

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційного проєкту:

«Інформаційне забезпечення блока передачі даних з просторовим кодуванням».

Автор роботи: Слободян Владислав Миколайович

Керівник роботи: к.т.н., доцент Стрембіцький Михайло Олексійович

Пояснювальна записка: сторінок 77, рисунків 34, джерел 15.

Графічна частина: презентаційних слайдів 9.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ПРОСТОРОВЕ КОДУВАННЯ СИГНАЛІВ, КАНАЛ МІМО, КОРЕЛЯЦІЯ

Метою кваліфікаційного проєкту є дослідження блоку передачі даних з просторовим кодуванням сигналів, визначення коефіцієнту бітових помилок.

Розглянуті принципи створення систем з кодуванням сигналів у просторі, переваги використання систем МІМО. Проведено розрахунок і моделювання МІМО-каналу. Системи МІМО відрізняються максимальною доступною пропускною здатністю, яка зменшується при наявності кореляції між сигналами у каналах. При прямій видимості передавача та приймача система МІМО забезпечує оптимальне співвідношення сигнал-шум, коли передавач направляє промінь у бік приймача. Ефективність передачі каналу МІМО на 12 дБ перевершує ефективність каналу SISO. Досліджено структуру МІМО-каналу, а також технології, такі як фазовані антенні решітки, управління променем та формування діаграм спрямованості, які сприяють підвищенню пропускної здатності.

Зміст

| | |
|---|-----------|
| ВСТУП | 6 |
| 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА | 8 |
| 1.1 Технологічна еволюція систем міліметрового діапазону | 8 |
| 1.2 Сценарії розгортання систем зв'язку п'ятого покоління | 9 |
| 1.3 Формування діаграми спрямованості | 11 |
| 1.4 Радіотракт перетворення сигналів міліметрових хвиль | 17 |
| 1.5 Масивні системи МІМО | 21 |
| 1.6 Збільшення пропускнуої спроможності каналу МІМО | 24 |
| Висновки до першого розділу | 27 |
| 2 ОСНОВНА ЧАСТИНА | 28 |
| 2.1 Частотний спектр стандарту 5G | 28 |
| 2.2 Якість сигналів у міліметровому діапазоні | 30 |
| Висновки до другого розділу | 34 |
| 3 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА | 34 |
| 3.1 Структура каналу МІМО | 35 |
| 3.2 Формування діаграми спрямованості антени | 43 |
| 3.3 Застосування МІМО та формування діаграми спрямованості | 45 |
| 3.4 Цілісність каналу міліметрового діапазону | 47 |
| Висновки до третього розділу | 48 |
| 4 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА | 49 |
| 4.1 Принципи організації каналів МІМО | 49 |
| 4.2 Просторово-часове блочне кодування | 53 |
| 4.3 Формування променя для систем МІМО-OFDM | 58 |
| 4.4 Вплив взаємного зв'язку антен у системі МІМО | 61 |
| 4.5 Підсилення сигналів при рознесенні | 66 |
| Висновки до четвертого розділу | 73 |
| 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ | 73 |
| 5.1 Основні причини виробничих травм та професійних захворювань | 73 |
| 5.2 Методи дослідження виробничого травматизму | 74 |
| ВИСНОВКИ | 76 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ | 77 |

ВСТУП

Зростання обсягу бездротового передавання даних у всьому світі створює значний тиск на існуючі системи бездротового зв'язку. Обмежені ресурси доступного спектра змусили інженерів у галузі телекомунікацій шукати альтернативи у міліметровому діапазоні, де використання невеликих випромінюючих елементів стає необхідністю. Це зменшення розмірів антенних елементів ідеально відповідає вимогам масивних MIMO і робить великомасштабні антенні решітки перспективною технологією. Збільшена кількість антенних елементів призводить до покращення продуктивності та відношення сигнал/завади плюс шум (SINR). У традиційних системах MIMO максимальна кількість антенних елементів становить 8 на стороні передавача і 8 на стороні приймача (система MIMO 8×8). Проте в масивних MIMO і залежно від прототипу для нового радіо 5G, 256 антен може підтримувати базова станція, а антени обладнання користувача до 32. Збільшуючи кількість антенних елементів решітки дозволить суттєво покращити пропускну здатність та покриття стільникових мереж. Ефективніше подолати втрати на трасі через високі частоти дозволить використання більшої кількості елементів, концентруючи енергію в потрібних напрямках за допомогою кількох антенних елементів. Це введення методів формування променя в MIMO, яке концентрує радіоенергію в обмежених кутових секторах, що призводить до значного покращення спектральної ефективності. За введенням масивного MIMO з'явився новий перспективний метод, що використовує простір у трьох вимірах. Це відомо як 3D MIMO і досягається розгортанням антен як по горизонталі, так і по вертикалі. Для досягнення 3D MIMO потрібно реалізувати 3D формування променя, що дозволяє базовій станції динамічно керувати напрямками передачі як по азимуту, так і по вертикалі. Це підвищує продуктивність системи та відповідає зростаючому попиту на ємність. Використання систем MIMO вимагає удосконалення формування діаграми спрямованості, врахування зворотного зв'язку, що містить інформацію про стан каналу, та врахування

моделі антенної решітки з діаграмою спрямованості/поляризацією для масивних систем MIMO та 3D MIMO. Створення променя суттєво зменшує втрати потужності в зоні покриття, що призводить до менших спотворень та збільшує спектральну ефективність за рахунок використання просторового мультиплексування. Це також сприяє значній економії енергії.

Для MIMO були розглянуті сценарії, спрямовані на забезпечення надійних схем передачі. Питання, пов'язані з поліпшенням управління променем, відновленням після відмови променя та зниження затримки, а також високоефективною передачею у міліметровому діапазоні, є актуальними напрямками досліджень.

Мета кваліфікаційного проекту полягає в дослідженні каналу передачі даних з просторовим кодуванням. Для досягнення цієї мети сформульовані наступні завдання:

- Детальне вивчення принципів побудови систем з просторовим кодуванням сигналів;
- Проведення моделювання каналу MIMO у середовищі MATLAB;
- Аналіз коефіцієнта бітових помилок.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Технологічна еволюція систем міліметрового діапазону

Сьогодні галузь розвитку технологій 5G акцентується, переважно, на удосконаленні мобільного широкосмугового зв'язку, спрямованого на розширення пропускної здатності мережі за допомогою методів формування діаграми спрямованості в середній та верхній частині спектра частот. Системи 5G знаходять застосування в промисловій автоматизації завдяки низькій затримці сигналів у таких мережах. Розглянемо ключові сценарії використання сигналів міліметрового діапазону для зв'язку. Важливо розглянути архітектуру та технології побудови базових станцій у міліметровому діапазоні. Необхідно також врахувати питання формування діаграми спрямованості та впливу потужності передавача на вибір технології його створення. Навіть при великій увазі до процесу формування діаграми спрямованості, не менш важливим є процес перетворення сигналів для їх передачі у міліметровому діапазоні.

Лише кілька років тому велишалася дискусія щодо використання міліметрового діапазону для мобільного зв'язку і вирішення відповідних проблем розробниками радіопристроїв. Багато питань вдалося вирішити, і відзначився швидкий прогрес у створенні пристроїв для систем 5G – від перших прототипів до успішних польових випробувань. Зараз ми переходимо на початковий етап розгортання мереж 5G у міліметровому діапазоні. Багато з того, що було актуальним у фіксованому та мобільному зв'язку, залишиться, проте ми також очікуємо на розвиток справжнього мобільного зв'язку на частотах міліметрового діапазону.

Перші стандарти, які були введені в дію, сприяли швидкому розвитку технологій, і багато аспектів розгортання систем міліметрових хвиль стали більш зрозумілими. Незважаючи на значний прогрес, розробники радіоапаратури все ще стикаються з рядом складних завдань, які вимагають вирішення.

1.2 Сценарії розгортання систем зв'язку п'ятого покоління

У процесі розробки технології визначення способу розгортання комунікаційної системи є крайньою важливістю. На рисунку 1.1 подані ілюстрації організації фіксованого та мобільного зв'язку у діапазонах 39 та 28 ГГц в міських умовах, де спостерігається щільна забудова, а також на передмісті, де густина забудови є значно меншою.

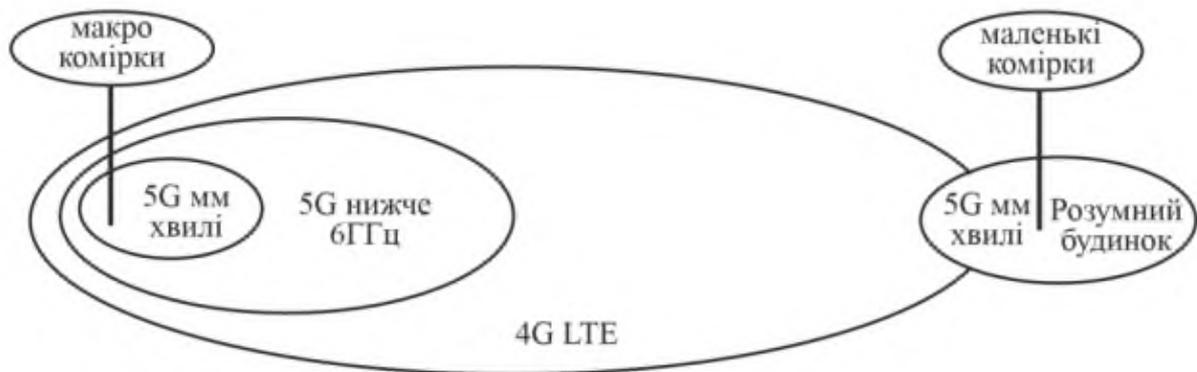


Рисунок 1.1 – Діапазон міліметрових хвиль в фіксованого та мобільного зв'язку

Важливим етапом у використанні фіксованого бездротового доступу (FWA - Fixed Wireless Access), який забезпечує високу пропускну спроможність каналів зв'язку в передмістях, є формування діаграми спрямованості. Базова станція розташовується на опорі лінії електропередач або на щоглі з метою забезпечення покриття великої території та доцільності рішення. У цьому сценарії обладнання споживача розташоване за межами будинку для оптимальних умов зв'язку.

Враховуючи, що антена базової станції спрямована вниз і розташування користувачів зафіксовано, вимагається не широкий кут охоплення діаграми спрямованості у вертикальній площині. Проте, потужність передавача повинна бути достатньо великою, не менше 65 дБм EIRP (ефективна потужність ізотропного випромінювання), для забезпечення максимально широкої зони

обслуговування існуючої інфраструктури. Схема формування діаграми спрямованості антен базової станції за різними променями представлена на рисунку 1.2.

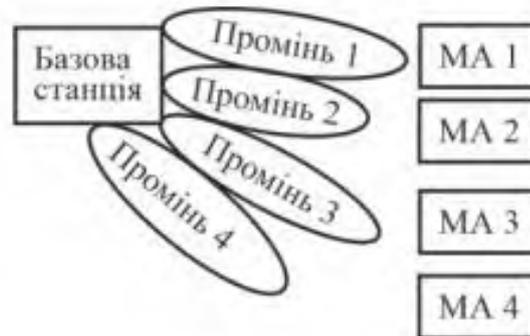


Рисунок 1.2 – Схема формування діаграми спрямованості антен

Розташування базової станції може бути на даху будівлі або на освітлювальній опорі, що потребує розширення кута охоплення діаграми спрямованості у вертикальній площині. Це обумовлено необхідністю обслуговування мобільних пристроїв, розташованих на рівні землі (пішоходи та транспортні засоби), а також пристроїв, що знаходяться на більш високих рівнях будівель, ніж та, на якій встановлено базову станцію.

У такому випадку потужність передавача може знадобитися меншою, але нахил багатьох будівель вносить значний згасання сигналу, тому однозначної відповіді на це питання не існує. Основний висновок полягає в тому, що не існує універсального рішення. Сценарій розгортання мережі 5G буде визначати спосіб формування діаграми спрямованості антени та вибір технології зв'язку.

Для більш конкретного розуміння ситуації, давайте розглянемо важливі аспекти втрат у тракті зв'язку в діапазоні міліметрових хвиль. Ці втрати виникають внаслідок впливу різноманітних перешкод, таких як стіни будівель, які можуть значно впливати на проникнення сигналу. Листя дерев, тіла людей та інші елементи також вносять свої втрати в процес передачі сигналу. У порівнянні з традиційними стільниковими мережами, втрати в міліметровому

діапазоні виявляються великим викликом, який потребує докладного вирішення для забезпечення ефективного зв'язку.

Багато наукових робіт, які виходили в останні роки, присвячені вивченню поширення сигналів у діапазоні міліметрових хвиль. Зокрема, стаття "Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks - with a Focus on Propagation Models" надає важливий узагальнений огляд цієї теми. Робота проводить порівняльний аналіз різних моделей, розкриває вплив втрат в тракці від навколишнього середовища та порівнює сценарії, коли базова станція перебуває в полі зору (Line Of Sight - LOS) та поза полем зору (NLOS) приймача. Загально взято, важливо розглядати сценарії NLOS, особливо для фіксованого бездротового зв'язку, враховуючи бажану дальність зв'язку та місцевий ландшафт.

Давайте проаналізуємо конкретний випадок для кращого розуміння вимог до потужності передавача базової станції в діапазоні міліметрових хвиль. У випадку передмістя з базовою станцією та зоною покриття радіусом 200 метрів втрати в тракці складають 135 дБ, за умови, що приймальна антена розташована за межами будівлі. Якщо розглядати внутрішнє розташування антени, втрати в тракці збільшаться на 30 дБ. З іншого боку, в умовах LOS сценарію, втрати в тракці можна зменшити до 110 дБ.

У розглянутому прикладі базова станція має 256 елементів антени, а антена користувача - 64. Здійснюється асиметричний зв'язок, де базова станція використовує модуляцію 64QAM у низхідному каналі, а висхідний канал використовує модуляцію 16 QAM. Потужність передавача висхідного каналу може бути збільшена для поліпшення зв'язку на відстані 500 метрів, що призводить до збільшення втрат в тракці до 150 дБ. Реалізація такого сценарію вимагає використання складніших пристроїв як у низхідному, так і висхідному каналі, а також призводить до значного споживання енергії.

1.3 Формування діаграми спрямованості

Розглянемо різні підходи до створення діаграми спрямованості антени: аналоговий та цифровий, як видно на рис. 1.3 та рис. 1.4. Це пов'язано з концепцією аналогового методу формування діаграми спрямованості.

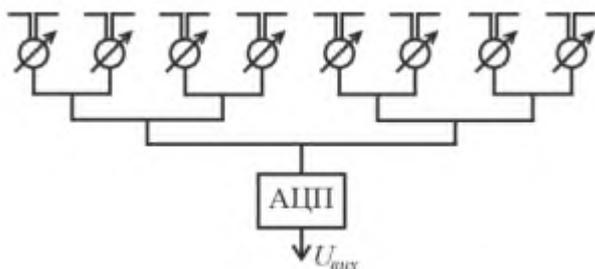


Рисунок 1.3 – Аналогова схема формування діаграми спрямованості антени

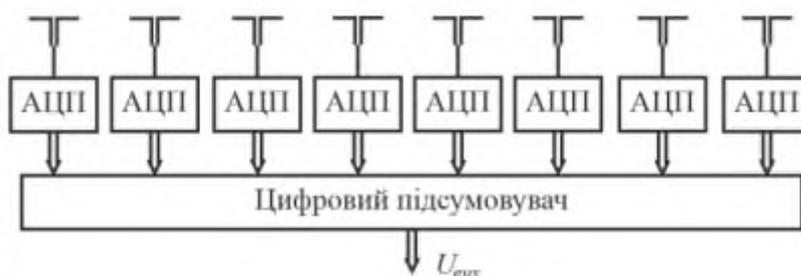


Рисунок 1.4 – Цифрова схема формування діаграми спрямованості антени

У режимі передачі цифрові сигнали перетворюються на аналогові за допомогою цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) і потім конвертуються в сигнали високої або проміжної частоти за допомогою підвищуючих перетворювачів частоти. У режимі приймання перетворювачі здійснюють зниження частоти отриманих сигналів, перетворення їх у цифровий формат і передачу в блок цифрової обробки. У радіочастотному діапазоні, такому як 28 ГГц, один канал розбивається на кілька підканалів. Змінюючи фазу сигналу в кожному з них, формується діаграма напрямку в далекому полі, спрямована на передбачуваного користувача, і це стосується як режиму передачі, так і режиму приймання. Цей підхід дозволяє ефективно керувати напрямком діаграми напрямку для кожного каналу даних, що теоретично дозволяє обслуговувати одного користувача в будь-який момент часу.

Цифровий формувач діаграми спрямованості працює за тим самим принципом, але фазовий зсув сигналів відбувається у цифровій формі. Далі цифрові сигнали із різною затримкою подаються на цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), які перетворюють їх у аналогові сигнали. Ці сигнали, через підвищуючі перетворювачі та підсилювачі потужності (у режимі передачі), спрямовуються на елемент антени. У режимі приймання сигнал від цього елемента антени через малошумний підсилювач, понижуючий перетворювач і аналого-цифровий перетворювач (АЦП) вводяться у блок цифрової обробки. Принципово, кожен приймач-передавач пов'язаний з елементом одиночної антени, але на практиці може бути підключено кілька елементів антени до одного приймача, в залежності від бажаної форми сектора діаграми спрямованості.

Цифровий підхід забезпечує високу пропускну здатність і гнучкість системи, дозволяє застосовувати системи МІМО в діапазоні міліметрових хвиль, аналогічно тим, що діють в середній смузі частот. Реалізація цього підходу є складною, і наявні технології та елементна база призводять до значного енергоспоживання як у радіочастотних, так і цифрових ланцюгах. Проте з розвитком технологій цифрове формування діаграми спрямованості буде все більше використовуватися в діапазоні міліметрових хвиль.

Найбільш практичним і ефективним підходом до формування діаграми спрямованості в найближчому майбутньому є гібридний цифро-аналоговий формувач. Цей підхід поєднує цифрове попереднє кодування та аналогове формування діаграми спрямованості для створення кількох пелюсток у просторі одночасно (просторове мультиплексування).

Фокусуючи вузькі пелюстки діаграми на передбачуваних користувачів, базова станція може ефективно використовувати один частотний діапазон для обслуговування кількох користувачів одночасно на визначеному часовому інтервалі. Хоча існують різні підходи до побудови гібридних формувачів, тут показаний метод з використанням решіток, який є практичним та реалізованим,

і фактично є модифікацією аналогових формувачів діаграм спрямованості. Зазвичай такі системи наразі підтримують від 2 до 8 цифрових потоків для обслуговування окремих користувачів або створення кількох рівнів МІМО для меншої кількості користувачів.

Далі важливий вибір технологій для аналогового формувача діаграми спрямованості, базового блоку для гібридного формувача. Систему аналогового формування діаграми можна розглядати як три блоки: цифровий блок перетворення цифрового сигналу в аналоговий сигнал міліметрового діапазону і сам формувач діаграми спрямованості. Всі компоненти високочастотної частини системи розташовані близько один до одного для зменшення втрат. Однак обрана структура визначається різними факторами, такими як форма та радіус дії сегмента, рівень потужності, втрати в тракці, теплові шуми і інші.

