільшення пропускної спроможності мереж 5G.

Для кінцевого користувача MIMO дає значний приріст швидкості передачі даних. Залежно від конфігурації обладнання та кількості використовуваних антен можна отримати двократний, трикратний і до восьмикратного збільшення швидкості. Зазвичай у бездротових мережах використовується однакова кількість передаючих та приймаючих антен, і записується це як, наприклад, 2×2 або 3×3 .

Тобто, якщо бачимо запис MIMO 2×2 , то дві антени передають сигнал і дві приймають. Наприклад, у стандарті Wi-Fi 802.11ac один канал шириною 20 МГц дає пропускну здатність 867 Мбіт/с, тоді як у конфігурації MIMO 8×8 об'єднуються 8 каналів, що дає максимальну швидкість близько 7 Гбіт/с. Аналогічно і в LTE MIMO – потенційне зростання швидкості у кілька разів. Для повноцінного використання MIMO в мережах LTE потрібні 4G MIMO антени, т.к. як правило, вбудовані антени недостатньо рознесені і дають малий ефект. І звичайно, має бути підтримка MIMO з боку базової станції

LTE-антена з підтримкою MIMO передає та приймає сигнал у горизонтальній та вертикальній площинах. Це називається поляризація. Відмінною

особливістю MIMO-антен є наявність двох антенних роз'ємів, і відповідно використання двох проводів для підключення до модему/роутера.

Massive MIMO – це форма систем MU-MIMO, де кількість антен БС і кількість користувачів є великою. У Massive MIMO сотні або тисячі антен BS одночасно обслуговують десятки або сотні користувачів на одному частотному ресурсі. Деякі основні моменти Massive MIMO:

- Операція TDD: Накладні витрати оцінки каналу залежать від кількості антен БС, M . На відміну від TDD, накладні витрати оцінки каналу не залежать від M . У Massive MIMO M є великим, і, отже, робота TDD є кращою. Наприклад, припустимо, що інтервал когерентності становить $T = 200$ символів (відповідає ширині смуги когерентності 200 кГц і часу когерентності 1 мс). Тоді в системах FDD кількість антен БС і кількість користувачів обмежені $M + K < 200$, тоді як у системах TDD обмеження на M і K становить $2K < 200$. На рисунку 3.1 показані області можливих (M, K) в системах FDD і TDD. Ми бачимо, що область FDD набагато менша, ніж область TDD. З TDD додавання додаткових антен не впливає на ресурси, необхідні для оцінки каналу.

- Лінійна обробка: оскільки кількість антен БС і кількість користувачів є великими, обробка сигналу на кінцях терміналів повинна мати справу з матрицями/векторами великих розмірів. Таким чином, краща проста обробка сигналу. У Massive MIMO лінійна обробка (схеми лінійного комбінування у висхідній лінії та схеми лінійного попереднього кодування у низхідній лінії) є майже оптимальною.

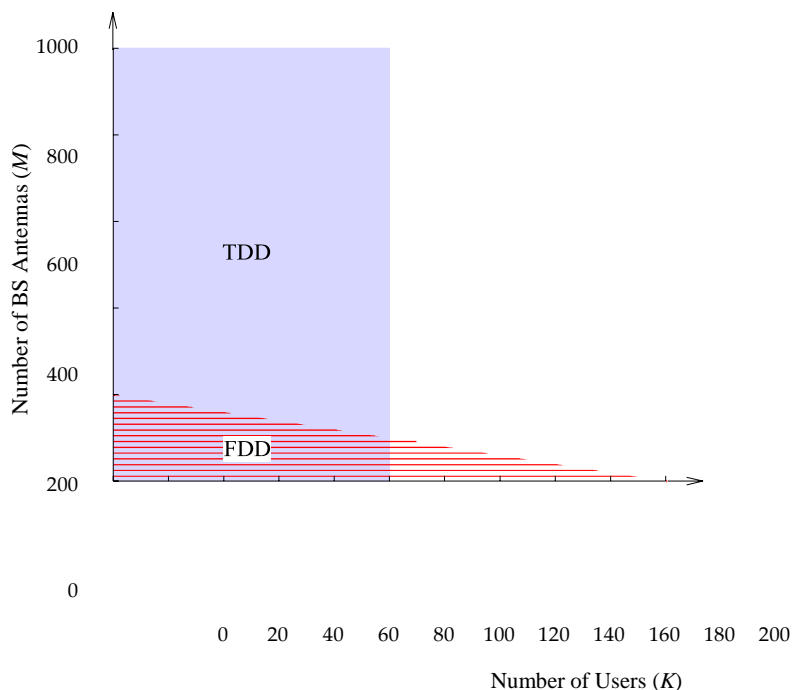


Рис. 3.1. Области можливих (M, K) в системах TDD і FDD для інтервалу когерентності 200 символів

- **Сприятливе розповсюдження:** сприятливе поширення означає, що матриця каналів між антенною решіткою БС та користувачами добре обумовлена. У Massive MIMO за деяких умов сприятлива властивість поширення зберігається завдяки закону великих чисел.
- **Масивна антенна решітка БС не повинна бути фізично великою.** Для приклада розглянемо циліндричну решітку з 128 антенами, що містить чотири кола з 16 подвійно поляризованих антенних елементів. На частоті 2,6 ГГц відстань між сусідніми антенами становить близько 6 см, що становить половину довжини хвилі, і, отже, ця решітка займає лише фізичний розмір 28 см \times 29 см.
- **Massive MIMO масштабується:** у Massive MIMO БС вивчає канали за допомогою навчання висхідної лінії під час роботи TDD. Час, необхідний для оцінки каналу, не залежить від кількості антен БС. Таким чином, кількість антен БС можна зробити настільки великою, скільки потрібно, без збільшення накладних витрат на оцінку каналу. Крім того, обробка сигналу у кожного користувача дуже проста і не залежить від існування інших користувачів, тобто обробка сигналу

мультиплексування або демультимплексування для користувачів не виконується. Додавання або видалення деяких користувачів із служби не впливає на діяльність інших користувачів.

3.2 Складність реалізації технології для підвищення якості зв'язку

Крім переваг системи Massive MIMO відрізняються і складністю технічної реалізації. Витрати каналного ресурсу на заголовки CSI. Побудову мережі радіодоступу 5G планується здійснити на структурі, що є в LTE.ресурсних блоків та службових індикаторів тому необхідно враховувати обмеження, які вона накладає.

Так як число антен значно зростає, збільшується і кількість каналів, що передають. Отже, щоб забезпечити необхідну якість передачі та побудувати коректну матрицю прекодування (попереднього кодування) для каналів Massive MIMO, потрібно збільшити і кількість індикаторів PMI (precoding matrix indicator), що передаються абонентським терміналом каналом зворотний зв'язок вгору. Також потрібно більше ресурсу на лінії вниз (DL) для передачі сигналів CSI-RS (channel state information – reference signal), необхідні для операцій прекодування на БС.

Крім цього, для коректної роботи планувальника БС при використанні режимів multiuser будуть потрібні й більші витрати радіоресурсу для передачі сигналів DM-RS (demodulation reference signal), які відправляються абонентським терміналом вгору у напрямку БС (UL).

Таким чином, значна частина радіоресурсів піде на службову інформацію. Наприклад, при використанні 64 антенних портів більше половини елементів одного ресурсного блоку піде лише на передачу CSI-RS сигналів.

Погіршення якості пілот-сигналу привикористання дуплексного режиму TDD.

Реалізація режиму Massive MIMO для тимчасового дуплексу має певні переваги, однак призводить до погіршення якості пілотсигналів різних АС через негативні впливи один на одного. Ця проблема отримала назву в англійській

літературі pilot contamination (Дослівно "забруднення пілот-сигналу"). У разі використання режиму TDD (time division duplex) у технології Massive MIMO необхідно враховувати два факти: перший - передача пілот сигналу в TDD здійснюється по лінії вгору з БС 1 на непризначений для цього термінал АС 2 спричиняє перешкоди та погіршення параметрів пілот-сигналу. Очевидно, що здійснення Massive MIMO у режимі TDD вимагає розробки ефективних методів боротьби з цим негативним явищем.

При реалізації Massive MIMO виникає питання: яка зі схем дуплексу – TDD або FDD (frequency division duplex) - є найбільш підходящим. Для порівняння двох режимів пропонується проаналізувати такі показники: точність діаграмоутворення при напрямку променя до АС; витрати каналного ресурсу на заголовок пілот сигналу; підтримка високих швидкостей пересування АС

Так як у схемі TDD передача вниз та вгору здійснюється на одній частоті (але в різні моменти часу), то фізичний стан каналу для UL та DL однаково в обох напрямках. Тобто не важливо, у якому напрямку зв'язку вимірюються індикатори стану каналу CSI – значення будуть з великою ймовірністю рівними і для каналу вгору, і для каналу вниз.

На відміну від TDD, у режимі FDD така рівнозначність неможлива, тому що канали вгору та вниз передаються на різних частотах, і, отже, вимірювання параметрів CSI для каналу вниз повинні відбуватися тільки у самому каналі, а результати цих вимірів для подальшої обробки БС можуть передаватися тільки по каналу вгору.

У результаті при такому режимі обміну параметрів CSI виникне проблема неактуальності прийнятих за такою зворотного зв'язку даних на БС, які негативно впливають точність діаграмоутворення, тобто на найважливіший атрибут розрахованого на багато користувачів (MU, Multi User) Massive MIMO. Виходячи з цього порівняння, можна дійти невтішного висновку, що найбільш підходящим методом дуплексу для Massive MIMO є TDD.

Наступний критерій порівняння – витрати каналного ресурсу на пілот-сигнал. Так як у режимі FDD стан каналів вниз вимірюється на АС, то кожен

антенний порт БС повинен передавати власний пілот-сигнал, тобто. Передач пілот-сигналу вниз буде стільки, скільки антенних портів є на БС. У режимі TDD, навпаки, стан каналу вимірюється на БС, виходячи з інформації пілот-сигналу, надісланого від антенного порту АС. Але АС мають, як правило, лише один антенний порт. Отже, один і той же пілот-сигнал буде прийнято всіма антенними портами на БС, що означає: БС зможе виміряти стан всіх каналів від однієї антени АС до багатьох антен БС, використовуючи лише одну передачу пілот-сигналу вгору.

З чого випливає, що кількість передач пілот сигналу в режимі FDD відповідає кількості антенних портів на БС (порядку сотень для Massive MIMO), в той час як кількість передач пілот сигналу в режимі TDD відповідає кількості антенних портів на АС (як правило, один антенний порт). Тому за критерієм витрат каналного ресурсу на передачу пілот-сигналу більше переважним виявляється режим TDD.

Переходячи до третього критерію - надання зв'язку із заданим QoS на високих швидкостях пересування АС, до 500 км/год, необхідно сказати, що час передачі пілот-сигналу при цьому має бути настільки мало, щоб передана інформація про стан каналу завжди була актуальною. Але, як показано вище, і без того, високі додаткові витрати каналного ресурсу на пілот-сигнал в режимі FDD збільшаться ще більше при швидкому пересуванні АС через необхідність постійної актуалізації стану каналу. Навпаки, режим TDD не вимагає таких високих витрат каналного ресурсу.

Підсумовуючи три розглянуті вище критерії, можна дійти невтішного висновку, що найбільш відповідним режимом дуплексу для технології Massive MIMO є TDD.

Масивний MIMO можна розглядати як форму формування променя у більш загальному значенні цього терміну, але досить віддалений від традиційної форми. Massive просто посилається на велику кількість антен в антенній решітці базової станції. MIMO посилається на те, що кілька просторово розділених користувачів обслуговуються антеною ґратами в одному і тому ж ресурсі часу та частоти.

Масивний MIMO також визнає, що в реальних системах дані, що передаються між антеною і терміналом користувача, і навпаки, піддаються фільтрації з навколишнього середовища. Сигнал може відбиватися від будівель та інших перешкод, і ці відображення матимуть пов'язану затримку, згасання та напрямок приходу

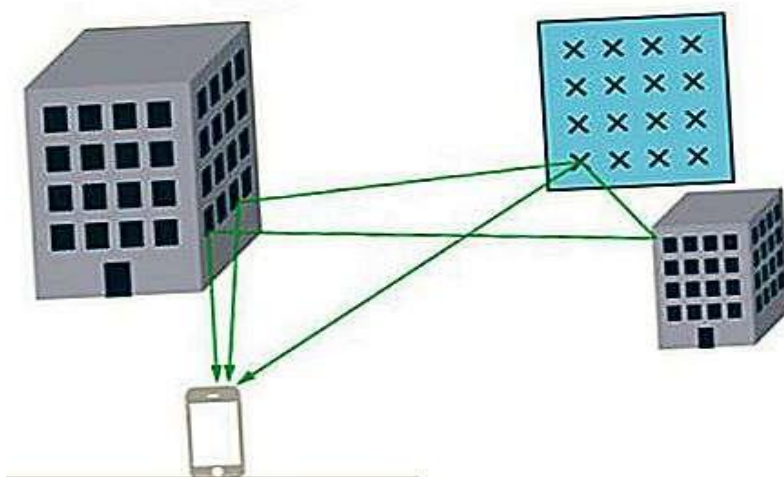


Рис.3.2. Багатоколісне середовище між антеною ґратами та користувачем

Щоб використовувати переваги декількох шляхів, необхідно охарактеризувати просторовий канал між антенними елементами і терміналами користувача. У літературі це відповідь зазвичай згадується як інформація про стан каналу (CSI). Цей CSI являє собою сукупність функцій просторового перенесення між кожною антеною і кожним терміналом користувача.