Необхідність розглядати різні рівні потужності передачі при розгортанні сценаріїв від невеликих областей до великих міських зон. Перетворення цифрових сигналів у аналогові сигнали міліметрового діапазону на базовій станції вимагає менше зусиль і може бути реалізовано з урахуванням поточних специфікацій для базових станцій, що дозволяє розробнику використовувати один і той же приймач для різних конфігурацій формувача діаграми спрямованості. Це відрізняється від сучасних систем стільникового зв'язку, де малосигнальна частина системи загальна для всіх платформ, а зовнішній інтерфейс адаптується до кожного випадку використання.

Ми спостерігаємо прогрес у технологіях для обробки сигналів на кожному етапі шляху від цифрового сигналу до антени під час переходу. Напевно, цифрові та змішані сигнали генеруються за допомогою пристроїв КМОП. В залежності від вимог базової станції усі вузли обробки сигналів можуть бути розроблені з використанням технології КМОП або, можливо, поєднанням технологій для досягнення оптимальної продуктивності. Наприклад, загальною конфігурацією є використання КМОП-перетворювачів

даних разом із високопродуктивним перетворенням ПЧ в ВЧ на основі технології SiGe.

Як показано пізніше, формувач діаграми спрямованості може бути реалізований за допомогою різних технологій відповідно до системних вимог. Вибір розміру антени та технології підсилювача потужності залежить від необхідної потужності передавача, підсилення антени та можливостей формування необхідного сигналу. Можлива реалізація формувача на одному кристалі кремнію або комбінація інтегрального формувача з дискретними підсилювачами потужності та малошумними підсилювачами.

Вибір технології підсилювача потужності ґрунтується на поєднанні необхідної потужності передавача, підсилення антени та можливості формування сигналу. Різні рівні потужності та різноманіття технологій пропонують різні переваги та недоліки, і їхній вибір визначається габаритами, масою, енергоспоживанням та вартістю. Для досягнення випромінюваної ефективної потужності 60 дБм оптимальний розмір антени становить 128-256 елементів, залежно від обраної технології підсилювача.

Давайте розглянемо це питання з іншого ракурсу. Зазвичай ефективна потужність 60 дБм вказує на фіксований радіозв'язок, проте це число може збільшуватися або зменшуватися залежно від необхідного радіусу дії базової станції та характеристик оточуючого середовища. З урахуванням значних розходжень у сценаріях розгортання, чи то в області з великою кількістю зелених насаджень, чи то в складному міському середовищі з вузькими вуличками чи широкими відкритими просторами, очікується значна різниця у втратах радіоканалу. Це вимагає індивідуального підходу в кожному конкретному випадку.

Наприклад, в міських умовах з щільною забудовою, де передбачається пряма видимість до базової станції, ефективна потужність може бути меншою, наприклад, 50 дБм. Такі варіації враховують реальні умови розгортання і

дозволяють оптимізувати параметри для забезпечення ефективності зв'язку в конкретному оточенні.

У даному контексті існують визначення, опубліковані специфікації та рекомендації щодо меж передавальної потужності, які визначені FCC (Федеральною комісією зв'язку США) для різних класів обладнання [3]. В цьому випадку дотримується термінології 3GPP для базових станцій [3]. Вибір технології для створення підсилювача потужності в певній мірі визначається класом обладнання. Наприклад, технологія CMOS (КМОП) чудово підходить для мобільного обладнання, такого як мобільні телефони, і при відносно низькій кількості антен дозволяє досягти необхідної потужності передавача, забезпечуючи високий рівень інтеграції та енергоефективність.

Мобільні станції та обладнання для малих стільників мають схожі вимоги і використовують різні технології, такі як CMOS для низьких вимог до потужності передавача або комбінації SiGe і CMOS для більш високих рівнів потужності. Для базових станцій середнього радіусу дії ідеально підходять технології SiGe та CMOS, що дозволяють досягти компактного форм-фактора. У випадку глобальної мережі базових станцій існує ряд технологій, які можуть бути застосовані, залежно від компромісу між розміром антени та вартістю технології. Технології, такі як GaAs або GaN, є практичними для високих рівнів потужності.

Узагальнюючи, існуючі технології постійно удосконалюються з метою зниження енергоспоживання підсилювачів потужності міліметрового діапазону, що є одним з ключових завдань для розробників, як вказано у презентації "Architectures and Technologies for the 5G mm Wave Radio" [5].

З появою нових технологій та архітектур підсилювачів потужності передбачається, що наведені криві будуть зазнавати зміщень, в результаті чого для базових станцій високої потужності будуть доступні більш високоінтегровані структури. Щодо досягнень у технології виготовлення підсилювачів потужності, цей аспект детально розглядається у презентації "A

Short Survey on Recent Highly Efficient cmWave 5G Linear Power Amplifier Design".

Підсумовуючи розділ про формувачі діаграми спрямованості, важливо відзначити, що на даний момент відсутній універсальний підхід до побудови цих пристроїв, і розробники повинні створювати різні зовнішні інтерфейси для різних сценаріїв використання, враховуючи призначення конкретного пристрою.

1.4 Радіотракт перетворення сигналів міліметрових хвиль

У цьому розділі докладніше розглянемо методи побудови радіотрактів для перетворення цифрових сигналів на ВЧ-сигнали в діапазоні міліметрових хвиль та реалізації зворотного перетворення. Високоточне цифро-аналогове та аналого-цифрове перетворення є критичним для успішної реалізації методів модуляції високого порядку, таких як 64 QAM і, можливо, 256 QAM, у наступних системах.

Однією з головних проблем нових систем зв'язку, зокрема 5G в діапазоні міліметрових хвиль, є необхідність забезпечити велику пропускну спроможність. Системи 5G, які працюють у діапазоні міліметрових хвиль, повинні надавати смугу пропускання 1 ГГц або навіть ширше, в залежності від конкретних вимог до каналу передачі. Наприклад, смуга пропускання 1 ГГц у діапазоні 28 ГГц характеризується порівняно низькою відносною пропускну здатністю (3,5%), тоді як та ж сама смуга пропускання у діапазоні 3 ГГц реалізується набагато складніше і потребує нових технологічних та конструктивних рішень.

Функціональна схема перетворення цифрових сигналів на ВЧ-сигнали міліметрового діапазону може бути реалізована за допомогою широкосмугових компонентів від компанії Analog Devices, спеціально призначених для обробки змішаних сигналів.

Цей сигнальний ланцюжок розроблено для обробки високочастотних сигналів в діапазоні частот від 800 МГц до 28 ГГц, і він вражає низьким рівнем вектора помилки. Детальніше про характеристики та функціонал цього сигнального ланцюжка можна дізнатися, переглянувши відео від Analog Devices з назвою "5G Millimeter Wave Base Station" [8].

Розглянемо перетворювачі сигналів на прикладі, зображеному на рис. 6. Вхідний ВЧ-сигнал конвертується в проміжну частоту (ПЧ), значення якої обирають у діапазоні до 3 ГГц (іноді вище). Цей процес виникає через складність реалізації фільтра проміжної частоти (ФПЧ) і аналого-цифрового перетворення (АЦП). АЦП виконує перетворення в цифровий код на проміжній частоті. Для роботи на високих частотах, компанія Analog Devices представляє аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі. Серед них є високоефективний двоканальний 16-розрядний ЦАП AD9172, з максимальною частотою дискретизації 12,6 ГГц та широкосмуговим діапазоном до 6 ГГц. У приймальному тракті використовується двоканальний 14-розрядний АЦП AD9208 з максимальною частотою дискретизації 3 ГГц та смугою пропускання аналогової частини не менше 9 ГГц. В обох трактах використовуються широкосмугові підсилювачі з цифровим керуванням, такі як ADL5335 та ADL5569, що виконують не лише посилення сигналів, але й перетворення несиметричних сигналів на симетричні і навпаки. Для формування сигналу проміжної частоти в приймальному тракті використовується понижувальний перетворювач ADMV1014, а в передавальному - підвищує ADMV1013. Ці перетворювачі розроблені для роботи в діапазоні 245-435 ГГц, що охоплює всі поточні діапазони частот 5G міліметрового діапазону (n257, n258, n260 і n261).

Обидва перетворювачі, ADMV1013 та ADMV1014, забезпечують роботу з проміжною частотою (ПЧ) до 6 ГГц та мають два режими перетворення частоти. Вони включають вбудований 4-кратний помножувач частоти, частота на вході якого може змінюватися в діапазоні від 5,4 до 11,75 ГГц. ADMV1013 підтримує як пряме перетворення з I/Q-складових ВЧ-сигналу, так і перетворення в сигнал з однією бічною смугою. Коефіцієнт посилення

перетворювача становить 14 дБ, рівень інтермодуляційних спотворень третього порядку (IP3) досягає 24 дБм. При формуванні односмугового сигналу друга бічна смуга послаблюється принаймні на 25 дБ.

ADMV1014 виконує перетворення ВЧ-сигналів, підтримуючи одну або обидві бічні смуги в складові I/Q при зниженні частоти. Його характеристики включають коефіцієнт перетворення 20 дБ, коефіцієнт шуму 3.5 дБ, рівень інтермодуляційних спотворень третього порядку IP3 на рівні -4 дБм, та придушення бічної смуги на рівні 28 дБ.

Широкопосмуговий перемикач ADRF5020 відповідає за комутацію антени в режимах передачі/прийому, характеризується низькими втратами (до 2 дБ) і значним перехідним загасанням -60 дБ на частоті 30 ГГц.

Джерело сигналів стабільної частоти, ADF4372, є широкопосмуговим синтезатором із системою ФАПЧ та дробовим коефіцієнтом поділу. Забезпечується інтегрований генератор, керований напругою (ГУН), який має наднизький фазовий шум та працює в діапазоні частот від 62,5 МГц до 16 ГГц. Спектральна щільність фазового шуму ГУН на частоті 8 ГГц становить -111 дБн/Гц при відхиленні на 100 кГц від центральної частоти та -134 дБн/Гц при відхиленні на 1 МГц.

Ця функціональна схема, зображена на рис. 6, слугує відмінною відправною точкою для розробників, які працюють у діапазонах частот 28 і 39 ГГц. Вона може бути використана в системах з різними варіантами формування діаграми спрямованості антени, вимагаючи застосування широкопосмугових приймачів. Компанія Analog Devices пропонує різноманіття компонентів для роботи в частотних діапазонах міліметрових хвиль.

В системах з багатьма антенними каналами, де кількість передавальних антен обмежена кількістю приймальних антен ($N_t < N_r$), можна досягти високих швидкостей передачі даних без необхідності адаптації, якщо параметри каналу відомі на передавачі. У системі MIMO з N_t передавальними та N_r приймальними антенами, при $N_t \leq N_r$, вхідний потік даних розбивається на N_t

підпотоків. Цей поділ виконується за допомогою послідовнопаралельного демультиплексора (див. рисунок 1.5).

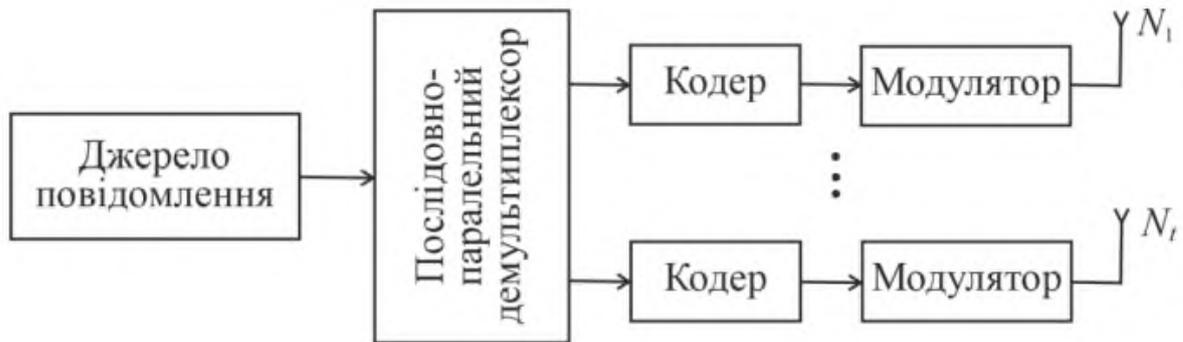


Рисунок 1.5 – Передавач МІМО-системі зв'язку

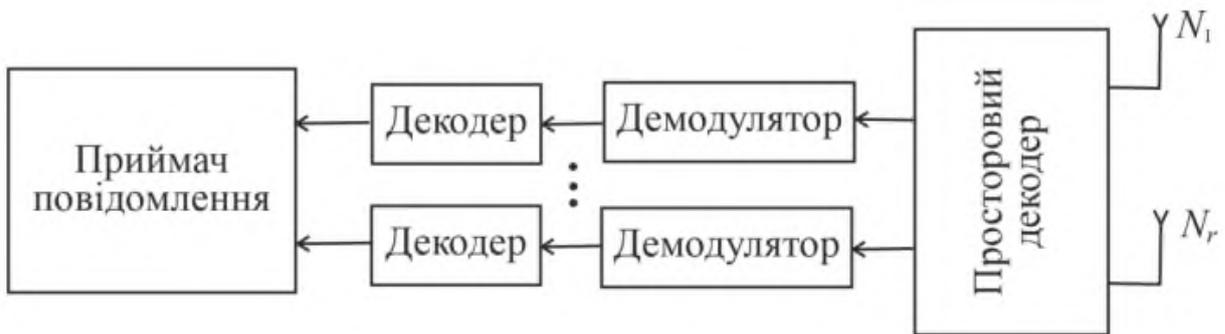


Рисунок 1.6 – Приймач МІМО-системі зв'язку

Кожен з N_t підпотоків після кодування та модуляції випромінюється окремою антеною. Усі ці N_t підпотоків випромінюються одночасно в одній і тій же смузі частот. Зауважте, що для всіх підпотоків можуть використовуватися ідентичні коди та модулятори.

Сигнали від N_t випромінених потоків створюють сигнали в кожній з N_r приймальних антен. Таким чином, сигнал у кожній приймальній антені представляє собою суму N_t випромінюваних сигналів, які помножені на комплексні передавальні функції від відповідних передаючих антен до аналізованої приймальної антени. Можна висловити вектор прийнятих сигналів

$z_t(t)$ як добуток матриці каналу H на вектор випромінюваних сигналів $u_t(t)$, до якого додається мірний вектор шуму $\xi(t)$ у відповідних місцях:

$$\vec{z}(t) = \mathbf{H}u(t) + \vec{\xi}(t)$$

де $\xi(t)$ - мірний вектор шуму.

Далі, у приймачі, розв'язується задача поділу та оцінки випромінюваних N_t сигналів. Це вимагає вирішення системи N_r рівнянь з N_t невідомими. У такій організації MIMO-системи зв'язку забезпечується передача інформації просторовими каналами, при цьому всі канали працюють в одній і тій же смузі частот і поділяються за рахунок просторового рознесення між випромінюючими та приймальними антенами.

Можливість одночасної передачі інформації через кілька просторових каналів пояснює високу спектральну ефективність багатоантенних систем, і їм приділяється значна увага в розробці високошвидкісних радіосистем. Для оцінки символів, що надходять, на приймальній стороні застосовується алгоритм BLAST. У BLAST-алгоритмі детектування N_t переданих сигналів (оцінка вектора $u_t(t)$) виконується протягом N_t ітерацій. Порядок, у якому вилучаються сигнали (компоненти вектора $u_t(t)$), значуще впливає на характеристики системи. На кожній ітерації виконуються три кроки: обчислення оцінки вектора ($u_t(t)$) з використанням MMSE-фільтра; оцінка символу p_1 х вектора $u_t(t)$, для якого значення $|h|^2$ є найбільшим; модифікація вектора $z_t(t)$ та матриці каналу H .

1.5 Масивні системи MIMO

Massive MIMO, або великомасштабне MIMO, сприяє підвищенню продуктивності систем 5G, забезпечуючи високу швидкість передачі даних та ефективне використання спектру, при цьому обслуговуючи значну кількість користувачів. Ця технологія дозволяє виконувати тривимірне формування

променя, забезпечуючи більше можливостей та збільшуючи кількість користувачів з високою пропускнуою здатністю.

Очікується, що Massive MIMO принесе більше переваг порівняно з іншими рішеннями щодо ефективності використання енергії та спектру. Це досягається завдяки фокусуванню випромінювання в напрямку передбачуваних користувачів, що дозволяє одночасно передавати сигнали багатьом користувачам з низьким рівнем перешкод. Такий підхід може значно збільшити пропускну здатність порівняно з традиційними антенними рішеннями, забезпечуючи спектральну ефективність, яка перевищує технологію 4G у декілька разів.

Проте для повного використання переваг Massive MIMO та подолання проблем реалізації в реальних умовах, необхідна складна радіосистема. Для формування променя необхідна значна кількість антен на базовій станції, що перевищує кількість абонентських пристроїв з одною антеною всередині комірки. Нова структура Massive MIMO дозволяє передавачам фокусувати енергію в дуже вузькій області за допомогою формування променя. Зі збільшенням кількості антен потужність краще концентрується у вузькому промені, що призводить до вищого рівня сигналу для кожного користувача, тоді як інші отримують менші сигнали.

Час, необхідний для проведення оцінки каналу в масивних системах MIMO, відомий як "навчання каналу", тісно пов'язаний із кількістю антен на базовій станції. Залежно від кількості антен, базові станції приймають різну кількість пілот-сигналів. Кількість цих сигналів визначається кількістю терміналів користувача (UE), і базові станції можуть навчатись паралельно, оскільки вони вимірюють сигнали від різних UE.

Паралельно з цим, кількість терміналів користувача може змінюватися відповідно до часу когерентності. Час когерентності визначає, протягом якого часу сота може ефективно обслуговувати користувачів. Збільшення часу

когерентності дозволяє обслуговувати більше користувачів в одній соті, що робить систему більш масштабованою та ефективною.

У системах з часовим поділом дуплексу (TDD), під час навчання каналу використовується інформація про стан каналу (CSI), щоб встановити якість каналу та рекомендувати відповідну матрицю передкодування. Оцінка CSI для каналу вниз здійснюється через вимірювання пілот-сигналів, переданих від користувачів, що працюють у верхньому напрямку. Це дозволяє системі використовувати взаємодію каналів у TDD.

У системі з частотним поділом дуплексу (FDD) канали вниз та вверх налаштовуються незалежно. Витрати часу на навчання каналу вниз пропорційні кількості антен. З цього приводу, використання великих антенних решіток може бути менш ефективним у FDD. Таким чином, необхідно забезпечити оцінку CSI в системі FDD.

У системі ортогонального частотного поділу мультиплексування (OFDM) опорні сигнали використовуються для оцінки каналу. В процесі зворотного зв'язку, користувач обчислює показник рангу (RI), який вказує на кількість оброблюваних одночасно потоків інформації на одних і тих самих частотних ресурсах. При низькому співвідношенні сигнал-шум (SNR) значення RI буде низьким. В цьому випадку один і той же потік передається всіма антенами базової станції, збільшуючи охоплення.

Індикатор якості каналу (CQI) використовується для опису SNR і передається користувачем базовій станції. Потім CQI транслюється в відповідний індекс схеми модуляції та кодування (MCS) на базовій станції. Індекс MCS вказує на порядок модуляції та кодову швидкість, які слід використовувати для підтримання якості каналу.