3.3 Практичні перешкоди у системі Massive MIMO

Коли потужний MIMO реалізується в реальному сценарії, є додаткові практичні міркування, які потрібно враховувати. Як приклад розглянемо антенну решітку з 32 каналами передачі (Tx) та 32 прийоми (Rx), що працюють у смузі 3, 5

ГГц. Існує 64 RF сигнальних ланцюгів, які повинні бути встановлені на місце, і відстань між антенами становить приблизно 4,2 см з урахуванням робочої частоти. Це також означає, що є багато енергії, що розсіюється, що викликає неминучі проблеми з температурою. Інтегровані приймачі Analog Devices пропонують дуже ефективно вирішення багатьох з цих проблем.

У Massive MIMO операція TDD є кращою. Під час інтервалу когерентності є три операції: оцінка каналу (включаючи навчання висхідній лінії зв'язку та навчання низхідній лінії), передача даних висхідної лінії та передача даних по низхідній лінії. Протокол TDD Massive MIMO показаний на рис 3.3.

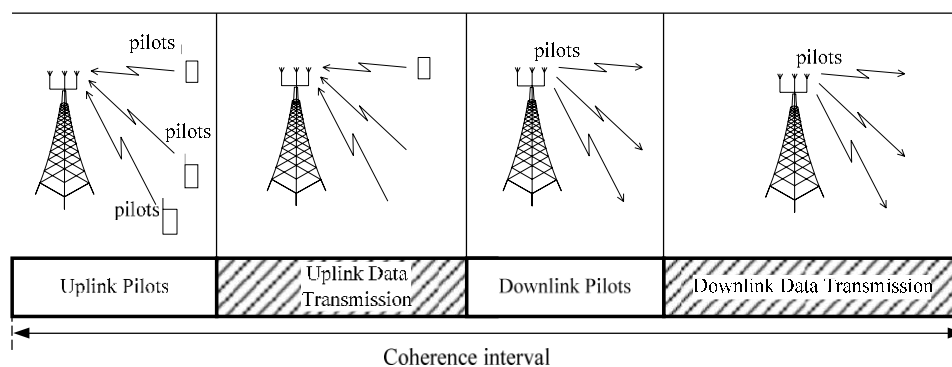


Рис. 3.3. Протокол передачі TDD Massive MIMO

3.4 Оцінка каналу передачі даних по висхідній та низхідній лініях

BS потребує CSI для виявлення сигналів, що передаються від користувачів у висхідній лінії зв'язку, і для попереднього кодування сигналів у низхідній лінії зв'язку. Цей CSI отримується за допомогою навчання висхідній лінії зв'язку. Кожному користувачеві призначається ортогональна пілот-послідовність і надсилає цю пілот-послідовність до BS. BS знає послідовності пілот-сигналів, переданих від усіх користувачів, а потім оцінює канали на основі прийнятих пілот-сигналів.

Крім того, кожному користувачеві може знадобитися часткове знання CSI для когерентного виявлення сигналів, що передаються з BS. Цю інформацію можна

отримати за допомогою навчання низхідній лінії зв'язку або якогось алгоритму оцінки сліпого каналу. Оскільки BS використовує методи лінійного попереднього кодування для формування сигналів користувачам, користувачеві потрібен лише ефективно посилення каналу (яке є скалярною константою) для виявлення бажаних сигналів. Таким чином, BS може витратити короткий час на формування пілот-сигналів у низхідній лінії зв'язку для отримання CSI у користувачів.

Частина інтервалу когерентності використовується для передачі даних висхідної лінії зв'язку. У висхідній лінії всі користувачі K передають свої дані до БС з однаковим частотно-часовим ресурсом. Потім BS використовує оцінки каналу разом із лінійним комбінуванням методи виявлення сигналів, що передаються від усіх користувачів.

У низхідній лінії зв'язку БС передає сигнали всім K користувачам в одному частотно-часовому ресурсі. Точніше, BS використовує свої оцінки каналу в поєднанні з символами, призначеними для K користувачів, щоб створити M попередньо закодованих сигналів, які потім подаються на M антен.

Попит на бездротову пропускну здатність і надійність зв'язку, а також щільність користувачів завжди зростатиме. Майбутнє бездротове спілкування вимагає нових технологій, за допомогою яких багато користувачів можуть одночасно обслуговуватися з дуже високою пропускну здатністю. Масивний MIMO може задовольнити ці вимоги. Розглянемо передачу по висхідній лінії. (Той самий аргумент можна використати для передачі по низхідній лінії.) За умов сприятливого поширення (вектори каналу між користувачами і БС попарно ортогональні), сумарна пропускну здатність передачі висхідної лінії дорівнює

$$C_{\text{sum}} = \log_2 \det(\mathbf{I}_K + p_u \mathbf{M} \mathbf{I}_K) = K \log_2(1 + M p_u). \quad (3.1)$$

У (1) K — коефіцієнт мультиплексування, а M — підсилення масиву. Ми бачимо, що ми можемо отримати величезну спектральну та енергетичну ефективність, коли M і K великі. Без будь-якого збільшення потужності, що передається на термінал, за рахунок збільшення K та M , ми можемо одночасно обслуговувати більше користувачів у тому ж діапазоні частот. При цьому

пропускна здатність на одного користувача також збільшується. Крім того, подвоївши кількість антен BS, ми можемо зменшити потужність передачі на 3 дБ, зберігаючи при цьому початкову якість обслуговування.

Зазначені вище підсилення отримуються за умов сприятливого поширення та використання оптимальної обробки на БС. Одне головне питання: чи будуть ці переваги все-таки отримані за допомогою лінійної обробки? Інше питання: чому б не використати звичайний малорозмірний MIMO точка-точка зі складними схемами обробки замість Massive MIMO з простими схемами лінійної обробки? У Massive MIMO, коли кількість антен BS велика, завдяки закону великих чисел, канали стають сприятливими. В результаті лінійна обробка є майже оптимальною. Підсилення мультиплексування та посилення масиву можна отримати за допомогою простої лінійної обробки. Крім того, збільшуючи кількість антен БС і кількість користувачів, ми завжди можемо збільшити пропускну здатність.

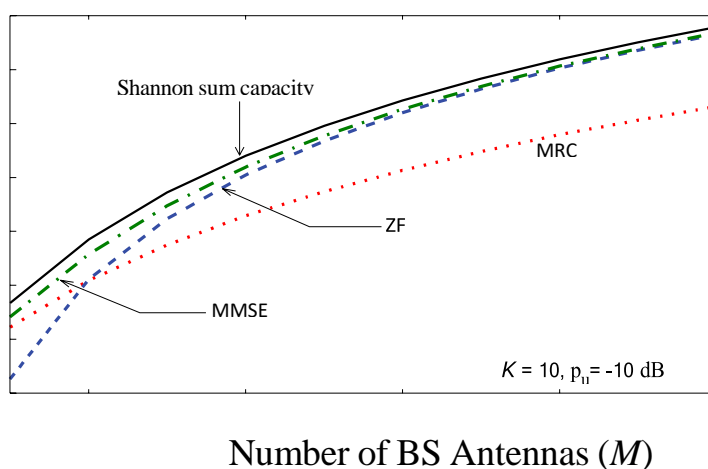


Рис. 3.3. Сумарна швидкість висхідної лінії для різних лінійних приймачів і для оптимального приймача.