Крім цього, індикатор матриці попереднього кодування (PMI) використовується для надання базовій станції відомостей про найкращу матрицю попереднього кодування для ефективною передачі. PMI сповіщає базову станцію про те, як ефективно кодувати інформацію для передачі через

кожну антену, щоб обладнання UE могло ефективно відновлювати цю інформацію. Отже, PMI виконує роль індексу кодової книги, де записи описують розподіл або чергування інформації між антенами. Завдяки переданим опорним сигналам від антен базової станції, UE має інформацію про стан каналу. Параметр PMI визначає матрицю попереднього кодування, яку базова станція використовує для поточної передачі, незалежно від того, чи використовується SU-MIMO чи MU-MIMO.

Для ефективнішої оцінки інформації про стан каналу в LTE версії 10 TM9 використовується восьмирівневе просторове мультиплексування (TM9) з двома новими опорними сигналами. Перший - опорний сигнал інформації про стан каналу (CSI-RS) - є спільним для всіх користувачів у соті. Другий - опорний сигнал демодуляції (DMRS) - спеціально призначений для кожного UE. Користувачі використовують CSI-RS для розрахунку та повідомлення про зворотний зв'язок CSI (CQI/PMI/RI), а DMRS використовується для демодуляції сигналу та формування діаграми спрямованості.

Продуктивність систем MIMO обмежується точністю вимірювань CSI та зворотного зв'язку. Однак ключові удосконалення включають підвищення точності матриці попереднього кодування за рахунок аналогового зворотного зв'язку CSI і прискорення зворотного зв'язку CQI, що відображає реальну якість каналу за рахунок вимірювань CQI на попередньо запланованих CSI-RS.

Для масивного MIMO рекомендується двоетапне планування UE та метод зворотного зв'язку, де UE групуються, і зворотний зв'язок каналу повідомляється кожній групі. Порівняння з традиційними методами, такими як повна CSI і часткова CSI зі зворотним зв'язком, показало, що двоетапна схема надає спектральну ефективність, близьку до підходу з повним зворотним зв'язком CSI, при меншій кількості передавальних зворотних зв'язків порівняно з методом часткової CSI.

1.6 Збільшення пропускної спроможності каналу MIMO

Застосування антенної решітки в масивній системі МІМО дозволяє значно збільшити гнучкість і ступені свободи, особливо коли кількість антен на базовій станції великою мірою перевищує вектори попереднього кодування. Це особливо актуально для моделі антенної решітки у масивному МІМО. Одним з ефективних підходів є використання антенної решітки з діаграмою спрямованості та поляризацією.

Введення антенної решітки із здатністю формування променів у тривимірному просторі (BDMA) дозволяє створювати кілька секторів (B) замість одного, покращуючи тим самим спектральну ефективність системи. Ще один підхід - це використання схеми шаблону та поляризації, яка разом називається багатостанційним доступом із поділом шаблону/поляризації (P2BDMA).

За допомогою чотирьох різних типів елементів діаграми спрямованості/поляризації ($K = 4$), антенна решітка розділяється на K віртуальних антенних решіток, кожна з яких формує промінь, розподілений по

В секторах. Це дозволяє передавати (N, K) символів в одному часовому/частотному ресурсі, де N - кількість антен користувача.

Збільшення можливих шаблонів поляризації у майбутніх масивних МІМО підвищить кількість ступенів свободи, що призведе до ще більшої ефективності використання спектра. Це поліпшить пропускну здатність каналу за рахунок використання характеристик антен з низькою кореляцією та різною діаграмою спрямованості/поляризацією.

Розглянемо чотири різні системи, щоб визначити ефективність використання антенної решітки в масивній системі МІМО:

1. Одиночний 120-градусний сектор трисекторної системи ($N = 4$):
 - Традиційна трисекторна система з одним сектором ширше за звичайне.

2. 8-секторна система з однією антеною решітки вертикальною поляризацією (BDMA: $K = 1, N = 1$):
 - Система з однією антеною решітки, орієнтованою вертикально.
3. 8-секторна система з двома антеною решітками, вертикальною і горизонтальною поляризацією (BDMA: $K = 2, N = 2$):
 - Система з двома антеною решітками, кожна з різною поляризацією.
4. 8-секторна система з чотирма антеною решітками і різними діаграмами спрямованості/поляризаціями:
 - Система із чотирма антеною решітками, кожна з унікальною діаграмою спрямованості/поляризацією.

У масивному MIMO, з великою кількістю антенних елементів, виникає проблема зворотного зв'язку. Запропоноване рішення - схема угруповання антен (AGS), де CSI агрегується з груп антенних елементів та повертається UE. AGS може бути оптимізована шляхом групування антен і вибору діаграм спрямованості/поляризації відповідно до інформації про канал.

Для майбутніх потреб масивного MIMO розглядається технологія 3D MIMO, яка дозволяє управляти діаграмою спрямованості по азимуту та кутам за рахунок зміни вагових коефіцієнтів збудження антеної решітки. Це може бути важливим для вирішення обмежень простору при розміщенні великої кількості антенних елементів в системі 3D MIMO.

При використанні підвищеного 3D-MIMO разом із азимутом досягається покращення продуктивності середньої комірки та межі комірки у порівнянні зі звичайними системами MIMO, які використовуються в мережах 4G-LTE. Використання TDD 3D-MIMO ґрунтується на взаємодії каналів, і під час польових випробувань виявляється вищий виграш порівняно з традиційним 2D-MIMO в системах часового розподілу.

Важливо відзначити, що ці переваги вимагають точної роботи у трьох вимірах, що означає врахування азимутального, зенітального та елеваційного

кутів. Однак це також призводить до виникнення нових викликів та проблем, які потребують ретельного вирішення.

Для ефективного формування променя за висотою у системі FD-MIMO та точного управління напрямком формування променя на передавачі використовуються блоки приймача (TXRU). Однак велика кількість TXRU призводить до значних накладних витрат на CSI-RS та великого споживання ресурсів CSI-RS. Для подолання цього, потрібен зворотний зв'язок CSI з високою роздільною здатністю та механізм повідомлення CSI з більш тонкою деталізацією амплітуди та фази для подальшого поліпшення продуктивності.

Досліджено продуктивність та здійснення формування променя по куту місця для 3D MIMO. Різні схеми, такі як схема без попереднього кодування, схема формування променя та гібридна схема, виявилися вигідними для 3D MIMO в залежності від кількості TXRU. Важливо відзначити, що щоб досягти очікуваного виграшу від 3D-MIMO, майбутні системи повинні уникати невідповідностей та відповідати сучасним вимогам, оскільки специфікація системи 3D-MIMO продовжує вдосконалюватися.

3D MIMO значно підвищує ефективність використання стільникового спектру, дозволяючи eNB планувати більше користувачів. Однак зі збільшенням кількості підключених користувачів зростає потреба в опорних сигналах, що призводить до збільшених вимог до пропускну здатності опорного сигналу. Відповідно, ефективність системи буде залежати від здатності забезпечити достатню пропускну здатність для опорного сигналу, що визначатиме кількість підтримуваних реальних користувачів.

Висновки до першого розділу

Розглянуті передумови та переваги майбутніх потужних систем MIMO вражають своїми потенційними перевагами. Дослідження свідчить про високий рівень продуктивності, який можна досягти завдяки новаторським методам на

низхідній лінії зв'язку, таким як групування користувачів та схеми зворотного зв'язку на основі груп. Прийняття моделі антеної решітки з діаграмою спрямованості/поляризацією для масового MIMO не тільки розширює можливості каналів MIMO, але й приводить до істотного підвищення пропускної здатності каналу.

Розширення існуючої технології до 3D MIMO відкриває нові перспективи, дозволяючи використовувати гнучкі діаграми спрямованості як по азимуту, так і по куту місця. Формування діаграми спрямованості висхідної лінії зв'язку та взаємне використання каналів на стороні обладнання користувача стають реалізованими завдяки зростанню кількості антен. Це розширення обіцяє поліпшення якості та ефективності систем масового MIMO, підсилюючи їхню здатність ефективно використовувати спектральні ресурси та забезпечувати більший обсяг передачі даних.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Частотний спектр стандарту 5G

Стандарт 5G встановлює високі вимоги, такі як забезпечення можливостей для стрімінгу відео в форматі UHD з роздільною здатністю 4K або 8K та реалізація ключових сценаріїв використання мереж eMBB. Для досягнення цих цілей необхідні швидкості передачі даних до 20 Гбіт/с у низхідному каналі та 10 Гбіт/с у висхідному каналі. Підвищення швидкості передачі даних можна здійснити різними способами, проте основою для високих швидкостей у мобільному широкопasmовому доступі є спектр сигналу.

Стандарт 5G NR визначає нові частотні діапазони нижче 6 ГГц і передбачає майбутній перехід на частоти міліметрового діапазону, де доступні ширші смуги для створення каналів з великою пропускною здатністю. Широкі смуги пропускання обіцяють поліпшення якості передачі даних для споживачів,

але це також вносить нові виклики для інженерів, які повинні вирішувати проблеми якості сигналів у міліметровому діапазоні.

Фактори, які раніше не були проблемою на низьких частотах, тепер викликають значні труднощі та вимагають застосування нових методів вимірювань для забезпечення точності оцінок характеристик компонентів та пристроїв стандарту 5G. Зокрема, негативні впливи високочастотного діапазону потребують додаткових заходів та вдосконалення вимірювальних методів.

Для забезпечення розширених можливостей для споживачів та глобального покриття необхідне узгоджене використання частотного спектру у всіх регіонах.

Стандарт 5G NR встановлює правила для використання частот до 52,6 ГГц, забезпечуючи займання смуг радіочастот приблизно 10 ГГц:

- Діапазон 1 (400 МГц - 6 ГГц) додає смугу 1,5 ГГц з піддіапазонами: 3,3-4,2 ГГц, 3,3-3,8 ГГц, 4,4-5 ГГц.
- Діапазон 2 (24,25 ГГц - 52,6 ГГц) включає смугу 8,25 ГГц з піддіапазонами: 26,5-29,5 ГГц, 24,25-27,5 ГГц, 37-40 ГГц.

Дослідження та випробування відбулись у деяких країнах на піддіапазонах нижче 6 ГГц, а також на частотах сантиметрового та міліметрового діапазонів довжин хвиль. Тут розгорнуті ділянки мереж:

- В діапазоні до 1 ГГц є кілька піддіапазонів для пристроїв IoT, зокрема частоти близько 600, 700 та 800 МГц.
- Діапазон 1-6 ГГц використовується для збільшення покриття та пропускної здатності. Планується задіяти діапазон 3,3–3,8 ГГц для різних сервісів стандарту 5G, а також розглядається використання діапазону 4,4–4,9 ГГц.
- Діапазон вище 6 ГГц використовується для дуже широкосмужових сигналів, починаючи з цільових частот міліметрового діапазону 28 та 39 ГГц.

Незважаючи на те, що стандарт 5G NR дозволяє використовувати частоти до 52,6 ГГц, проводяться дослідження для майбутніх версій стандартів, зокрема піддіапазони 64-71 ГГц та 71-76 ГГц. Формування широкосмугових сигналів може використовувати багатоконпонентні несучі, зокрема для діапазону 2 із смугою частот до 800 МГц. Використання частотного спектру буде регулюватися різними країнами, а розвиток стандарту 5G NR передбачає продовження тенденцій розширення смуг пропускання та вдосконалення використовуваних сигналів, враховуючи нові завдання та сценарії використання.

У діапазоні до 6 ГГц виникає декілька нових викликів, пов'язаних із розробкою пристроїв у нових піддіапазонах 3,4-3,7 ГГц та 4,4-4,9 ГГц. Ці виклики включають численні нестандартні вимірювальні завдання під час випробувань пристроїв, труднощі з сумісністю та контролем якості конструкцій антенних решіток, виконаних за технологією МІМО, а також методів вимірювань з радіоефіру (over-the-air - ОТА). Незважаючи на це, особливості діапазону до 6 ГГц, по суті, є наслідком розширення існуючих можливостей стандарту LTE-A, а справжні труднощі виникнуть при переході до міліметрового діапазону.

Стандарти Wi-Fi IEEE 802.11ad/ay вже забезпечують фіксований бездротовий доступ на частотах близько 60 ГГц у режимах від точки до точки або від точки до багатьох точок. Початкова реалізація фіксованого бездротового доступу за стандартами 5G передбачає використання аналогічних конфігурацій МІМО і форм сигналів, а для прив'язки та управління будуть використовуватись існуючі мережі 4G eNB, що означає роботу у неавтономному режимі (NSA). Відмінності виникають при переході технологій мобільного зв'язку у міліметровий діапазон, де доведеться вирішувати завдання надання та підтримання каналу зв'язку при русі абонентських пристроїв, наприклад, на автостоянці, шосе або в швидкісному потязі.

2.2 Якість сигналів у міліметровому діапазоні

Якість сигналу може бути піддана впливу численних факторів, таких як обробка в основній смузі, модуляція, фільтрація та передача спектру сигналу на вищі частоти. Поширення широкосмугових каналів, передбачених для майбутнього переходу до міліметрового діапазону, може ускладнити проектування пристроїв з модулюванням на високих частотах та великою частотною смугою. Це може викликати проблеми, пов'язані з порушеннями форми сигналу, які, при зсуві спектра на вищі частоти або розширенні смуги, стають більш помітними.

Системи з OFDM-модуляцією (мультиплексуванням з ортогональним частотним поділом каналів) мають властивості ортогональності, які допомагають уникнути взаємного впливу несучих, які перекриваються. Проте порушення форми сигналу, такі як IQ-спотворення, фазовий шум, лінійна (AM-AM) та нелінійна (AM-ФМ) компресія, а також частотні зсуви, можуть викликати спотворення модульованого сигналу.

Фазовий шум є основним фактором, який часто викликає проблеми в системах з OFDM-модуляцією в міліметровому діапазоні. Високий рівень фазових шумів може спричинити взаємний вплив піднесучих, що погіршує якість демодульованого сигналу.

Вирішення схожих проблем представляє собою значний виклик, оскільки їх вплив може негативно вплинути на загальні параметри пристрою. Для забезпечення ефективної роботи пристроїв необхідно проектувати їх так, щоб враховувати фізичні властивості широкосмугових сигналів в міліметровому діапазоні. Засоби вимірювань, що використовуються для контролю параметрів цих пристроїв, повинні мати високу точність, щоб забезпечити правильність вимірювань параметрів сигналів та їх якості, при цьому не викликаючи нових

проблем. Узагальнена структурна схема приймача представлена на рисунку 2.1.

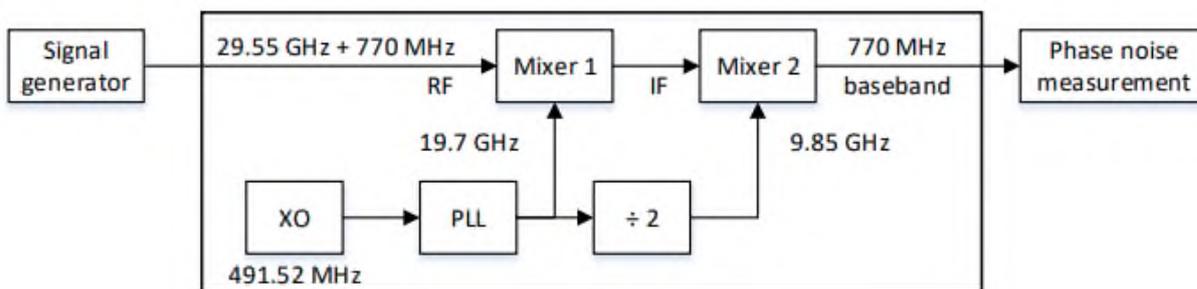


Рисунок 2.1 – Узагальнена структурна схема приймача

Аналіз параметрів модуляції є одним із найбільш інформативних показників якості сигналів. Виявлення помилок, викликаних спотвореннями сигналу, можливе під час аналізу сигнального сузір'я на комплексній площині. Ще одним ключовим показником якості модуляції сигналу є величина модуля вектора помилки (EVM), результати вимірювань якої дозволяють оцінити ступінь спотворення форми сигналу.

Стандарт 5G NR регламентує використання сигналів із CP-OFDM модуляцією (мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів та циклічним префіксом), яка представляє собою схему модуляції із численними несучими.

Фазовий шум, а також відхилення фази чи амплітуди, виниклі в вузлах пристрою та виявлені у спотвореннях спектру широкосмугового сигналу, будуть враховані при вимірюваннях модуля вектора помилки. Модуль вектора помилки - це нормалізована різниця між вектором вимірюваного IQ-сигналу та опорним вектором IQ-сигналу (розрахунковим вектором) на комплексній площині (див. рисунок 2.2). Цей показник визначає ступінь відхилення реального сигналу від ідеального (зразкового) і, як правило, виражається у

децибелах (дБ) або у відсотках.

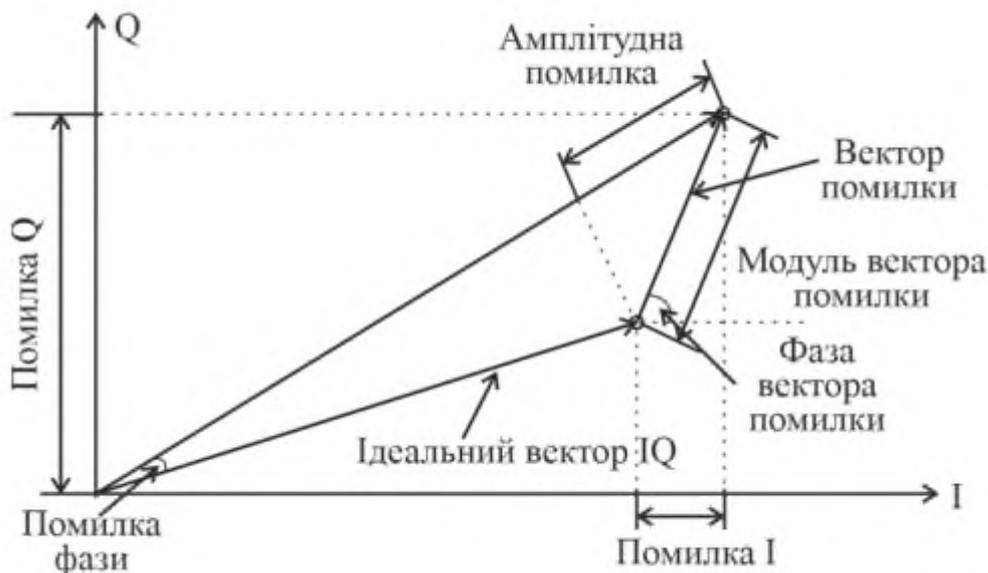


Рисунок 2.2 – Особливості обчислення модуля вектора помилки.

Зі збільшенням щільності модуляції, що очікується в стандарті 5G, де передбачається використання схем модуляції з високою щільністю (від 256 QAM спочатку до 1024 QAM у майбутньому), вимоги до модуля вектора помилки для компонентів та пристроїв стають все більш жорсткими.

Наприклад, в таблиці 2.1 відображено зростання вимог до модуля вектора помилки (EVM) для абонентських пристроїв (UE) стандарту 3GPP із збільшенням щільності модуляції.

Таблиця 2.1 – Вимоги до значення модуля вектора помилки (EVM)

| Схема модуляції для фізичного каналу низхідного потоку даних (PDSCH) | Значення вектора помилки |
|--|--------------------------|
| QPSK | 17,5% |
| 16QAM | 12,5% |
| 64QAM | 8% |
| 256QAM | 3,5% |

Висновки до другого розділу

Частотний спектр 5G є ключовим елементом, що визначає можливості та характеристики цього нового покоління мобільних мереж. Стандарт 5G використовує ширший діапазон частот, включаючи високочастотні (міліметрові хвилі) та низькочастотні діапазони.

1. Високочастотні діапазони (міліметрові хвилі):

Високі частоти дозволяють передачу величезних обсягів даних з неймовірною швидкістю. Забезпечує високу пропускну здатність, що особливо важливо для застосувань високоякісного стрімінгу, віртуальної реальності та ігор з великим обсягом графіки. Однак ці хвилі мають обмежений зону покриття та меншу здатність проникнення через перешкоди.

2. Низькочастотні діапазони:

Забезпечують більш широку зону покриття та кращу здатність проникнення через стіни та інші перешкоди. Це особливо важливо для розгортання в міських областях та внутрішніх приміщеннях. Хоча швидкості в цих діапазонах можуть бути меншими, вони все ще надають значну кількість пропускну здатності для загальних використань.

3. Можливості для інновацій:

5G створює умови для розширення Інтернету речей (IoT) та підключення великої кількості пристроїв одночасно. Забезпечує необхідність для розвитку автономних автомобілів та інших високотехнологічних застосувань, що вимагають низької латентності та надійного зв'язку.

Частотний спектр 5G визначає нові горизонти для розвитку та інновацій у сфері мобільного зв'язку, відкриваючи можливості для різноманітних сценаріїв використання в сучасному суспільстві.

3 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1 Структура каналу МІМО

Для підтвердження відповідності параметрів спектра сигналів необхідно провести їх вимірювання. Під час вимірювання параметрів спектра сигналів абонентських пристроїв стандарту 5G контролюються такі характеристики: передана потужність, ширина зайнятої (спектром сигналу) смуги частот (OBW), проникнення сигналу в суміжний канал (ACPR), відповідність спектральної маски випромінювань (SEM) та рівень паразитних складових спектру. Щодо компонентів та пристроїв стандарту 5G, необхідно, щоб вимірювальне обладнання мало характеристики, достатні для отримання надійної оцінки сигнального сузір'я та модуля вектора помилки. Окрім того, із розвитком стандартів 5G важливою стає гнучкість вимірювального обладнання для перенесення вимірювань параметрів спектра на вищі частоти. Розглянемо приклад генерації форми хвилі NR (TM або FRC) та додавання спотворення. Тут розглядаються фазовий шум та нелінійність без пам'яті. Далі обчислюється EVM результуючого сигналу. Побудовано середньоквадратичне значення та пікові значення EVM для кожного символу OFDM, слоту та піднесучої. Також обчислено загальну EVM (середньоквадратичне значення EVM, усереднене по всій формі хвилі). На рисунку 3.1 показано схему обробки сигналу в каналі зв'язку.

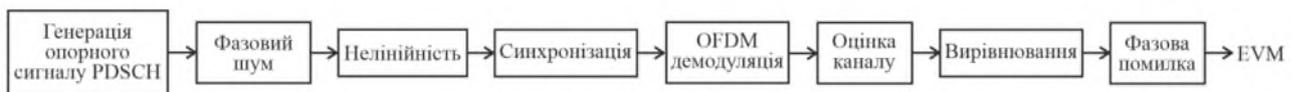


Рисунок 3.1 – Схема обробки сигналу в каналі зв'язку

На рисунку 3.2 наведено графік залежності потужності фазового шуму від зміщення частоти на вході приймача.

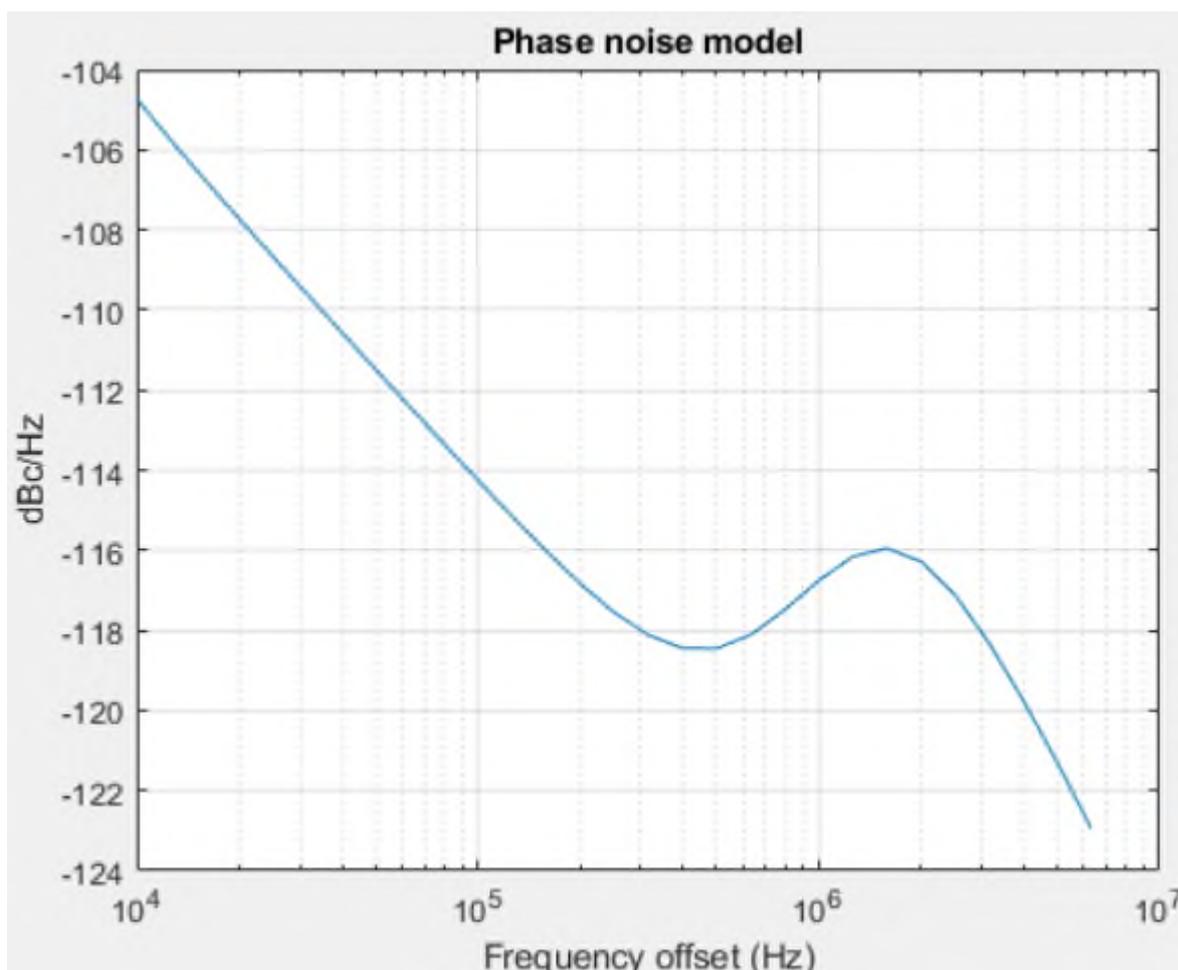


Рисунок 3.2 – Залежність потужності фазового шуму від зміщення частоти

Введення нелінійних спотворень в систему використовується для підвищення продуктивності систем 5G. Системи з кількома входами та виходами (MIMO) та неортогональний множинний доступ (NOMA) вдосконалюють продуктивність бездротових систем. Однак у системах 5G нелінійні спотворення у підсилювальному тракті є основним негативним чинником для сигналів через їхні особливості на фізичному рівні. Математичні моделі, що використовуються для моделювання нелінійностей підсилювачів у системах п'ятого покоління, потребують адаптації. Рисунок 3.3 ілюструє вплив

нелінійності на каналі зв'язку.

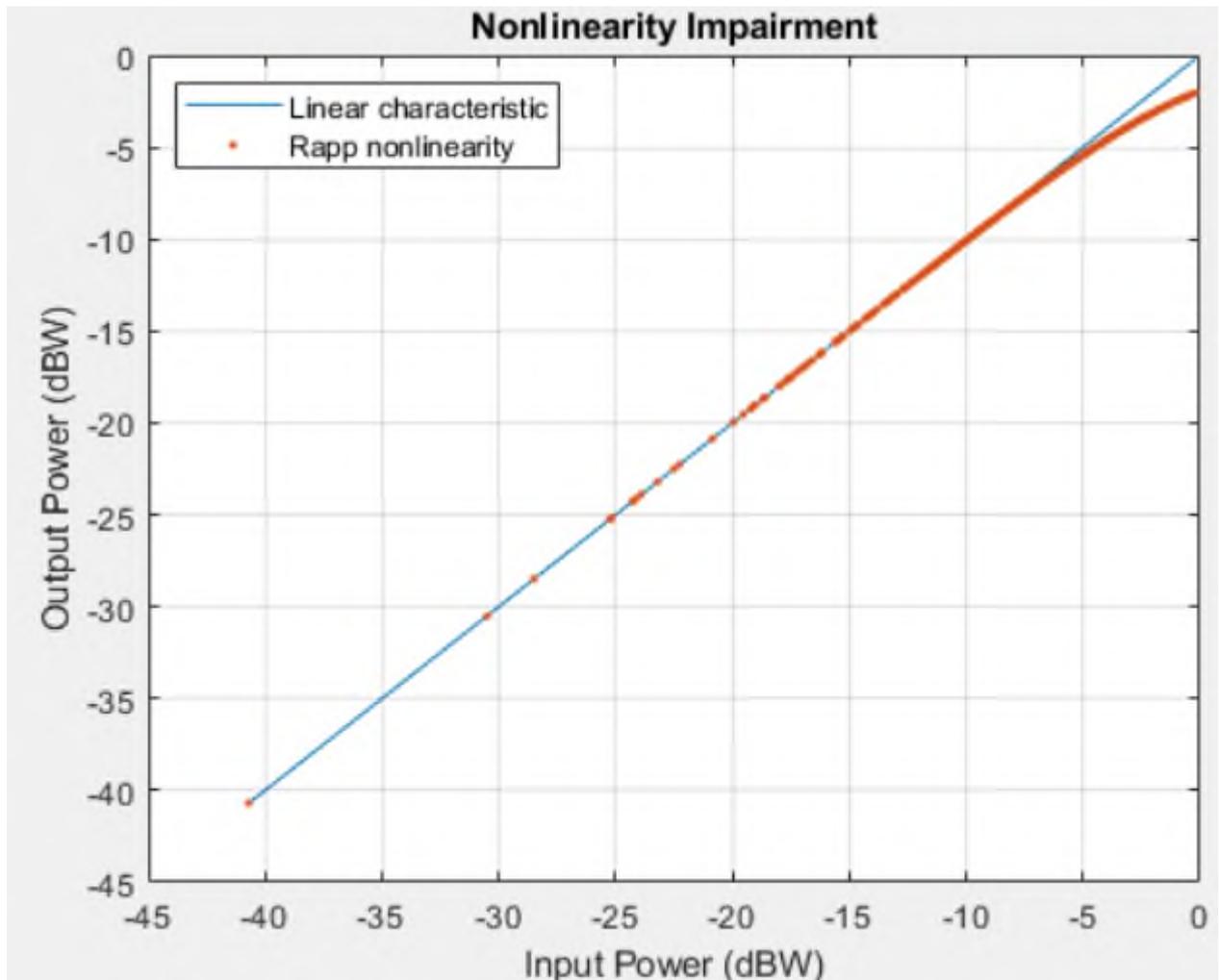


Рисунок 3.3 – Вплив нелінійності у каналі зв'язку

Після отримання сигналу необхідно виконати декодування та аналіз, включаючи такі етапи:

- синхронізація, використовуючи сигнал демодуляції DM-RS для одного кадру у випадку FDD (два кадри для TDD);
- демодуляція отриманого сигналу методом OFDM;
- оцінка каналу;
- вирівнювання;
- оцінка та компенсація загальної фазової помилки (CPE);
- розрахунок EVM для PDSCH з використанням перемикача evm3GPP для обробки відповідно до вимог вимірювання EVM.

Приклад виконує та відтворює різноманітну статистику, пов'язану з EVM, для кожного символу, слоту та піка EVM на кадрі та RMS EVM. Надалі відображаються значення EVM для кожного слоту та фрейму, як це продемонстровано на рисунку 3.4. Крім того, представлено загальне значення EVM, усереднене по всій формі вхідного сигналу. Вибудовуємо ряд графіків: EVM у порівнянні з кожним символом OFDM, слотом, піднесучою та загальним EVM. Кожен графік демонструє пікове значення порівняно з середньоквадратичним значенням EVM.

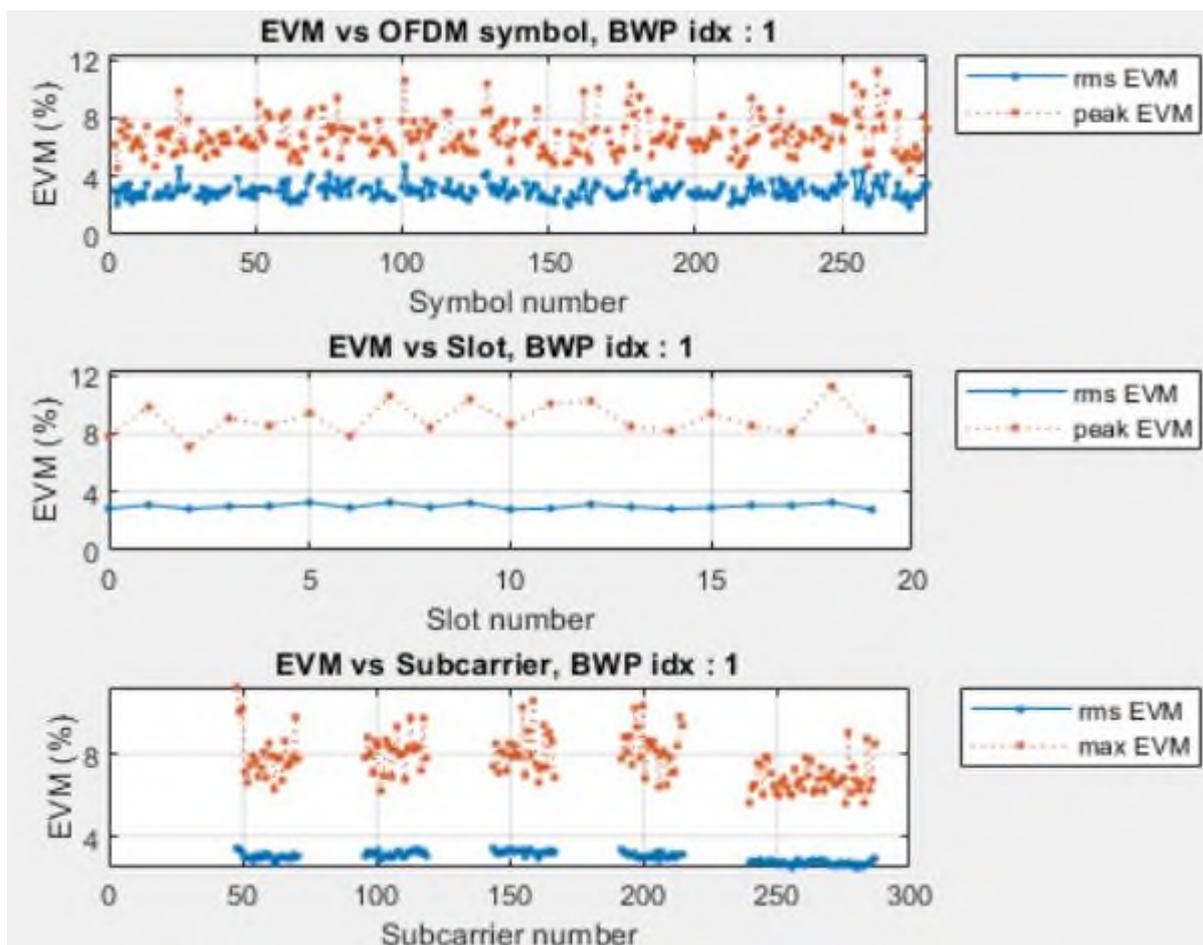


Рисунок 3.4 – Графіки значень EVM на символ, слот і піднесуву

Мета роботи приймача полягає в екстрагуванні векторної інформації з сигналу, представленого як амплітуда та фаза. У реальних сигналах завдання ускладнюється наявністю шумів та дефектів, що можуть загрожувати здатності приймача демодулювати сигнал та відновлювати передані біти. Для характеристики помилок у квадратурно-модульованому сигналі

використовується концепція величини вектора помилки (EVM), іноді відомої як відносна помилка сузір'я (RCE).

Вектор помилки - це векторна різниця між вимірним сигналом та його ідеальною версією. EVM визначається як середньоквадратичне (RMS) значення вектора помилки протягом конкретного часового інтервалу, оціненого в реальні моменти часу символів.

Зазвичай вираз EVM подається у відсотках від ідеального сигналу, але може бути представлений і в децибелах. Для вимірювання EVM необхідний точний приймач, який може порівнювати вимірюваний сигнал із його ідеальною версією.

На рисунку 3.5 зображено констеляційну діаграму сигналу 16-QAM.

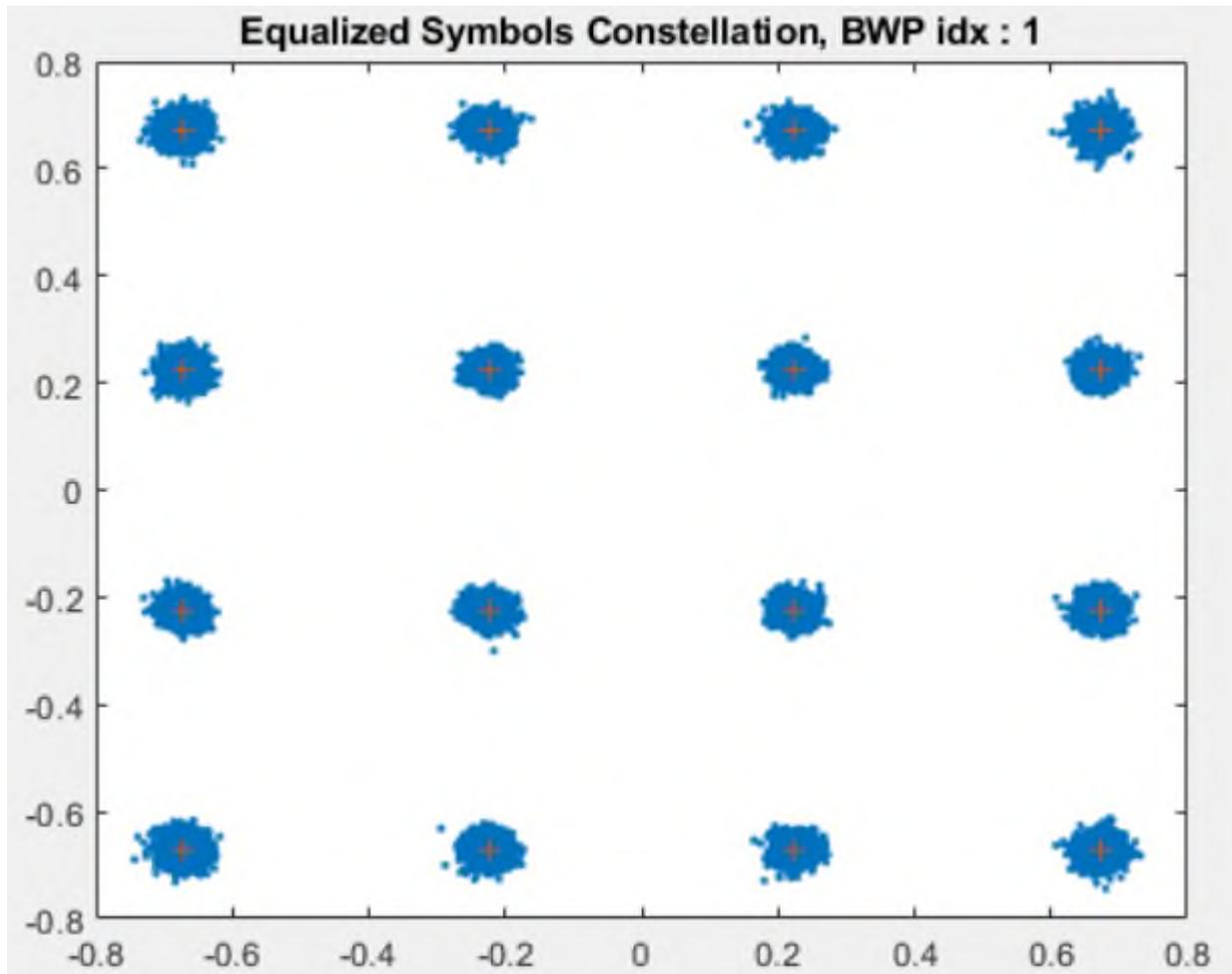


Рисунок 3.5 – Констеляційна діаграма сигналу 16-QAM

На рисунку 3.5 ми маємо діаграму сузір'я сигналу 16-QAM, де кожен із 16 векторних станів представляє 4 біти інформації. У ідеальному випадку ці стани мали б бути чіткими точками на діаграмі, вільними від шуму чи спотворень. Однак у реальних умовах каналів зв'язку завжди є свої нюанси: шуми, фазові спотворення, нелінійності та інші артефакти.