На цьому рисунку 3.3 показана залежність сумарної швидкості від кількості антен БС з оптимальними приймачами (сумарна потужність досягається) та лінійними приймачами при $K = 10$ і $p_{11} = -10$ дБ. Ми бачимо, що коли M велике,

швидкість суми при лінійній обробці дуже близька до сумарної ємності, отриманої при використанні оптимальних приймачів. При $M = K = 10$ і з оптимальним приймачем максимальна сумарна швидкість, яку ми можемо отримати, становить 8,5 біт/с/Гц. Навпаки, використовуючи великий M , скажімо, $M = 50$, з простими приймачами ZF, ми можемо отримати сумарну швидкість 24 біт/с/Гц.

Незважаючи на величезні переваги Massive MIMO, багато проблем все ще потрібно вирішити. Основні проблеми Massive MIMO перераховані нижче:

кількість антен БС безмежно зростає. Для зменшення цього впливу було докладено значних зусиль.

Масивний MIMO працює в сприятливих умовах поширення. Однак на практиці можуть існувати середовища поширення, де канали не є сприятливими. Наприклад, у середовищі поширення, де кількість розсіювачів невелика порівняно з кількістю користувачів, або канали від різних користувачів до BS мають спільні розсіювачі, канал не є сприятливим. Однією з можливостей вирішення цієї проблеми є розподіл антен БС на великій території.

3.5 Нові стандарти та проекти для покращення мережі

Буде дуже ефективно, якщо Massive MIMO можна буде розгорнути в сучасних системах, таких як LTE. Однак стандарт LTE допускає лише до 8 портів антени на БС. Крім того, LTE використовує інформацію про канал, яка передбачається. Наприклад, один з варіантів низхідної лінії зв'язку в LTE полягає в тому, що BS передає опорні сигнали через кілька постійних променів. Потім користувачі повідомляють БС про найсильніший промінь. BS буде використовувати цей промінь для передачі по низхідній лінії зв'язку. На відміну від цього, Massive MIMO використовує інформацію про канал, яка оцінюється (вимірюється). Тому, щоб застосувати Massive MIMO на практиці, потрібні нові стандарти. З іншого боку, з Massive MIMO дорогий трансивер потужністю 40 Вт слід замінити великою кількістю малопотужних і недорогих антен. Слід також

розглянути відповідні конструкції обладнання. Для цього потрібні величезні зусилля як науковців, так і промисловості.

У масивних системах MIMO через велику кількість антен детектування сигналу висхідної лінії стає обчислювально складний і знижує досяжну пропускну здатність. Крім того, всі сигнали, що передаються через користувачі накладають на базову станцію для створення перешкод, що також сприяє зменшенню пропускну здатність і спектральна ефективність.

На рис. 3.4 показана масивна система MIMO з N терміналом користувача та Антена M на базовій станції. Усі сигнали, передані N терміналом користувача, проходять через інший бездротовий шлях і накладають на базову станцію, що робить виявлення сигналу на базовій станції складний і неефективний. Було проведено широке дослідження, щоб знайти оптимальний метод виявлення сигналу для масивних систем MIMO, які можуть забезпечити кращу пропускну продуктивність при менших обчислювальних ресурсах складність. Звичайні нелінійні детектори, такі як Sphere Decoder (SD і послідовний Подавлення перешкод (SIC) забезпечує хорошу продуктивність. Все-таки обчислювальна складність збільшується зі збільшенням кількості антен, що робить їх неможливими для масивних систем MIMO.

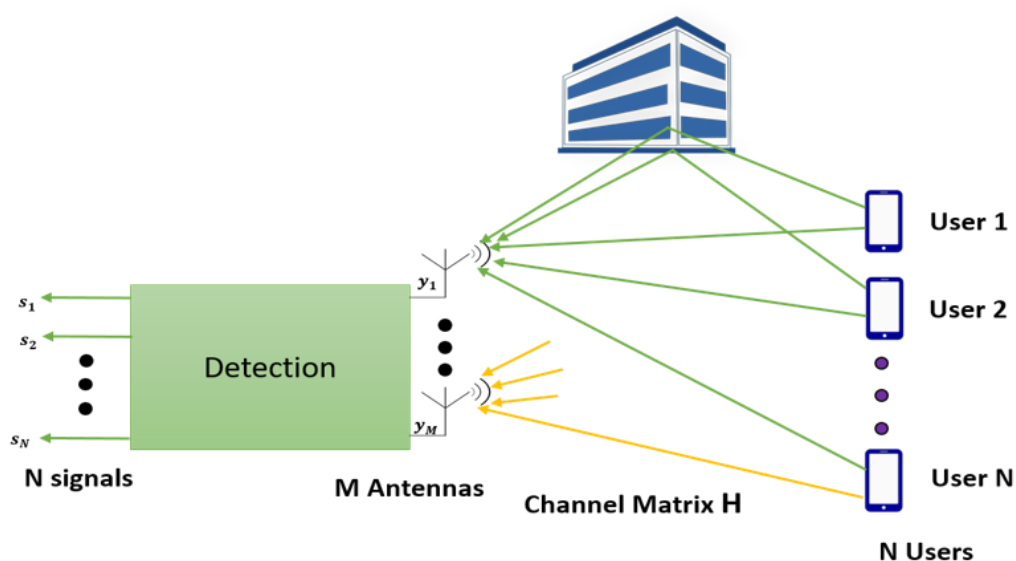


Рис. 3.4. Вихідна масивна система MIMO

Масова технологія MIMO – це більше, ніж просто розширення технології MIMO, і для її створення насправді існує ще багато проблем і проблем, які потребують вирішення. Деякі з фундаментальних проблем в масивних системах MIMO показані на рисунку 3.5.