Кожен вектор, який потрапляє всередину меж помилок, вважається "добрим", тоді як ті, що виходять за межі, - "поганими". На зазначеному графіку всі точки знаходяться в допустимих межах помилок, і значення EVM становить лише 0,37%, свідчаючи про високу якість сигналу.

На рисунку 3.6 представлена сітка ресурсів для визначення EVM.

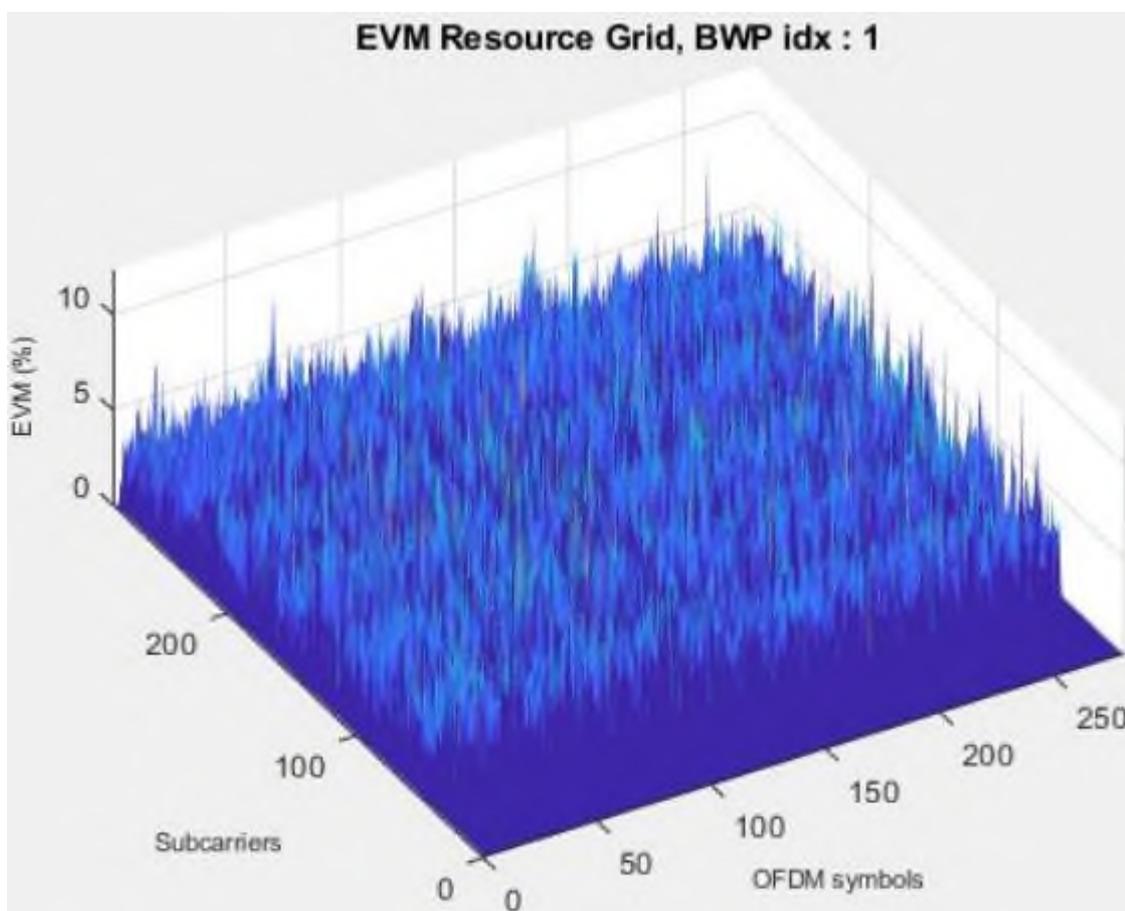


Рисунок 3.6 – Сітка ресурсів сигналу 5G

Для забезпечення високої точності вимірювань параметрів широкосмугових пристроїв на частотах міліметрового діапазону ключове значення має вимірювальне обладнання, модуль вектора помилки якого переважає той, що

вбудований у вивчуваний пристрій чи систему. Нормативні вимоги формулюються наступним чином:

- для вимірювань параметрів компонентів: досягнення переваги на рівні 10 дБ в порівнянні з характеристиками вбудованого модуля вектора помилки у системі;
- для вимірювань параметрів системи: досягнення переваги на рівні 3 дБ в порівнянні з властивостями вбудованого зразкового джерела радіосигналів.

Стандартна схема вимірювань параметрів передавача, приймача чи інших компонентів у пристрої для бездротової передачі даних (в залежності від типу) включає джерело сигналів для генерації вхідного впливу та вбудований модуль вектора помилки, який переважає за характеристиками вбудованого модуля в системі. Вимірювання в основному частотному діапазоні та в діапазоні до 6 ГГц, зазвичай, виконуються за допомогою кабелів. Однак вимірювання на частотах сантиметрового та міліметрового діапазонів, швидше за все, будуть виконуватися методом ОТА через високий рівень інтеграції, що може призвести до відсутності з'єднувачів у контрольних точках для кабельного підключення.

На рисунку 3.7 відображено блок-схему випробувального стенду для генерації та аналізу сигналів стандарту 5G. Цей стенд володіє властивостями, які є важливими для оцінки характеристик компонентів та пристроїв стандарту 5G, зокрема у відношенні до спотворень сигналів, що можуть виникати на частотах міліметрового діапазону.

Для формування сигналу з цифровою модуляцією стандарту 5G NR та подачі його на вхід досліджуваного пристрою використовується векторний генератор сигналів. Для захоплення радіочастотного сигналу на виході пристрою, його цифрової оцифровки та подальшого аналізу, включаючи параметри модуляції, використовується векторний аналізатор сигналів. Це рішення має гнучкість конфігурації для роботи з різними вимірювальними

завданнями при різних комбінаціях частот і піддіапазонів. Крім того, воно враховує різний ступінь достовірності, що визначається характеристиками вимірюваних компонентів та пристроїв стандарту 5G.



Рисунок 3.7 - Схема стенду для формування та аналізу сигналів 5G

У вимірюваннях на високих частотах та широких смугах пропускання інші джерела похибок можуть впливати з самої схеми вимірів. При проектуванні вимірювальних схем для таких умов, де використовується дуже велика частота та широка смуга пропускання, додаткове обладнання, таке як тестове оснащення, кабельні зборки, переходи, спрямовані відгалужувачі, фільтри, підсилювачі, розгалужувачі та комутатори між досліджуваним пристроєм та вимірювальними приладами, може мати негативний вплив на точність вимірювань, особливо у порівнянні з вимірами на частотах до 6 ГГц.

Для забезпечення максимальної точності вимірювань вимірювальна система повинна пройти калібрування в місці підключення досліджуваного пристрою. Це означає, що параметри кожного елемента вимірювальної системи, починаючи від тестового оснащення і закінчуючи вимірювальними приладами, повинні бути відомі та враховані під час вимірювань. Калібрування дозволяє компенсувати вплив додаткового обладнання та забезпечити надійні та точні результати вимірювань.

Завданням є отримання характеристик досліджуваного пристрою без урахування негативного впливу тестового оснащення та допоміжного обладнання. Вимірювальна система повинна надавати ще вищі характеристики,

ніж ті, які прагнуть досягти при проектуванні пристрою. Можливість виконання вимірювань у площині досліджуваного пристрою є запорукою високої точності та повторюваності. Коректно виконане калібрування вимірювальної системи дозволяє усунути систематичні похибки вимірювань, пов'язані з АЧХ і ФЧХ тестового оснащення, що є важливим при роботі з широкосмуговими сигналами.

Вимірювальний стенд для випробувань пристроїв стандарту 5G включає програмний засіб Signal Optimizer для калібрування системи. Крім калібрування, точність вимірювальної установки можна поліпшити правильним вибором та використанням кабелів, з'єднувачів та переходів. Важливо враховувати матеріали, структуру та геометрію кабелів та елементів з'єднання, оскільки вони спеціально оптимізовані для роботи у певному діапазоні частот.

Використання кабелів та з'єднань низької якості може суттєво погіршити характеристики вимірювальної системи. При виборі обладнання слід враховувати взаємодію з частотним діапазоном та рівнем точності. Також важливо враховувати, що деяке вимірювальне обладнання, призначене для низьких частот, може бути неефективним на вищих частотах, що є типовою проблемою при вимірах у міліметровому діапазоні.

Обравши оптимальний набір вимірювального обладнання, з'єднувачів, переходів та засобів калібрування вимірювальної системи, ви зможете виконати високоточні вимірювання для достовірної оцінки характеристик компонентів та пристроїв стандарту 5G.

3.2 Формування діаграми спрямованості антени

Розглядаючи технології 5G, ключовими аспектами обговорень є проблеми, пов'язані з МІМО (множинне введення-виведення), управлінням променем та формуванням діаграми спрямованості антени. Успішне вирішення цих викликів сприятиме значному підвищенню швидкості передачі даних на порядок та

збільшенню пропускної здатності відповідно до концепції оперативної групи з мережевих аспектів ІМТ-2020. За даними компанії Ericsson Mobility (листопад 2017 р.), мобільний трафік щорічно зростає на близько 65%, а очікуваний середньорічний темп зростання становить 42%. Прогнозується, що до 2023 року кількість абонентів мобільного зв'язку досягне 9,1 мільярда, з 1 мільярдом користувачів, які використовують покращений мобільний широкопasmовий доступ 5G.

МІМО є одним із настільки важливих методів для підвищення пропускної спроможності та ефективності мережі. Багатоантенні технології для абонентських пристроїв повинні працювати у різних частотних діапазонах - до 6 ГГц і в міліметровому діапазоні довжин хвиль, а також підтримувати різні сценарії та масові з'єднання пристроїв Інтернету речей (ІоТ). При реалізації МІМО у пристроях 5G розробники стикаються з новими проблемами, такими як перевірка тривимірної діаграми спрямованості антени, підтвердження цілісності каналу міліметрового діапазону та оптимізація характеристик пристрою.

Щоб ефективно вирішити ці проблеми, важливо мати розуміння основних методів передачі та приймання високоякісних та завадостійких сигналів за допомогою пристроїв стандарту 5G. Кожен метод використання декількох антен має свої переваги та обмеження, що вимагає прийняття компромісних рішень. Просторове рознесення, яке використовується для підвищення надійності різних видів радіозв'язку, досягається за допомогою передачі кількох копій одного сигналу через декілька антен, що в свою чергу підвищує здатність коректного приймання сигналу.

При використанні просторового мультиплексування на кожен антену подаються різні дані, а всі антени працюють на одній частоті, що дозволяє підвищити загальну швидкість передачі даних.

Методи управління променем та формування діаграми спрямованості використовують кілька антен для вузьконаправленої передачі. Вони

збільшують підсилення при точному позиціонуванні основної пелюстки діаграми відносно приймальної антени пристрою. Формування діаграми спрямованості є складнішим, оскільки вимагає створення зворотного зв'язку в каналі для зміни форми та напрямку променя.

Використання просторового мультиплексування разом із формуванням діаграми спрямованості підвищує завадостійкість і пропускну здатність.

Метод, що значно підвищує спектральну ефективність через направлення кількох променів на різні пристрої, називається розрахованим на багато користувачів MIMO.

3.3 Застосування MIMO та формування діаграми спрямованості

Використання технологій MIMO та формування діаграми спрямованості в міліметровому діапазоні породжує нові виклики для розробників пристроїв. Стандарти 5G NR визначають структуру фреймів на фізичному рівні, новий опорний сигнал та режими передачі, що підтримують високі швидкості для покращеного мобільного широкосмугового доступу (eMBB) 5G. Розробники повинні проводити аналіз тривимірних діаграм спрямованості та забезпечувати зв'язок з базовою станцією, враховуючи необхідні характеристики, надійність та якість зв'язку.

Для успішного проектування пристроїв 5G важливо враховувати наступні аспекти:

- Перевірка тривимірної діаграми спрямованості антени: Проведення аналізу та оптимізація тривимірної діаграми спрямованості антени для ефективної та точної передачі сигналу.
- Підтвердження цілісності каналу міліметрового діапазону: Виконання перевірок, щоб забезпечити неперервність та надійність каналу в міліметровому діапазоні частот.

- Оптимізація параметрів пристрою для реальних умов експлуатації:
Регулювання параметрів пристрою з урахуванням факторів реального середовища для досягнення оптимальної продуктивності.

Для керування променем або формування діаграми спрямованості в мобільних пристроях, розробники використовуватимуть багатоелементні антенні решітки. Фазовані антенні решітки становлять доступне та ефективне рішення для динамічного створення та налаштування променя у необхідному напрямку. Змінюючи фазові та амплітудні характеристики сигналів для окремих елементів, можна формувати діаграму спрямованості антеної решітки. Фазовані антенні решітки зручно інтегруються в радіочастотні інтегральні схеми (РЧ ІС) і можуть бути протестовані лише методом радіоефіру, оскільки контроль точок для всіх сигналів неможливо реалізувати.

Перевірка діаграми спрямованості включає оцінку характеристик променя шляхом вимірювання тривимірних діаграм спрямованості антени та перевірки коефіцієнта підсилення, рівня бічних пелюсток і нулів діаграми спрямованості для всього діапазону частот та смуг пропускання стандарту 5G. Оптимізація антени для отримання максимального сигналу включає позиціонування бічних пелюсток та нулів діаграми спрямованості у визначених положеннях.

Перевірка прототипів виявляється важливою, але виготовлення прототипу міліметрового діапазону може бути витратним. Моделювання антени в системах автоматизованого проектування (САПР) з моделями каналів та лініями зв'язку з базовими станціями дозволяє знизити витрати на створення прототипу та вдосконалення пристрою. Моделювання на етапі проектування дозволяє додавати різні спотворення для оптимізації пристрою до виготовлення дослідного зразка. Подано моделювання на рівні каналу зв'язку із моделями каналів міліметрового діапазону, що дозволяє оцінити характеристики змодельованих антен.

Після прийняття рішення про створення дослідного зразка розробники повинні перевірити відповідність розкриттю основної пелюстки діаграми

спрямованості, положення нулів, значення коефіцієнта підсилення у заданому діапазоні та меж вихідної потужності антени відповідно до визначених вимог. Тестування дослідних зразків виконується з використанням радіофіру.

3.4 Цілісність каналу міліметрового діапазону

Впровадження антен із широкими секторами покриття в системах LTE дозволяє охоплювати більше потенційних абонентів. Однак при переході до технології 5G передбачається використання вузьконаправлених антен для передачі сигналів міліметрового діапазону. Це може ускладнити завдання пошуку сигналів базової станції абонентськими терміналами, а також створити труднощі в забезпеченні якості зв'язку, особливо при руху пристрою в зоні дії мережі.

У стандарті 5G NR релізу 15 визначені нові процедури початкового доступу та підключення для встановлення бездротового з'єднання. Оскільки пристрій та базова станція не взаємодіють на початковому етапі, базова станція виконує сканування простору у всіх напрямках для передачі інформації про канал у блоках синхронізації. Абонентський термінал виявляє найсильніший сигнал базової станції та відповідає на нього. З цією інформацією базова станція встановлює з'єднання.

Додатково визначені процедури захоплення та супроводу за променем, наведення променя, зворотного зв'язку за променем та передачі обслуговування. У разі використання змішаної нумерології для встановлення з'єднання потрібен додатковий час. Розробники повинні ретельно реалізувати, протестувати та оптимізувати ці функції, оскільки неправильна робота може призвести до пропусків викликів або погіршення якості з'єднання.

Тестування протоколу на ранніх етапах розробки гарантує, що пристрій зможе ефективно встановлювати та утримувати з'єднання. Використання емулятора мережі із вбудованою системою визначення протоколу дозволяє

емулювати сигнали мережі та тестувати результуючі сигнали пристрою, щоб перевірити та оптимізувати управління початковим доступом та променем.

Оптимізація параметрів пристрою для реальних умов експлуатації є важливим аспектом в розробці систем бездротового зв'язку, особливо в контексті технології 5G. Пропускна здатність та затримка є ключовими параметрами, які визначають ефективність системи.

Затримки взаємодії з користувачами мають значний вплив на якість обслуговування. Враховуючи це, різні рівні стеку протоколів повинні оптимально взаємодіяти для досягнення цільової затримки та пропускної здатності в системі 5G. Важливо враховувати не лише захоплення променя, але й інші аспекти, такі як передача обслуговування та переходи між з'єднаннями 4G.

Для ефективного тестування наскрізної пропускної здатності системи використання емулятора мережі є одним із найефективніших методів. Цей інструмент дозволяє передавати команди протоколу абонентському терміналу та вимірювати його відгук, створюючи сценарії для налаштування з'єднання, зміни рівнів потужності та параметрів формування діаграми спрямованості.

Тестування компонентів та пристроїв у середовищі із контрольованим радіодоступом важливо, але реальні умови можуть включати втрати сигналу, обумовлені різними факторами, такими як завмирання, багатопроменеве поширення та розкид затримки. Врахування цих спотворень через емулятор каналу дозволяє реалістично оцінити наскрізну пропускну здатність для всього стека протоколів в умовах реального радіозв'язку.

Висновки до третього розділу

Технології MIMO, управління променем та формування діаграми спрямованості є важливими складовими пристроїв 5G. Інтеграція багатoelementних антенних систем створює нові завдання для розробників, і

контрольно-вимірjувальні рішення є вирішальними для вимірjування діаграми та тестування в реальних умовах мережі. Ці інструменти допомагають налаштувати пристрої від раних етапів проектування до розгортання 5G-мережі.