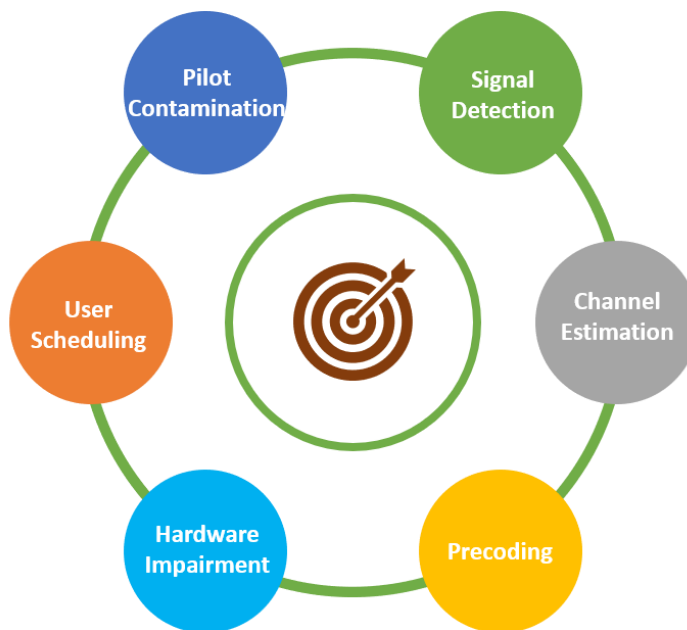


Рис 3.5. Проблеми масового розгортання MIMO

У масивних системах MIMO базовій станції потрібна реакція каналу терміналу користувача, щоб отримати оцінку каналу. Канал висхідної лінії оцінюється базовою станцією, коли термінал користувача посилає ортогональні пілот-сигнали базовій станції. Крім того, за допомогою властивості взаємності каналу масивного MIMO, базова станція оцінює канал низхідної лінії зв'язку до терміналу користувача. Якщо пілот-сигнали в домашній стільниці та сусідніх стільниках ортогональні, базова станція отримує точну оцінку каналу. Однак кількість ортогональних пілот-сигналів у заданій пропускну здатності та періоді обмежена, що змушує повторно використовувати ортогональні пілот-сигнали в сусідніх осередках

Той самий набір ортогональних пілотів, що використовується в сусідніх осередках, буде заважати один з одним, і базова станція отримає лінійну комбінацію відповіді каналу від домашня і сусідні клітини.

Це явище відоме як пілотне забруднення, і воно обмежує досяжна пропускну здатність, як показано на рис.3.6. Під час низхідного зв'язку базова станція буде формувати промінь до користувача в його домашній комірці разом із небажаними користувачами в сусідніх клітинках.

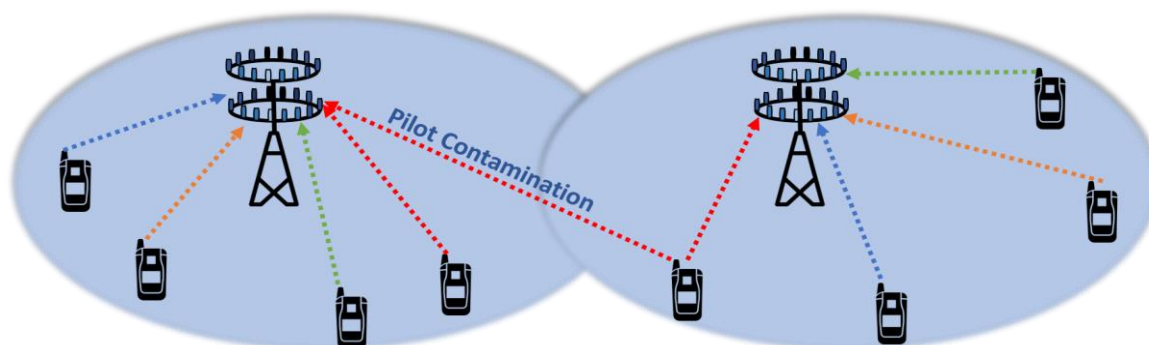


Рис.3.6. Масивний ефект забруднення MIMO-пілота

Для виявлення та декодування сигналу масивний MIMO покладається на інформацію про стан каналу (CSI). CSI - це інформація про стан лінії зв'язку від передавача до приймача і представляє комбінований ефект згасання, розсіювання тощо. Якщо CSI ідеальний, то продуктивність масивного MIMO лінійно зростає з кількістю передавальних або приймальних антен, залежно від того, що є менше для системи, яка використовує дуплексування з частотним розділенням (FDD), CSI необхідно оцінити обидва під час низхідного та висхідного зв'язку. Під час висхідної лінії оцінка каналу виконується базовою станцією з за допомогою ортогональних пілот-сигналів, що надсилаються терміналом користувача.

А під час низхідного зв'язку, база станція посилає пілот-сигнали користувачеві, а користувач підтверджує оцінку каналу інформацію для передачі по низхідній лінії зв'язку. Для масивної системи MIMO з багатьма антенами, Стратегія оцінки каналу низхідної лінії зв'язку в FDD стає дуже складною та нездійсненною для реалізації в реальних додатках.

На рисунку 3.7 показано режим FDD та Duplexing Time Division (TDD). у бездротовому зв'язку, а на рисунку 3.7 показана типова передача пілотного сигналу та зворотний зв'язок CSI механізм в режимі FDD і TDD.

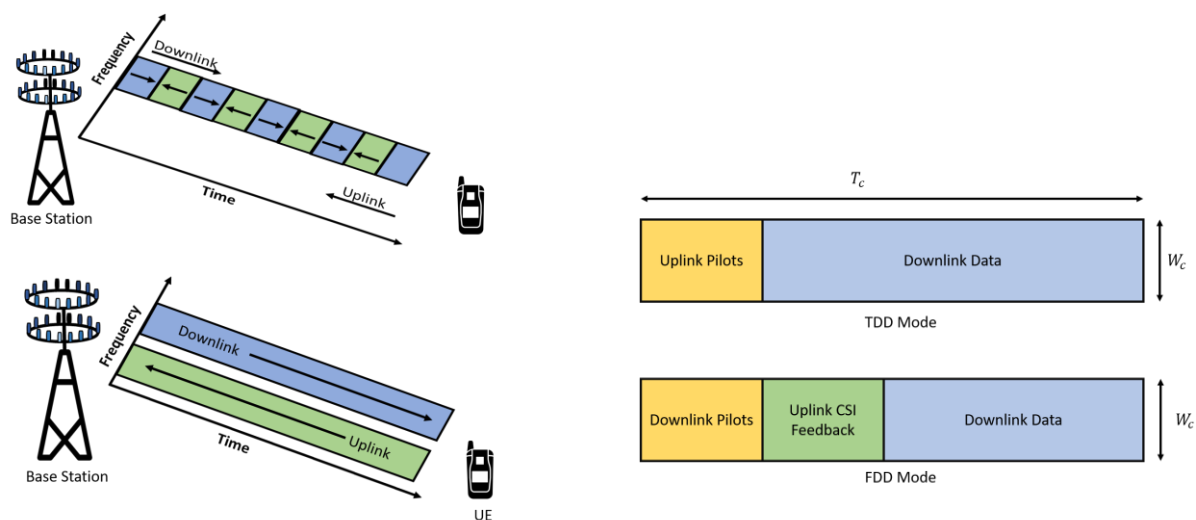


Рис.3.7. (а) Режим дууплексування з частотним розділенням (FDD) і режимом дууплексування з часовим розділенням (TDD): Massive найкраще працює в режимі TDD. (б) Типова передача пілотів і механізм зворотного зв'язку CSI в режимах FDD і TDD

TDD забезпечує вирішення проблеми під час передачі по низхідній лінії зв'язку в системах FDD. У TDD, використовуючи властивість взаємності каналу, базова станція може оцінити канал низхідної лінії зв'язку за допомогою інформації про канал під час висхідної лінії зв'язку. Під час висхідної лінії зв'язку користувач надсилатиме ортогональні пілот-сигнали до базової станції, і на основі цих пілот-сигналів базова станція оцінюватиме CSI на термінал користувача. Потім, використовуючи оцінений CSI, базова станція буде формувати дані низхідної лінії зв'язку до терміналу користувача. Оскільки існує обмежена кількість ортогональних пілотів, які можна повторно використовувати від однієї комірки до іншої, виникає проблема забруднення пілотів, яка є значною проблемою під час

масштабної оцінки каналу MIMO. Іншими проблемами є збільшення апаратної та обчислювальної складності через більшу кількість антен. Таким чином, низька складність і низький алгоритм оцінки накладних каналів є дуже бажаними для масивних систем MIMO

Хоча MMSE забезпечує оптимальну точність, складність обчислень збільшується із збільшенням кількості антен. Складність зростає через велику інверсію матриці, яку вимагає алгоритм.

Незважаючи на те, що передбачається використання операцій TDD для масового MIMO, багато досліджень ведуться щодо використання операцій FDD у масивних системах MIMO.

Попереднє кодування — це концепція формування променя, яка підтримує багатопотокову передачу в багатоантенних системах. Попереднє кодування відіграє важливу роль у масивних системах MIMO, оскільки воно може пом'якшити ефект, створений втратами на шляху та перешкодами, і максимізує пропускну здатність. У масивних системах MIMO базова станція оцінює CSI за допомогою пілот-сигналів висхідної лінії зв'язку або зворотного зв'язку, надісланих терміналом користувача. Отриманий CSI на базовій станції не є неконтрольованим і не ідеальним через декілька факторів навколишнього середовища на бездротовому каналі хоча базова станція не отримує ідеального CSI, продуктивність низхідної лінії зв'язку значною мірою залежить від оцінки CSI.

Таким чином, базова станція використовує оцінений CSI і техніку попереднього кодування, щоб зменшити перешкоди і досягти виграшу в спектральній ефективності. Продуктивність масивного MIMO низхідної лінії зв'язку залежить від точної оцінки CSI та використовуваної техніки попереднього кодування. Хоча техніка попереднього кодування забезпечує величезні переваги для масивних систем MIMO, вона також збільшує обчислювальну складність усієї системи за рахунок додавання додаткових обчислень. Складність обчислень зростає разом із кількістю антен. Таким чином, малоскладні та ефективні прекодера є більш практичними для використання для масивних систем MIMO. На

рисунку 3.8 показано попереднє кодування в масивному MIMO системі з базовою станцією M-антени та N-користувачами.

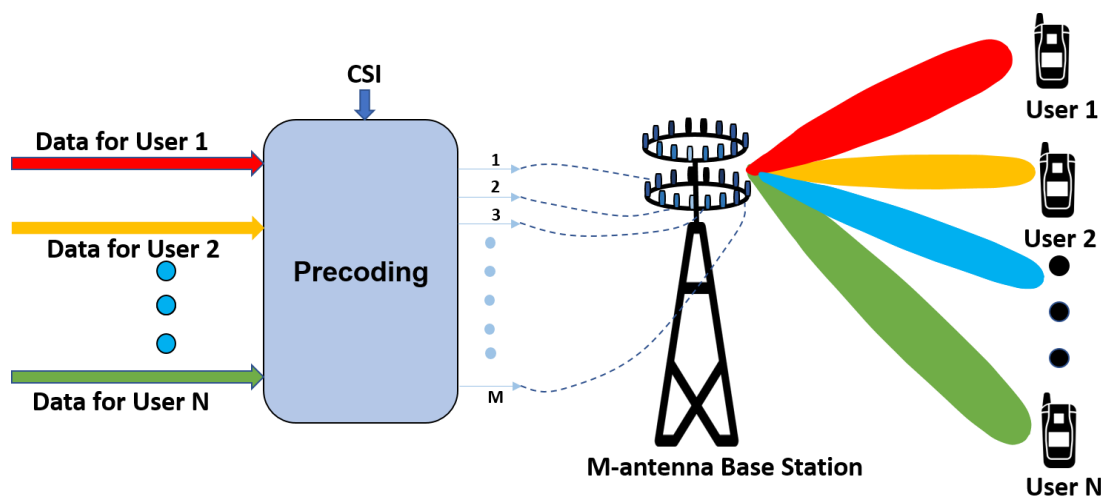


Рис. 3.8. Попереднє кодування в масивній системі MIMO з M антенами на базовій станції, яка спілкується з N користувачами

Багато лінійних і нелінійних прекодерів було запропоновано для масивних систем MIMO. Хоча нелінійні прекодери, такі як Dirty Paper Precoding (DPP) Tomlinson Harashima precoding (TH) і Vector Perturbation (VP), забезпечують кращу продуктивність, ці методи мають дуже високу обчислювальну складність, коли у нас є велика антенна система. Лінійні прекодери, такі як об'єднання максимального співвідношення (MRC), Zero-Forcing (ZF) Regularized ZF (R-ZF), Water Filling (WF) і MMSE мають меншу обчислювальну складність і можуть досягати майже оптимальної продуктивності.

Планування користувача.

Масивний MIMO, оснащений великою кількістю антен на базовій станції, може спілкуватися з кількома користувачами одночасно. Одночасне спілкування з кількома користувачами створює перешкоди для кількох користувачів і погіршує пропускну здатність. Методи попереднього кодування застосовуються під час низхідної лінії зв'язку, щоб зменшити ефект багатокористувацьких перешкод, як показано на рис. 3.9. Оскільки кількість антен обмежена в масивній базовій станції MIMO, якщо кількість користувачів стає більше, ніж кількість антен, правильне

Схема планування користувача застосовується перед попереднім кодуванням для досягнення більш високої пропускної здатності та продуктивності сумарної швидкості.