Стандарт визначає використання міліметрового діапазону на частотах до 52,6 ГГц зі смугами каналів до 800 МГц. Для точних вимірjувань у цьому діапазоні важливо уважно вибирати обладнання та засоби калібрування. Особливу увагу слід приділяти властивостям системи, таким як діаграма спрямованості антени, щоб забезпечити якісне функціонування та високу якість обслуговування.

У розробці та впровадженні 5G-пристроїв виникає необхідність в ефективних методах вимірjувань та тестувань, які забезпечують оптимальні умови для оптимізації роботи в мережі.

4 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

4.1 Принципи організації каналів МІМО

Модель сигналу МІМО – множинний вхід – множинний вихід (рис. 4.1).

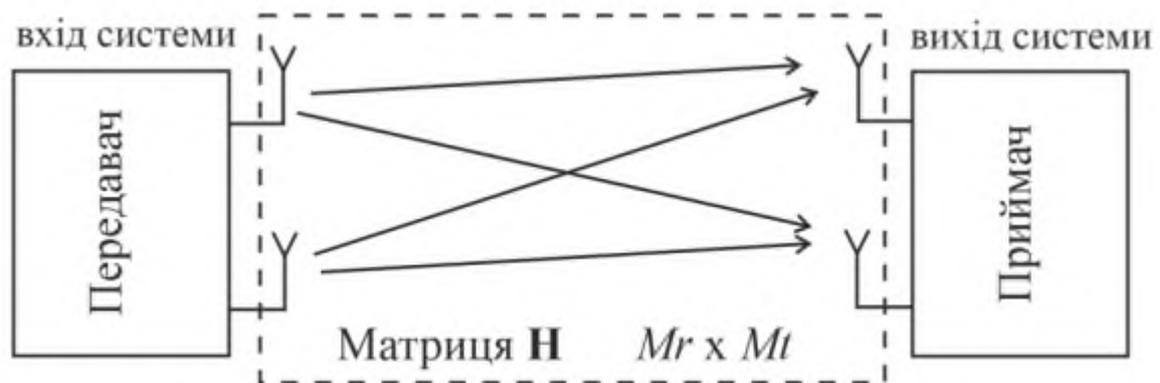


Рисунок 4.1 – Загальна структура каналу МІМО (Матриця каналу Н – матриця підсилення; M_r - кількість антен приймача; M_t - кількість антен передавача)

Перш ніж ми розглянемо питання пропускної здатності, давайте розберемося з математичним описом отриманого сигналу (received signal). Прийнятий сигнал можна виразити наступним чином:

$$y = \sqrt{\frac{P}{Mt}} Hs + n \quad (4.1)$$

де P – потужність передавача, Mt – кількість передаючих антен, s – символи, що передаються, n – адитивний білий гаусовий шум, H – матриця коефіцієнтів передачі каналу (загасання — fading).

Переданий сигнал можна розглядати більш детально:

$$s_i = \gamma_i d_i, \quad i = 1, 2, \dots, Mt, \quad (4.2)$$

де d - один з інформаційних сигналів; γ - підсилення певного шляху поширення електромагнітної хвилі (path gain).

Підсилення шляху розповсюдження, або вага антени (antenna weight), вказує на розподіл вихідної потужності, що пропорційна "силі" конкретного шляху. Іншими словами, мета полягає в тому, щоб виділити більше потужності для добрих каналів (шляхів розповсюдження) та менше енергії для поганих каналів.

Вагові коефіцієнти антени обмежуються кількістю передавальних антен:

$$\sum_{i=1}^r \gamma_i = Mt \quad (4.3)$$

де r – ранг каналної матриці.

Розмірність матриці H визначається як $M_r \times M_t$, де M_r представляє кількість приймальних антен. Формула (4.1) може бути адаптована для конкретних випадків MIMO. У випадку MISO (Multiple Input Single Output – кілька передавальних антен одна приймальна):

$$y = \sqrt{\frac{P}{M_t}} h s + n \quad (4.4)$$

де h - це вектор $1 \times M_t$.

Для випадку SIMO (Single Input Multiple Output — кілька приймальних антен та одна передавальна):

$$y = \sqrt{P} h s + n, \quad (4.5)$$

де h - це вектор $M_r \times 1$

SISO (Single Input Single Output — одна антена приймача та передача):

$$y = \sqrt{P} h s + n \quad (4.6)$$

В подальшому розгляді можна виділити два основних випадки: коли інформація про стан каналу (CSI - channel state information) невідома передавачу (CU - Channel Unknown), і коли ця інформація відома передавачу (СК - Channel Known).

Вже розглядали випадок, коли передавач не знає стан каналу (open-loop case, передача без зворотного зв'язку). У цьому випадку ми не можемо ефективно вибрати напрямок, тому надсилаємо рівну потужність через всі

антени (тракти, шляхи поширення). Підсилення шляху поширення (path gain) рівне 1:

$$\gamma_i = 1, \quad i = 1, 2, \dots, Mt \quad (4.7)$$

Важливо забезпечити розподіл більшої потужності для добре провідних каналів і менше енергії для менш ефективних.

Якщо ми маємо відомість стану каналу (CSI) на стороні передавача (відсутність зворотного зв'язку), ми можемо застосовувати вдосконалені методи передачі, такі як попереднє кодування та пост-обробка.

З іншого боку, якщо CSI відома на стороні передавача, де матриця H доступна для обробки, ми можемо використовувати алгоритми обробки сигналів, наприклад, SVD (Singular Value Decomposition), для оптимізації передачі сигналу.

$$H = \begin{bmatrix} U & \Sigma & V^H \\ Mr \times Mr & Mr \times Mt & Mt \times Mt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s & U_0 \\ Mr \times r & Mr \times (Mr - r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma & 0 \\ r \times Mt & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s^H \\ V_0^H \\ (Mt - r) \times Mt \end{bmatrix}$$

Матриця Σ є діагональною матрицею, і її діагональні елементи (сингулярні значення) в суті є коефіцієнтами передачі для унікальних шляхів поширення. Якщо ми перемножимо сигнал на матрицю сингулярних значень Σ , а не на каналну матрицю H , то система MIMO розкладеться на набір паралельних SISO (один вхід - один вихід) каналів.

Матриця лінійного попереднього кодування позначається F і визначається як $F = UV^H$, де матриця лінійної пост-обробки (демодулятор) позначається D і визначається як $D = UH$.

Зазначимо, що схематично канал МІМО можна зобразити так, як показано на рисунку 4.2.



Рисунок 4.2 – Схема каналу МІМО з пре-кодуванням та пост-обробкою

Термін "пропускна здатність" походить з теорії інформації. Зазвичай, дослідження зосереджувалося на класичному випадку каналу із адитивним білим гауссівським шумом (AWGN). Проте формулу можна легко узагальнити і для МІМО-каналу з затуханнями.

4.2 Просторово-часове блочне кодування

Системи МІМО мають покращену пропускну здатність порівняно з іншими системами. При збільшенні співвідношення сигнал-шум (SNR), необхідність у знанні каналної матриці зменшується. Модель каналу SIMO перевершує MISO в випадку, коли відсутня інформація про канал у передавача (потужність в MISO розділяється між всіма антенами) і збігається з MISO, якщо канал відомий. Просторово-часове блочне кодування або STBC (Space-Time Block Coding) є простою технікою, що використовує рознесення передавальних антен. Застосування цієї техніки не передбачає знання параметрів радіоканалу під час передачі і не вимагає використання складних алгоритмів обробки сигналів у приймачі. Однак недоліком методу STBC є менша швидкість передачі інформації порівняно з іншими методами просторового кодування.

Якщо є дві передавальні антени та одна приймальна, символи передаються та приймаються парами (блоком з двох символів). Під час першого

символьного інтервалу перший символ x_1 у модуляторі перетворення на сигнал $u_1(t)$, який надходить на першу антену, а другий символ x_2 у модуляторі перетворюється на сигнал $u_2(t)$, який надходить на другу антену. Під час другого символьного інтервалу на першу антену подається сигнал $-u_2^*(t)$ (знак * позначає комплексно спряжений сигнал), а на другу антену надходить сигнал $u_1^*(t)$.

Сигнали, які надійдуть на вхід приймача у перший і другий символьний інтервал, позначимо через $z_1(t)$ і $z_2(t)$. Визначаються виразами:

$$\begin{cases} z_1(t) = h_1 u_1(t) + h_2 u_2(t) \\ z_2(t) = -h_1 u_2^*(t) + h_2 u_1^*(t) \end{cases} \quad (4.8)$$

де h_1 та h_2 - комплексні коефіцієнти передачі каналу. Коефіцієнти h_1 та h_2 вказують на відношення комплексної амплітуди напруги на виході приймальної антени до комплексної амплітуди сигналу на вході відповідно першої та другої передавальної антени. У випадку вузькосмугового каналу, де залежність федінгу від частоти можна ігнорувати, формуються лінійні комбінації сигналів $z_1(t)$ і $z_2(t)$, прийнятих протягом першого і другого символьних інтервалів:

$$\begin{cases} \hat{u}_1(t) = h_1^* z_1(t) + h_2 z_2^*(t) \\ \hat{u}_2(t) = h_2^* z_2(t) - h_1 z_1^*(t) \end{cases} \quad (4.9)$$

Підставляючи вирази (1) у (2), отримаємо наступне:

$$\begin{cases} \hat{u}_1(t) = (|h_1|^2 + |h_2|^2) \cdot u_1(t) \\ \hat{u}_2(t) = (|h_1|^2 + |h_2|^2) \cdot u_2(t) \end{cases} \quad (4.10)$$

де $|\cdot|$ - модуль числа.

Вираз (4.10) вказує, що, комбінуючи прийняті сигнали за формулою (4.9), можна отримати сигнали, які відрізняються від переданих сигналів $u_1(t)$ та $u_2(t)$ лише дійсним множником. Вищезазначений алгоритм просторово-часового кодування є ортогональним методом, відомим як Аламоуті.

Процес передачі та приймання сигналів при просторово-часовому блоковому кодуванні схематично зображений на рис. 4.3.

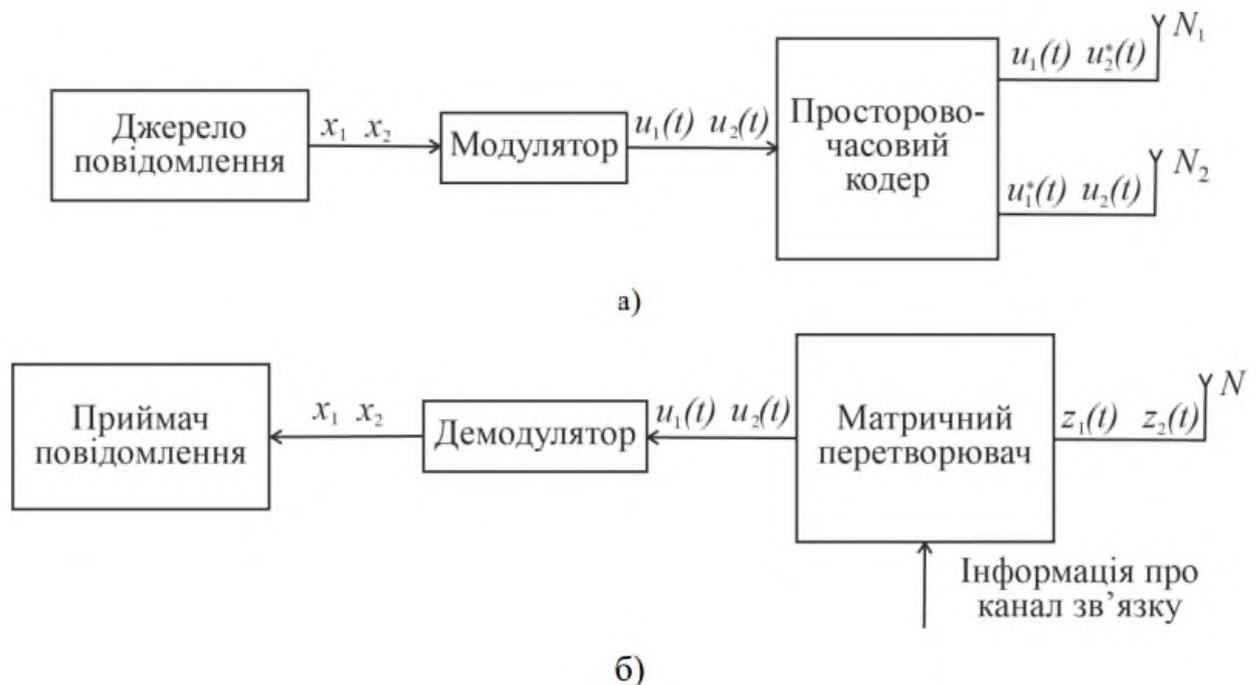


Рисунок 4.3 – Передавач (а) і приймач (б) системи з просторово-часовим блочним кодуванням

Схема на рисунку 4.3 ілюструє процес передачі та приймання сигналів у просторово-часовій блоковій кодовій системі. Символи з джерела

повідомлення спрямовані на модулятор та просторово-часовий кодер (ПВК), який випромінює різні комбінації вхідних сигналів через передавальні антени. Прийняті сигнали на приймальному кінці поступають на вхід матричного перетворювача (МП), де також враховується інформація про комплексні фединги каналу. На виході з матричного перетворювача спостерігаються передані сигнали.

Схема просторово-часового блокового кодування (STBC), зображена на рисунку 4.1, залишається актуальною і в тих випадках, коли кількість передавальних антен перевищує дві. У такому разі збільшується довжина блоку, а процедура комбінування символів у блоку ускладнюється. Запишемо вирази (1) – (3) у матричній формі, вводячи вектори $u(t)$ і $z(t)$ для переданих і прийнятих сигналів відповідно:

$$\vec{z}(t) = \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2^*(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = \mathbf{H} \vec{u}(t) \quad (4.11)$$

де \mathbf{H} - матриця, що складається з комплексних коефіцієнтів каналу, а також містить елементи, які є комплексно спряженими та зі зміненим знаком в порівнянні з відповідними елементами \mathbf{H} :

$$\mathbf{H}^H \mathbf{H} = (|h_1|^2 + |h_2|^2) \mathbf{I} = |h| \mathbf{I} \quad (4.12)$$

де $(\bullet)^H$ - ермітове спряження (комплексне спряження і транспонування);

\mathbf{I} - одинична матриця; h - сума квадратів модулів всіх федингів радіоканалу.

Оцінка вектора переданих сигналів визначається таким чином:

$$\hat{\vec{u}}(t) = \mathbf{H}^H \vec{z}(t) \quad (4.13)$$

Вираз (6) визначає матричну форму запису виразу (3).

Вираз для степеня виграшу багатоантенної системи STBC в порівнянні з одноантенною системою зв'язку визначається так:

$$\hat{\vec{u}}(t) = \vec{u}(t) \sum_{n=1}^{M_t} |h_n|^2 \quad (4.14)$$

Вираз (4.14) вказує на те, що сигнальна потужність на виході системи просторово-часового кодування є сумою потужностей, що надходять у приймач від усіх антен передавача. Перевага цієї системи полягає в тому, що такий результат досягається без додаткового ускладнення блоку прийому.

Система MISO (одна передавальна антена, кілька приймальних) у випадку прямої видимості найбільш ефективна, коли передавач і приймач взаємодіють та спрямовують сигнал один на одного. Також, оскільки система SIMO (багато передавальних антен, одна приймальна) забезпечує підсилення від масиву на вхід приймача, а система MISO забезпечує підсилення від масиву передавача, система MIMO із просторовим розширенням лінії прямої видимості може використовувати переваги як від передавання, так і від прийому.

Для ілюстрації, припустимо систему MIMO із чотирма передавальними та чотирма приймальними антенами. Крива BER підтверджує, що як передавальний, так і приймальний масиви вносять вагомий внесок у підсилення масиву на рівні 6 дБ кожен, забезпечуючи загальне підсилення в 12 дБ порівняно із випадком SISO.

Далі, розглядаючи канал MISO з багатьма шляхами, порівняно з

ситуацією SIMO для багатьох шляхів, продуктивність системи MISO є менш ефективною. Це пояснюється тим, що в MISO є лише одна копія прийнятого сигналу, і потужність передачі розподіляється між кількома шляхами.

4.3 Формування променя для систем MIMO-OFDM

У попередні роки мобільні антени випромінювали свій сигнал фіксованою дугою, і ефективність отримання сильного сигналу залежала від численних чинників, включаючи відстань до антени. У нових мобільних антен для мережі 5G використовується інноваційна технологія, відома як формування променя.

Перше, важливо пам'ятати, що дві ключові переваги 5G, а саме значне збільшення пропускної здатності та швидкості передачі даних у мережі, досягаються завдяки комбінації вдосконалених технологій. Це включає в себе вдосконалений алгоритм 5G, використання різних частот радіохвиль та розвинуті антени як на мобільних телефонах, так і на великих пристроях, розташованих на дахах будівель.

Найменші антени 5G, які ми називаємо LampSite, розташовані у високощільних будівлях, таких як аеропорти, торгові центри або спортивні стадіони, і складаються з чотирьох передавачів і чотирьох приймачів. Давайте розглянемо фізику радіохвиль. Змінюючи потужність сусідніх дрібних антен в блоку Massive MIMO, ми можемо перетворювати радіохвилі в промені і направляти ці промені на мобільні телефони, що їх приймають, подібно до того, як промінь прожектора нашого корабля. Це і є формування променя.

Далі сигнал проходить через канал MIMO. Загалом, два важливі чинники впливають на потужність прийнятого сигналу: втрати при поширенні на відстань (відомі як втрати шляху у вільному просторі) і затухання від багатопроменевого поширення. На рисунку 4.4 наведено схематичне зображення структури каналу зв'язку.

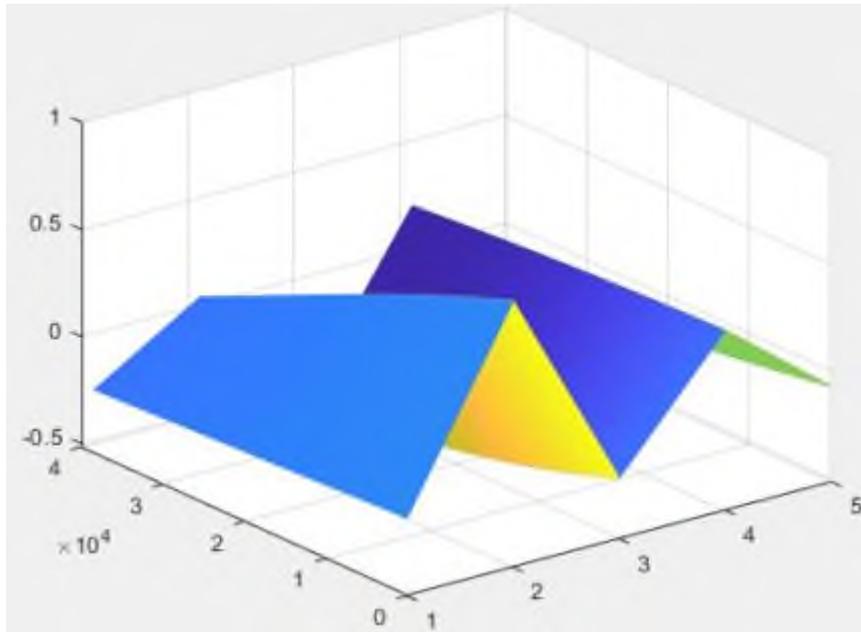


Рисунок 4.4 – Структура каналу зв'язку MIMO

Рисунок 4.5 відображає часову діаграму сигналу у каналі зв'язку.