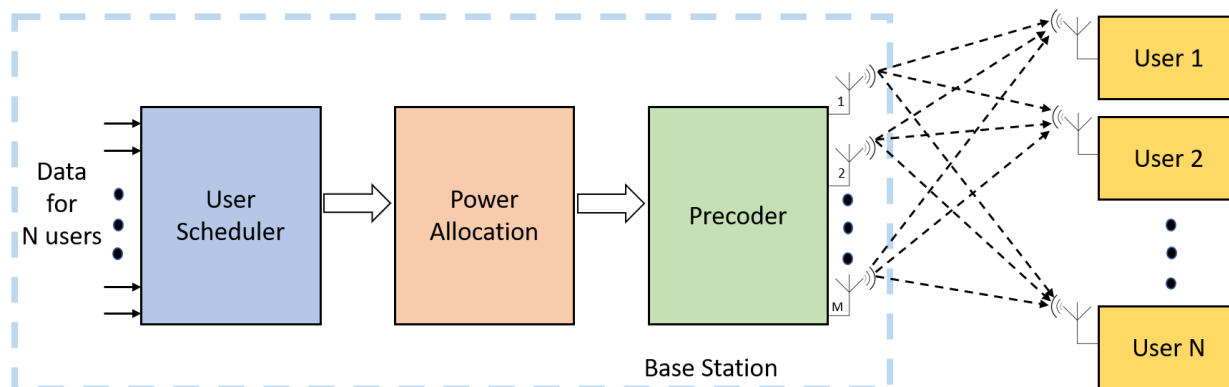


Рис. 3.9. Масове планування користувачів MIMO.

За останні кілька років було проведено численні дослідження щодо пошуку оптимального алгоритму планування для масивного MIMO. Кілька лінійних методів, таких як ZF і MMSE, забезпечують майже оптимальну продуктивність і мають прийнятну обчислювальну складність.

Апаратні порушення. Масивна система MIMO залежить від великої кількості антен, щоб зменшити ефект шуму, завмирання та перешкод. Велика кількість антен у масивному MIMO збільшує складність системи та збільшує вартість обладнання. Для розгортання масивного MIMO його слід створювати з низькою вартістю і малими компонентами, щоб зменшити складність обчислень і розмір апаратного забезпечення. Використання недорогого компонента збільшить недоліки апаратного забезпечення, такі як фазовий шум, шум намагнічування, спотворення підсилювача та дисбаланс IQ.

Ці недоліки мають серйозний вплив на загальну продуктивність системи. Через велику кількість антен між елементами антени виникає взаємне зчеплення, що змінює опір навантаження та викликає спотворення. Незважаючи на те, що масивний MIMO обіцяє зменшити потужність випромінювання в 100 разів, ніж звичайні системи MIMO, споживання енергії апаратними засобами основної смуги

Хоча масивний MIMO дає величезні переваги, все ще існують різні проблеми, такі як забруднення пілот-сигналу, оцінка каналу, попереднє кодування, планування користувачів, погіршення обладнання, енергоефективність та виявлення сигналу, які необхідно вирішити та протестувати у реальному середовищі, перш ніж ми зможемо досягти обіцяних переваг. Ці проблеми розгортання у масових системах MIMO підштовхнули як наукові кола, і промисловість до того, щоб зосередитися на масових системах MIMO. Крім того, нові технології, такі як масивний MIMO, надмасивний MIMO, міліметрові хвилі, терагерцеві хвилі та зв'язок у видимому світлі, потребують великої кількості досліджень, перш ніж вони будуть впроваджені в нашу поточну бездротову систему. Ось деякі з можливих тем дослідження масового MIMO для мереж 5G та вище:

- Масивна система MIMO залежить від великої кількості антен, щоб зменшити вплив шуму, завмирання та перешкод. Велика кількість антен у масивній MIMO збільшує складність системи та збільшує вартість обладнання. Щоб розгорнути масивний MIMO, він має бути побудований з використанням недорогих та невеликих компонентів, щоб зменшити обчислювальну складність та розмір обладнання. Недорогого обладнання збільшить недоліки обладнання, такі як фазовий шум, шум намагнічування, спотворення підсилювача та дисбаланс IQ. Хоча апаратне погіршення може бути повністю усунуто, його вплив можна пом'якшити з допомогою належного використання алгоритмів компенсації. Розробка цих алгоритмів компенсації є гарною областю досліджень у галузі масового MIMO.
- Оскільки існує обмежена кількість ортогональних пілот-сигналів, які можуть використовуватися в певний час, забруднення пілот-сигналів стає однією з серйозних проблем масового розгортання MIMO. Забруднення пілотної версії збільшує перешкоди та обмежує досяжну пропускну здатність. Було проведено кілька досліджень щодо зменшення впливу пілотного забруднення. Однак існує потреба в оптимальному методі, що знижує його ефект. Таким чином, ефективні способи пом'якшення впливу пілотного забруднення – важлива сфера для дослідження.

- Хоча методи попереднього кодування збільшують пропускну здатність та зменшують перешкоди, вони збільшують обчислювальну складність усієї системи за рахунок додавання додаткових обчислень. Ця обчислювальна складність збільшується з великою кількістю антен. Таким чином, більш практично використовувати малоскладні та ефективні прекодера у масивному MIMO. Пошук ефективних методів попереднього кодування для масивних MIMO також є важливою сферою досліджень.

- Оскільки кількість антен у масивній базовій станції MIMO обмежена, планування користувачів має виконуватися, якщо кількість користувачів перевищує кількість антенних терміналів на базовій станції. Масова пропускну спроможність системи MIMO може бути збільшена тільки за рахунок планування користувачів, які зазнають хороших умов каналу. Але при використанні цієї схеми користувачі на межі осередку з поганими умовами каналу ігноруються та ніколи не плануються. Для підвищення загальної продуктивності системи необхідно забезпечити певну справедливість серед усіх користувачів. Було проведено кілька досліджень для досягнення ефективного алгоритму планування користувачів але оптимальна продуктивність не була досягнута. Необхідно провести подальші дослідження, щоб знайти ефективніший і справедливіший алгоритм планування, який може забезпечити вищу швидкість передачі даних та гарантувати справедливість для користувачів.

- У масивних системах MIMO через велику кількість антен виявлення сигналу висхідної лінії зв'язку стає складним у обчислювальному відношенні і знижує досяжну пропускну здатність. Крім того, всі сигнали, що передаються користувачами, накладаються на базову станцію для створення перешкод, що також сприяє зниженню пропускну спроможності та спектральної ефективності. Недавній експеримент дозволив досягти майже оптимальної продуктивності, але для реалізації масивного MIMO потрібні ефективніші алгоритми. Одна из важнейших областей исследования - найти более эффективный и менее сложный алгоритм обнаружения сигнала восходящей линии связи.

- Точна CSI необхідна масивної MIMO для формування діаграми спрямованості даних, виявлення користувальницького сигналу і розподілу ресурсів. Користувальницький термінал повинен оцінити сигнал, що надходить від великої кількості антен на базовій станції. Крім того, значно зростають службові дані пілот-сигналу. Таким чином, ефективна схема оцінки каналу з розумними витратами накладними пілот-сигналу - захоплююча область для дослідження, особливо для схеми FDD.

- Цікавою областю досліджень у галузі масового MIMO буде об'єднання його із квантовим зв'язком із частотою вище 300 ГГц.

- Технологія Massive MIMO використовуватиметься для користувачів, які мають велику кількість антен. Масивна конструкція приймача MIMO, складність і продуктивність повинні бути перевірені на користувачах, що мають велику кількість антен.

- Дослідження потенційних ключових технологій для мереж 6G, таких як зв'язок у ТГц діапазоні, зв'язок у видимому світлі та голографічне радіо, також є цікавою областю для дослідження.

- Потрібні подальші дослідження для реалізації UM-MIMO ТГц діапазону для мереж 5G та за його межами. Деякі з важливих областей для дослідження - це виготовлення плазмонних антен з нанорозмірними решітками, оптимальні методи оцінки каналів, низько-складне та ефективне попереднє кодування та алгоритми виявлення сигналів, точне формування променя та управління.

ВИСНОВКИ

Успішне і оперативне розгортання 5G-мереж визначається перш за все економічними чинниками і оцінюється з точки зору рентабельності. Там, де 5G-технологія зможе запропонувати, з урахуванням технічних переваг, досить близькі до попередніх мереж економічні параметри, проблем не виникне. Вибір не на їхню користь, не дивлячись на технологічну перевагу, буде там, де 5G-підходи обійдуться істотно дорожче або виявляться надмірними. У таких випадках доведеться чекати зближення економічних параметрів існуючих і перспективних мереж, формування потреб у нових послугах, які нівелюють фактор надмірності.

Важливою умовою розгортання 5G-мереж стане їх взаємодія із суміжними технологіями. Наприклад, для успішного впровадження 5G-мереж технологія крайових (прикордонних) обчислень стає не менш важливою, ніж технологія зв'язку з використанням хвиль міліметрового діапазону. Можна припустити, що 5G і крайові обчислення не доб'ються успіху поодиночі. Так, мережі 5G не можуть відповідати вимогу консорціуму 3GPP про час очікування не більше 4 мс без деякого шару доставки даних, запуску додатків і роботи з багаторівневими додатками в рамках непередбачуваного масиву інтелектуальних пристроїв. У свою чергу, крайові обчислення, спочатку розроблені менеджерами Інтернету речей як засіб збереження контролю за своїми даними, що не будуть функціонувати належним чином без надшвидкої бездротового зв'язку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Madden J. mmWave Will Be The Critical 5G Link // Microwave Journal. May 2. 2019. <https://www.microwavejournal.com/articles/32189-mmwave-will-be-the-critical-5g-link>.
2. Степунин А.Н. Технологія 5G: Майбутнє мереж мобільного зв'язку / М.К. Скачков. 2014. №8. с. 12.
3. Направление и тенденции развития новейших радиотехнологий на период до 2025 года. Возможные пути обеспечения радиотехнологий частотным ресурсом / В.В. Бутенко [та другі]. – Москва: Национальная радиоассоциация, 2015. – 131 с.
4. E. Kania, L. Sheppard. Why Huawei isn't so scary foreign policy, Oct. 12, 2019. [Online].
5. E. Feng, A. Cheng. China's tech giant Huawei spans much of the globe despite U.S. efforts to ban it. NPR, Oct. 24, 2019.
6. National League of Cities and Center for City Solutions and Applied Research, "City of the future – technology and mobility," White Paper 1301, Pennsylvania Avenue, Suite 550, Washington, DC, USA, 2015.
7. A. Ramaswami, A. G. Russell, P. J. Culligan, K. Rahul Sharma, and E. Kumar, "Meta-principles for developing smart, sustainable, and healthy cities," Science, vol. 352, no. 6288, pp. 940–943, 2016
8. D. R. Mart'inez, T. J. Gracia, E. M. Muñoz, and A. C. García, "Smart cities' challenge: how to improve coordination in the supply chain," in Sustainable Smart Cities, Innovation, Technology, and Knowledge Management, pp. 129–142, Springer International Publishing, 2016.
9. D. Minoli and B. Occhiogrosso, "IoT applications to smart campuses and a case study," European Union Digital Library, vol. 5, article e4, pp. 2518–3893, 2017
10. A. Roy, J. Siddiquee, A. Datta et al., "Smart trafс & parking management using IoT," in Proceedings of the IEEE 7th Annual Information Technology, Electronics and

- Mobile Communication Conference (IEMCON), IEEE, Vancouver, BC, Canada, 2016.
11. M. Alam, J. Ferreira, and J. Fonseca, “Introduction to intelligent transportation systems,” in *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 52 of *Studies in Systems, Decision and Control*, pp. 1–17, Springer International Publishing, 2016.
 12. Statista, Internet of things (IoT) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025 (in billions), 2015, [https://www .statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/](https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/).
 13. GSMA, Road to 5G: introduction and migration, 2018, GSMA, Road to 5G: introduction and migration, 2018, <https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2018/04/Road-to-5G-Introduction-and-Migration FINAL.pdf>.
 14. Ericsson Mobility Report ON THE PULSE OF THE NETWORKED SOCIETY. 2016.
 15. Технічний звіт 3GPP TR21.916 V0.1.0 Release 16 2019/09/12.
 16. ITU-R, IMT Vision Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and beyond, Recommendation ITU-R M.2083, September 2015.
 17. Технічна документація 3GPP TS 23.502 3GPP version 15.4.1 Release 15 ETSI TS 123 502 V15.4.1 (2019-03),
 18. Технічна специфікація 3GPP TR 21.916(TS 23.501 V15.0.0), V0.1.0, Release 16, 2019-09
 19. *Степутин, А.Н.* Технология 5G: будущее сетей мобильной связи / А.Н. Степутин, М.К. Скачков // *Мобильные телекоммуникации*, – 2014. – № 8 – 10. – С. 12–16.
 20. Тихвинский, В.О. Перспективы развития сетей 5G: технологии и особенности использования спектра / В.О. Тихвинский // XI ежегодный семинар ООО “Инфотел”, 18–19 июня 2014, г. Санкт-Петербург.
 21. *Варукина, Л.А.* 5G: В новый 2017 год – с новым стандартом 5G. Обзор технологии и статус стандартизации / Л.А. Варукина. <http://www.mforum.ru/news/article/117626.htm>.

22. "NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 15)", 3GPP TS 38.104 V15.5.0, April 2019
23. Ericsson, Telstra and Intel Get Multi-vendor 5G Commercial Network Data Call Over Licenced 3.5GHz Spectrum. (2018). Wireless News, July 20, 2018.
24. Keysight, Nokia collaborate to verify 5G coverage in live test network. (2018). EE-Evaluation Engineering, 57(11), 5.
25. "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 15)", 3GPP TR 38.901 V15.0.0, June 2018.
26. Rohde & Schwarz, [5G NR Base Station Transmitter Tests](#). Version 1e, 06.2020, testing according to TS 38.141-2, Rel. 16.

Статті , конференції

1. Дакова Л.В., Фенченко Д.В. II Міжнародна науково-практична конференція «Telecommunication: problems and innovation 22 квітня квітня 2021р. С. 90-91.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