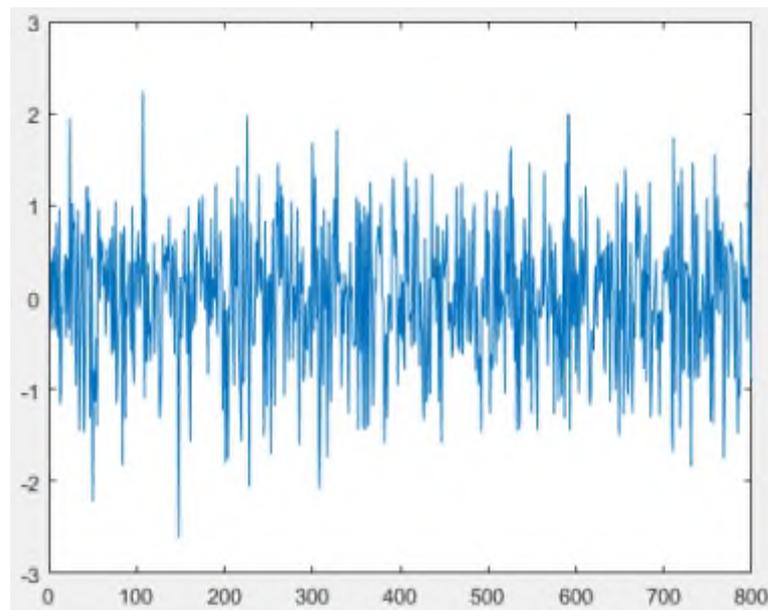


Рисунок 4.5 – Часова діаграма сигналу у каналі зв'язку

Приймальна антена взаємодіє як з сигналом, що поширюється, так і з завадами, передаючи їх приймачу для відновлення корисної інформації. Приймач MIMO-OFDM складається з каскаду обчислювальних етапів, таких як демодуляція OFDM, демодуляція QAM, дескремблювання, еквалайзер, декодування Вітербі та інші. Цей процес дозволяє ефективно відновлювати

передану інформацію та оптимізує приймання сигналів у системі MIMO-OFDM, забезпечуючи високий рівень надійності та продуктивності приймача. Схема сузір'я показана на рисунку 4.6.

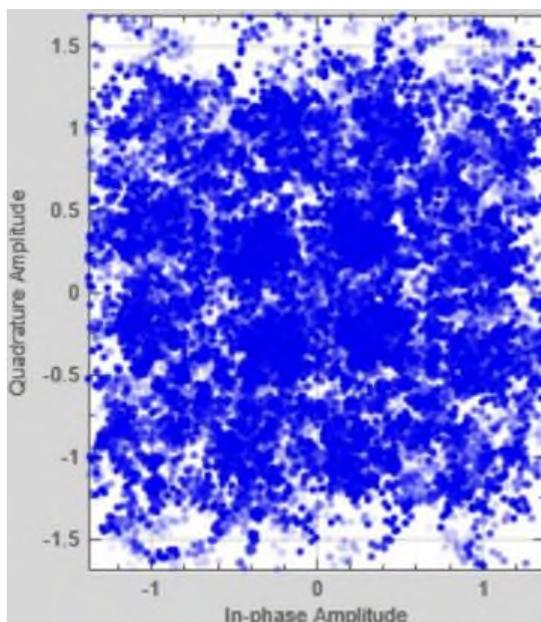


Рисунок 4.6 - Сузір'я цифрової модуляції з низьким відношенням сигнал-шум

Високий BER головним чином виникає тоді, коли мобільний пристрій знаходиться поза зоною напрямку управління масивом базових станцій. Однак, якщо мобільний телефон налаштований в напрямку управління масивом, BER суттєво покращується, що ілюструється на рисунку 4.7.

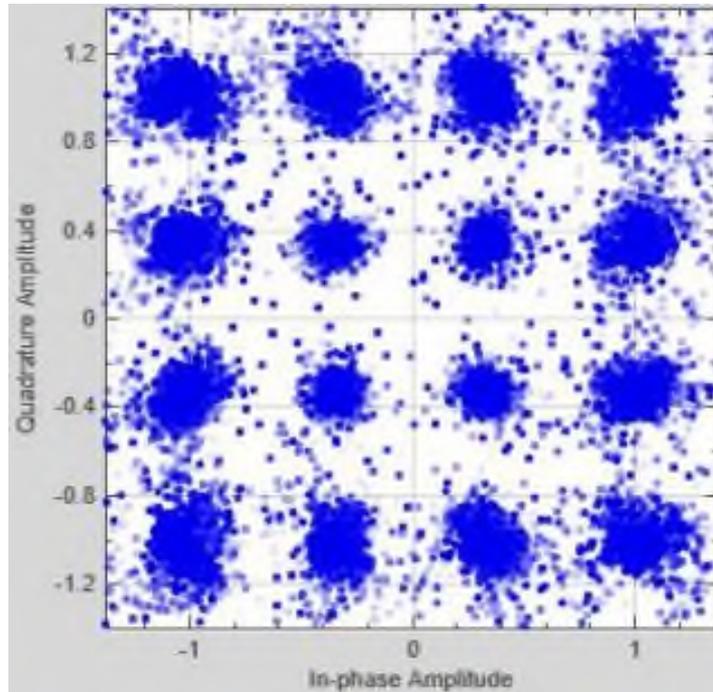


Рисунок 4.7 - Сузір'я цифрової модуляції з високим відношенням сигнал-шум

Для вирішення цих обчислень, що вимагають значних розрахункових зусиль, ми використовуємо штучний інтелект (AI) в задній частині антени. Технологія формування променя має свої переваги, забезпечуючи відбиття радіохвиль від будівель. Це забезпечує стабільний сигнал в областях, які можуть не бути прямо в полі зору (LoS) антен Massive MIMO.

4.4 Вплив взаємного зв'язку антен у системі MIMO

Давайте розглянемо, як взаємодія антен впливає на ефективність передачі ортогонального просторово-часового блочного коду (OSTBC) через канал з багатьма входами та виходами (MIMO). У нашому випадку передавач і приймач обладнані по дві дипольні антени. Давайте розглянемо коефіцієнт бітових помилок. Системні параметри:

Alamouti OSTBC, що використовує QPSK-модуляцію, передається через квазістатичний канал Релея 2x2 з плоскою частотою. Система функціонує на частоті 24 ГГц, а діапазон відношення сигнал/шум (SNR), що підлягає

моделюванню, охоплює значення від 0 до 10 дБ.

На обох сторонах, як на передавальній (Tx), так і на приймальній (Rx), використовуються двохелементні резонансні дипольні масиви. У передавальному масиві (Tx) диполі розташовані на половину довжини хвилі. З іншого боку, на приймальному масиві (Rx) інтервал між диполями становить десятину довжини хвилі.

Матриці просторової кореляції передачі та прийому визначають взаємозв'язок у середовищі поширення каналу. У відсутності зв'язку передбачається, що два елементи в передавальному масиві (Tx) не мають кореляції, тоді як два елементи в приймальному масиві (Rx) мають високу кореляцію. Загальна кореляційна матриця для всього каналу є добутком Кронекера.

Метод комбінації використовує підхід до зміни матриць кореляції Tx і Rx шляхом їх попереднього та подальшого множення на відповідні матриці зв'язку.

Змоделюємо QPSK-модульований код Аламоуті для кожного значення SNR з антеною і без неї. Кожен код Аламоуті моделюється через MIMO канал для кожної ітерації. Для моделювання квазістатичного каналу отримуємо новий набір коефіцієнтів підсилення каналу для кожної передачі коду (ітерації). На рисунку 4.8 показано сильний зв'язок (відстань = $0,1\lambda$) та сильна кореляція (0,9), а на рисунку 4.9 — сильний зв'язок (відстань = $0,1\lambda$) та слабка кореляція (0,1).

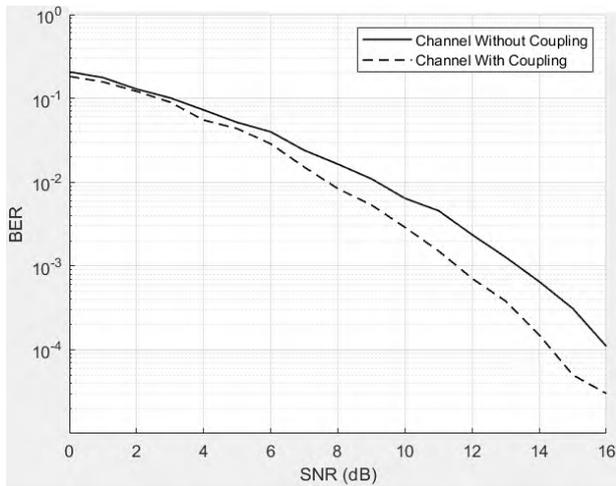


Рисунок 4.8 – Сильний зв'язок (відстань = $0,1\lambda$), сильна кореляція (0,9)

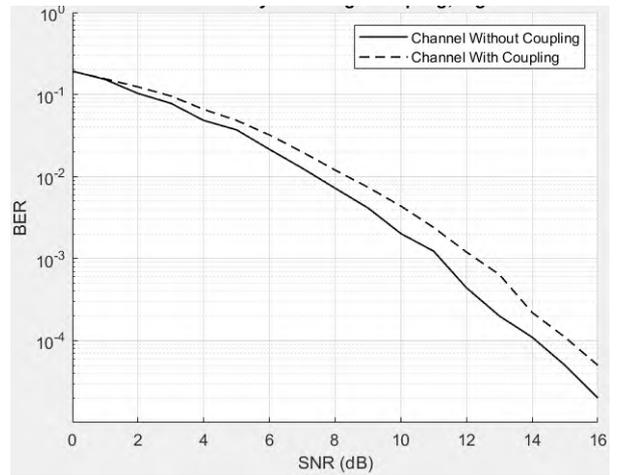


Рисунок 4.9 – Сильний зв'язок (відстань = $0,1\lambda$), слабка кореляція (0,1)

Відобразимо слабкий зв'язок (відстань = $0,5\lambda$) та сильну кореляцію (0,9) на рисунку 3.10. Також покажемо слабкий зв'язок (відстань = $0,5\lambda$) та слабку кореляцію (0,1) на рисунку 3.11.

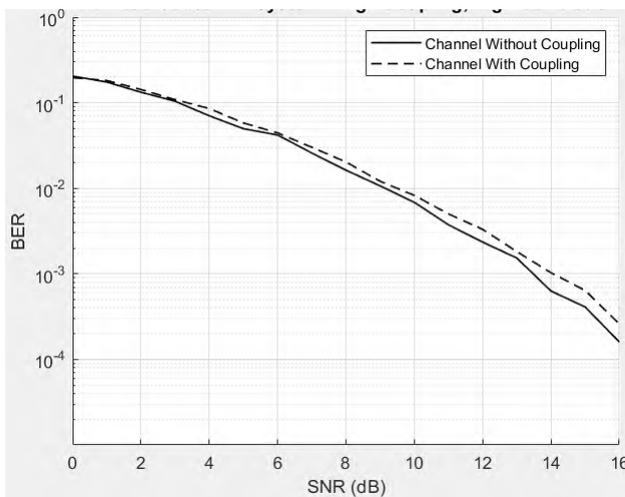


Рисунок 4.10 – Слабкий зв'язок (відстань = $0,5\lambda$), сильна кореляція (0,9)

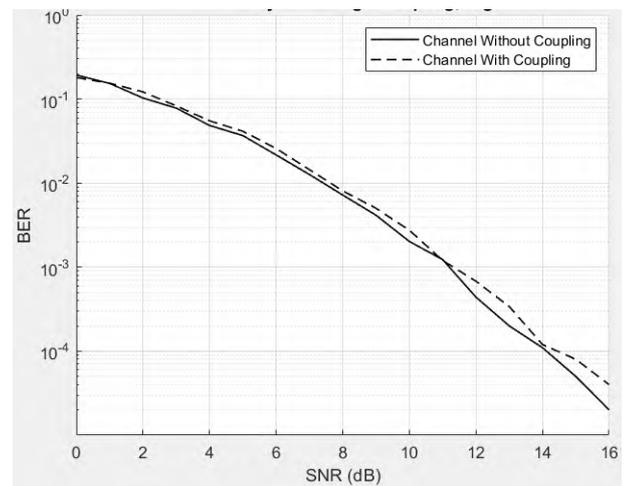


Рисунок 4.11 – Слабкий зв'язок (відстань = $0,5\lambda$), слабка кореляція (0,1)

Враховуючи, що менша відстань вказує на більший взаємний зв'язок, аналогічно до того, як ми вже розглядали для високої кореляції (0,9) та малих відстаней (рознос = $0,1\lambda$) на приймачі (Rx), зараз ми представляємо результати впливу відстані та кореляції на BER в залежності від SNR для ситуацій низької кореляції (0,1) та/або великого зв'язку (рознос = $0,5\lambda$).

Антенні масиви стали стандартним елементом конфігурації систем бездротового зв'язку 5G. Оскільки у решітці антен присутні кілька елементів, такі системи бездротового зв'язку часто називають системами з кількома входами та кількома виходами (MIMO). Антенні решітки можуть вдосконалити співвідношення сигнал-шум, використовуючи надмірність у кількох каналах передачі та прийому. Крім того, вони надають можливість повторного використання просторової інформації в системі для покращення зони покриття.

Допустимо, що система діє на частоті 60 ГГц. Передавач розташований в початкових координатах, а приймач розташований на відстані 1,6 км. Усюди в цьому прикладі використовується функція `scatteringchanmtx` для створення матриці каналу для різних конфігурацій масивів передачі та прийому. Ця функція імітує взаємодію сигналу з кількома розсіювачами між передавальним та приймальним масивами. Спочатку сигнал проходить від передавального масиву до всіх розсіювачів, а потім відбивається від них і досягає приймального масиву. Таким чином, кожен розсіювач визначає шлях проходження сигналу між масивами передачі та прийому. Результативна матриця каналу описує середовище з багатопроменевим поширенням. Ця функція пристосована для роботи з антенними решітками будь-якого розміру та у будь-якому частотному діапазоні.

Найпростіший бездротовий канал - це поширення по лінії прямої видимості (LOS), яке часто зустрічається у сільській місцевості. Розглянемо канал SISO LOS. Перед обговоренням продуктивності системи MIMO корисно розглянути базовий рівень системи зв'язку з одним входом та одним виходом (SISO). Канал SISO LOS має прямий шлях від передавача до приймача і може бути моделюваний як окремий випадок багатопроменевого каналу. Графік частоти помилок по бітах (BER) для такого каналу SISO з використанням модуляції BPSK показано на рисунку 4.12.

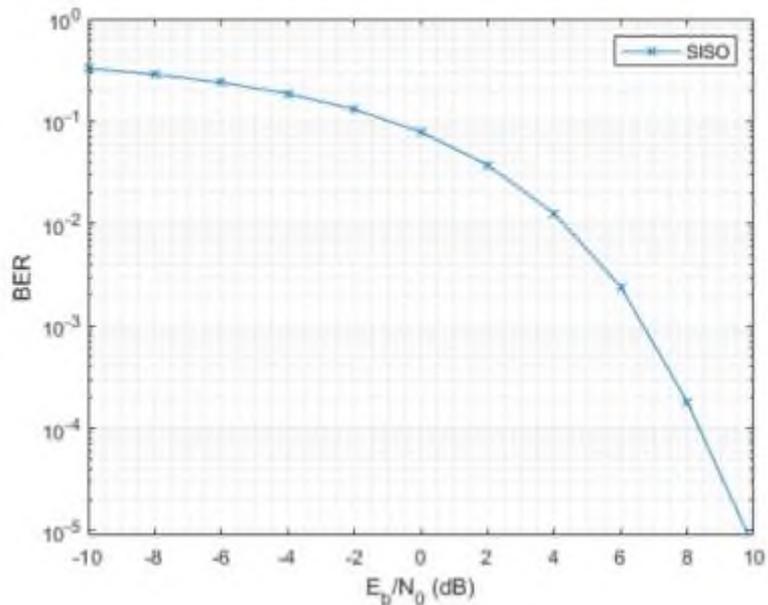


Рисунок 4.12 - Частота помилок по бітах (BER) для каналу SISO

Розглянемо канал SIMO LOS, де виходимо за рамки базового рівня системи SISO та приділяємо увагу системі з одним входом та кількома виходами (SIMO). У цій системі існує одна передавальна антена та кілька приймальних антен. Прямий шлях від передавача до приймача присутній. У системі SIMO, де сигнали через елементи приймальної решітки когерентні, можна направити приймальну решітку в бік передавача для покращення SNR. Це ґрунтується на тому, що напрямок вхідного сигналу відомий приймачу, і цей кут визначається алгоритмами оцінки напрямку приходу. Крива BER показує підсилення у 6 дБ для приймальної решітки.

Тепер розглянемо канал MISO LOS. Система з кількома входами та одним виходом (MISO) працює подібно до системи SIMO. У цьому випадку передавач є 4-елементним ULA (лінійним масивом антен) з розносом в половину довжини хвилі. Система MISO на лінії прямої видимості забезпечує оптимальне співвідношення сигнал-шум, коли передавач інформований про місцезнаходження приймача.

З попереднім керуванням продуктивність MISO еквівалентна продуктивності SIMO, і це призводить до підвищення SNR на 6 дБ. Це може

бути не так інтуїтивно зрозуміло порівняно з випадком SIMO, оскільки загальна потужність передачі залишається незмінною. Однак, замінивши одну ізотропну антену 4-елементною передавальною антенною решіткою, можна отримати підсилення в 6 дБ.

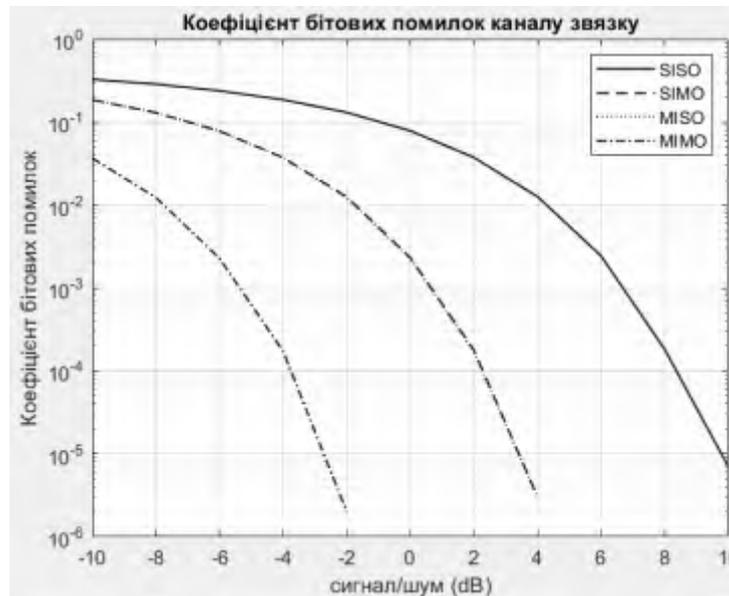


Рисунок 4.13 – Залежність коефіцієнту бітових помилок від відношення сигнал-шум для систем зв'язку: один вхід-один вихід; один вхід-багато виходів; багато входів-один вихід; багато входів-багато виходів.

Враховуючи важливість підсилення масиву як для передавача, так і для приймача в системі з багатьма входами та багатьма виходами (MIMO) на каналі з поширенням по лінії прямої видимості (LOS), можна визначити, що як передавальний масив, так і приймальний масив принесли значний внесок у підсилення. Крива коефіцієнта бітових помилок (BER) демонструє, що в порівнянні з системою з одним входом та одним виходом (SISO) випередження досягає 12 дБ, що є суттєвим покращенням завдяки використанню MIMO LOS.

4.5 Підсилення сигналів при рознесенні

У попередніх відділах розглядалися в основному канали прямої видимості, але в реальних системах бездротового зв'язку часто маємо справу з умовами

багатопротеневого замирання. Давайте вивчимо, як можна використовувати антенні масиви в умовах багатопротеневого замирання. Розглянемо багатопротеневий канал з одним входом та одним виходом (SISO).

Припустимо, що в каналі існують 10 випадково розташованих розсіювачів, що створюють 10 шляхів від передавача до приймача, як зображено на рисунку 4.14.

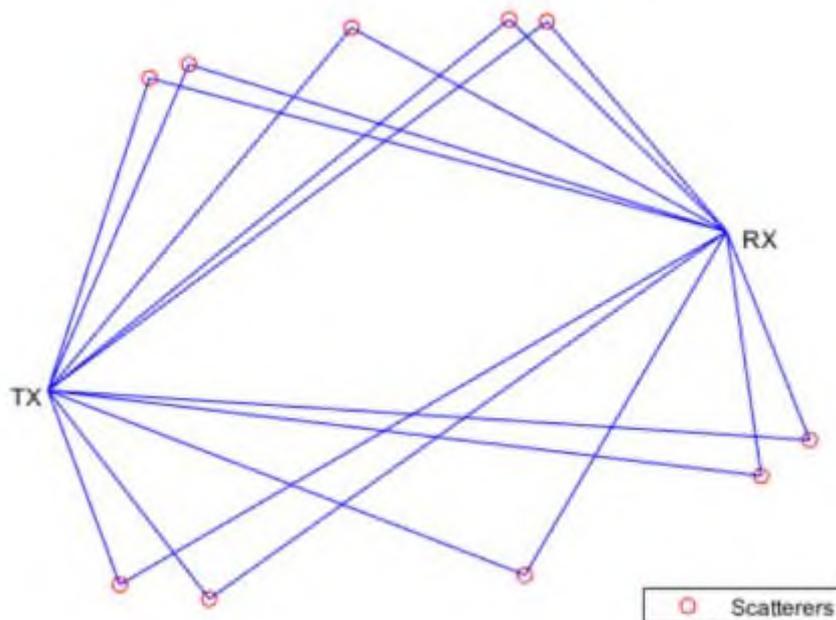


Рисунок 4.14 – Шляхи розповсюдження сигналу для системи MIMO

Для спрощення припустимо, що сигнали, що проходять через всі ці шляхи, надходять протягом одного символного періоду, і, отже, частота каналу є пласкою. Щоб змодельовати криву BER для каналу із замираннями, канал повинен змінюватися з часом. Давайте припустимо, що у нас є 1000 кадрів, і кожен кадр містить 10000 бітів. Порівняно з кривою BER, отриманою для каналу з прямою видимістю, BER падає значно повільніше зі збільшенням відношення сигнал-шум до спектральної щільності потужності шуму (E_b/N_0) через замирання, викликане багатопротеневим поширенням.

Розглянемо багатопротеневий канал SIMO. Чим більше приймальних антен використовується у приймальній решітці, тим більше копій прийнятих

сигналів стає доступними у приймачі. Знову припустимо, що у приймачі використовується 4-елементний ULA (лінійний масив).

Оптимальні ваги для комбінованого приймача можна отримати шляхом зіставлення відгуку каналу. Така схема комбінування часто називається комбінуванням із максимальним відношенням сигнал-шум (MRC). Хоча теоретично для такої схеми необхідно знання каналу, на практиці відгук каналу можна частково оцінити з використанням антенного масиву приймача.

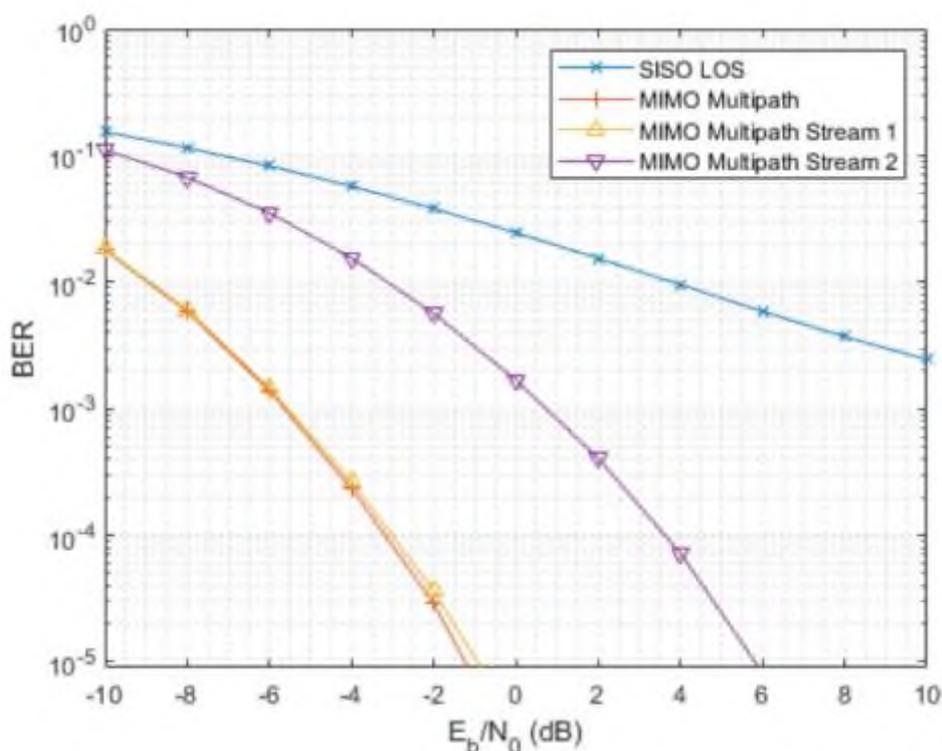


Рисунок 4.15 – Залежність коефіцієнту бітових помилок від відношення сигналшум для системи MIMO з багатьма шляхами розповсюдження

У новій конфігурації прийнятий сигнал не враховується з використанням вектора управління в конкретному напрямку. Замість цього для визначення ваг приймача в цьому випадку використовується комплексне сполучення відгуку каналу. Такий підхід враховує можливі відмінності у фазі між прийнятим і переданим сигналами через багатопроменеве поширення.

Важливо відзначити, що через багатопроменевість сигнал, який

приймається, може не бути фазово синхронізованим із переданим сигналом. Це передбачає, що відгук каналу відомий приймачу. Якщо відгук каналу невідомий, для його оцінки можна використовувати пілот-сигнали, які є відомими для приймача.

Розглянемо багатопроменевий канал MISO. У випадку, коли в системі MISO існує багатопроменеве поширення, оптимізація SNR залишається аналогічною комбінуванню з максимальним відношенням сигнал-шум, якщо канал відомий передавачу. Однак, якщо відгук каналу невідомий, можна використовувати стратегії просторово-часового кодування, наприклад, використання коду Аламоуті, для вивчення рознесення, коли канал невідомий.

Графік показує конфігурацію каналу MIMO 4x4, де і передавач, і приймач мають 4-елементні лінійні антенні масиви. Існують різні шляхи між масивом передачі та масивом прийому через наявність розсіювачів, кожен із яких складається з одного відображення відповідного розсіювача.

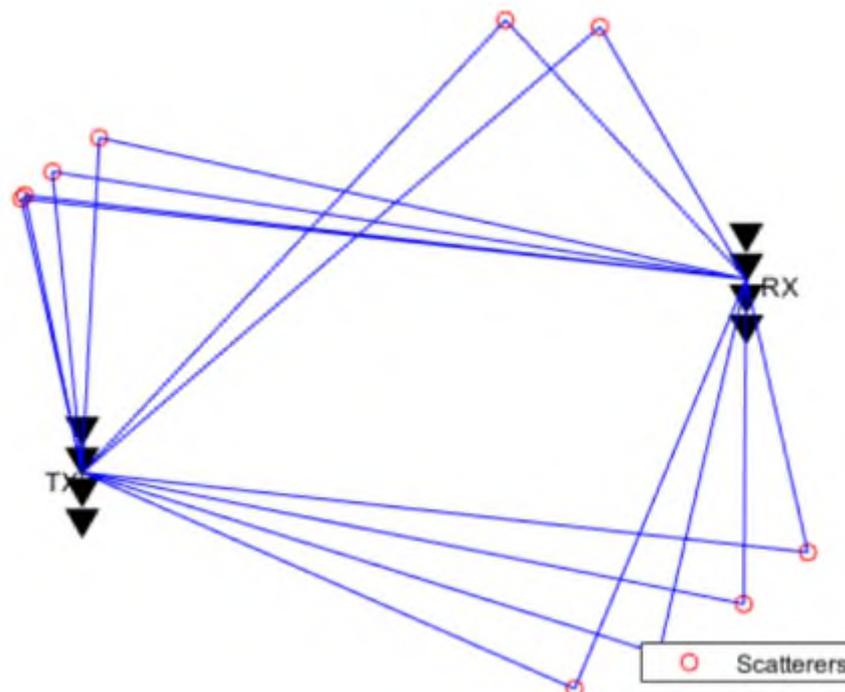


Рисунок 4.16 – Шляхи розповсюдження системи MIMO

Можна скористатися перевагами MIMO-каналу двома способами.

Перший спосіб полягає у вивченні виграшу від рознесення, який надає канал МІМО. На рисунку 4.17 представлено виграш від рознесення за допомогою кривої BER.

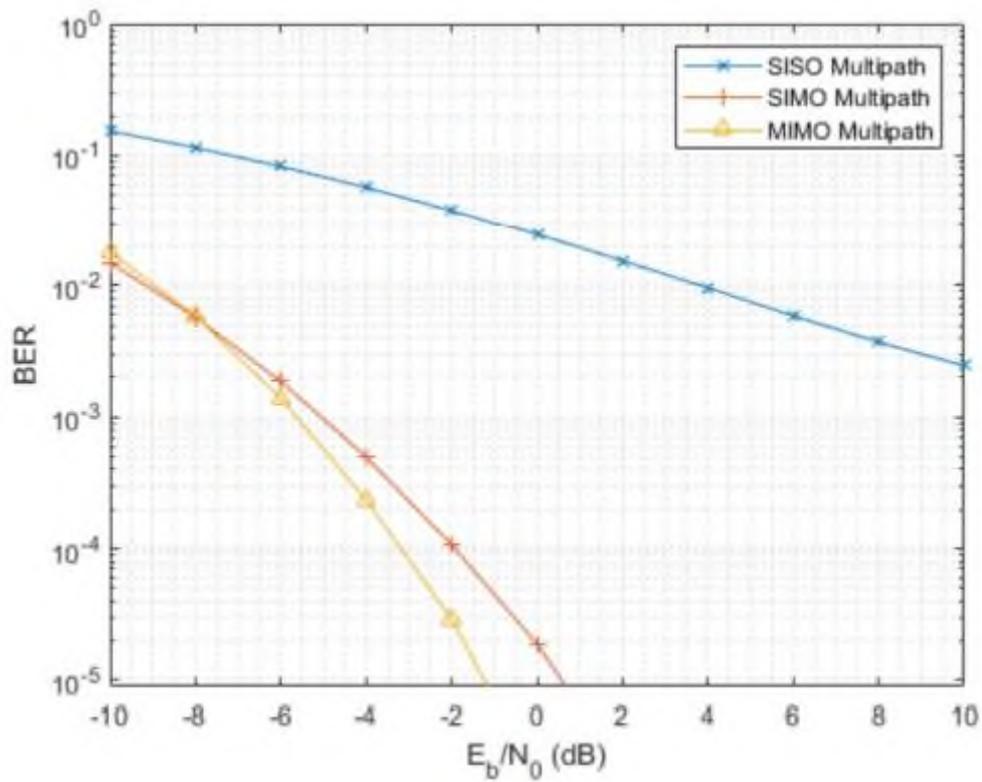


Рисунок 4.17 – Залежність коефіцієнту бітових помилок від відношення сигнал-шум для системи МІМО з рознесенням

Порівняймо криву BER в МІМО-каналі з кривою BER у системі SIMO. У випадку багатопроменевості виграш від рознесення в МІМО-каналі не завжди перевищує виграш від рознесення, який можливий у каналі SIMO. Так відбувається тому, що для досягнення найкращого виграшу від рознесення використовується лише домінуючий режим у МІМО-каналі, хоча в самому каналі може існувати й інші режими, які також можна було б використовувати.

Суть просторового мультиплексування полягає в тому, що багатопроменевий МІМО-канал з великою кількістю розсіювачів може одночасно передавати кілька потоків даних через канал. Наприклад, матриця каналу МІМО 4x4 стає повноцінною завдяки розсіювачам. Це означає, що можна передавати одночасно до 4 потоків даних. Головна мета просторового

мультиплексування полягає не тільки в підвищенні SNR, але й в збільшенні пропускної здатності системи.

Ідея просторового мультиплексування полягає в розділенні матриці каналу на різні режими, дозволяючи незалежно відновлювати потік даних, відправлений з різних елементів масиву передачі, з прийнятого сигналу. Це досягається шляхом попереднього кодування потоку даних перед передачею та подальшого об'єднання після прийому. Ваги попереднього кодування та об'єднання можуть бути розраховані з матриці каналу.

Щоб краще зрозуміти, як комбінація попереднього кодування та ваг може допомагати передавати кілька потоків даних одночасно, розглянемо добуток ваг та матриці каналу. Цей добуток представляє собою діагональну матрицю, що означає, що інформація, отримана кожним елементом масиву прийому, представляє собою масштабовану версію елемента масиву передачі. Це дозволяє розглядати кожен елемент як окремий ортогональний підканал всередині вихідного каналу.

Хоча другий потік може не мати такого ж підсилення, як перший, оскільки він використовує менш домінуючий підканал, загальна пропускна здатність збільшується. Отже, пропускна здатність каналу вимірюється як важливий показник продуктивності, а не крива BER. Цей підхід дозволяє покращити ефективність передачі даних у системі MIMO.

Від проектування променя до передкодування. Зрештою, слід розглянути, як ці різні методи використання масивів взаємодіють один з одним. Розпочинаючи з лінії прямого видимості (LOS), як зазначалося у попередніх розділах, перевага, яку надає масив, полягає у покращенні відношення сигнал-шум (SNR).

За схемою можна побачити, що у цьому випадку ваги передачі та прийому формують два промені, спрямовані один на одного. Залежно від характеру каналу масиви можуть використовуватися для покращення SNR

шляхом підсилення масиву, підсилення розсіювання або збільшення пропускну здатності за рахунок просторового мультиплексування.

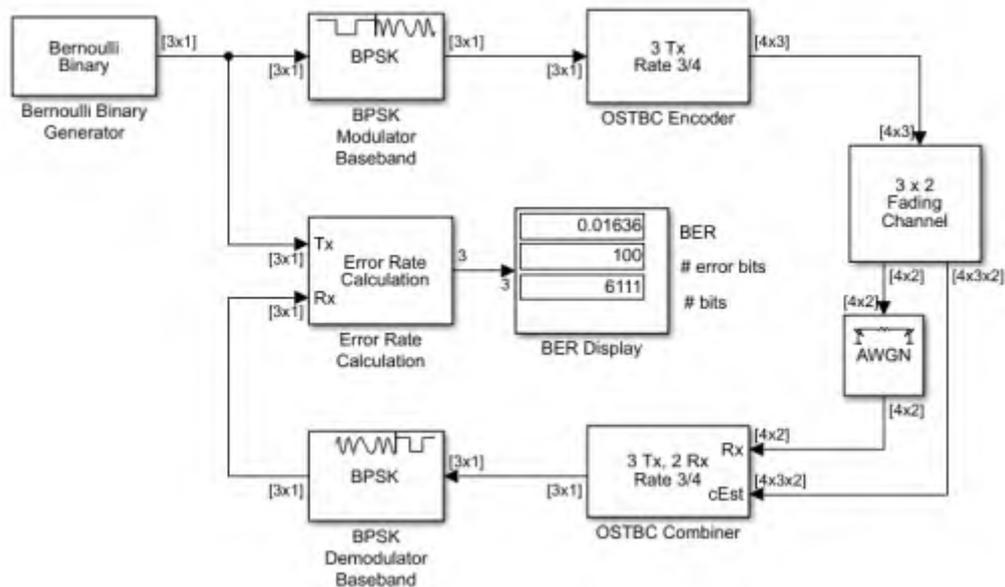


Рисунок 4.18 – Simulink модель системи MIMO

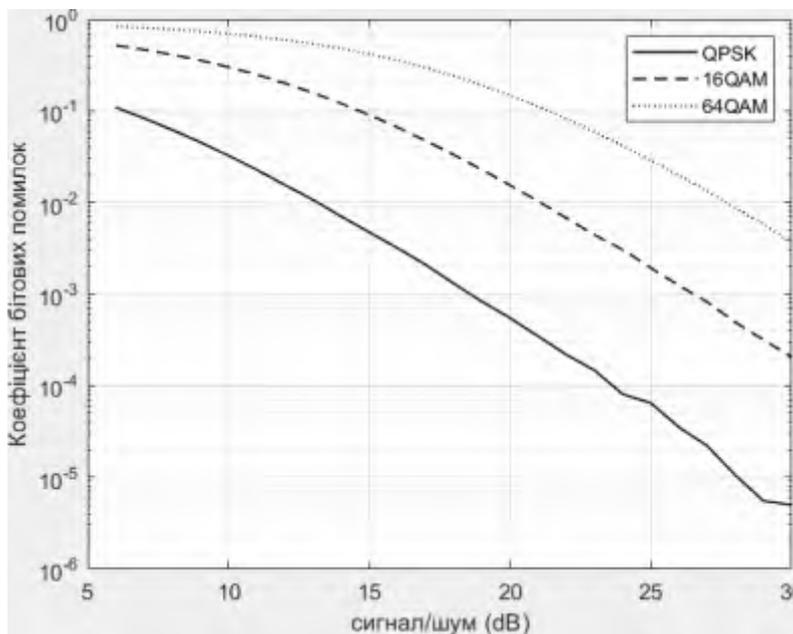


Рисунок 4.19 – Залежність коефіцієнту бітових помилок від відношення сигналшум системи MIMO і модуляцією QPSK, 16-QAM, 64-QAM

Отже, підсилення масиву досягається через формування променя. Коли існує лише один доступний шлях між масивами передачі та прийому,

попереднє кодування перетворюється у схему формування діаграми напрямленості. Зі збільшенням позиційності модуляції для досягнення визначеного коефіцієнта бітових помилок необхідно підвищувати відношення сигнал-шум.

Модуляція QPSK передає 2 біта на символ, 16-QAM – 4 біта на символ, 64-QAM – 6 бітів на символ. Щоб збільшити швидкість передачі з 2 біт на символ до 6 біт на символ при коефіцієнті бітової помилки $1e-5$, потрібно підвищити відношення сигнал-шум на 13 дБ.

Висновки до четвертого розділу

Взаємодія між елементами антени в антенній решітці визначається електромагнітним взаємодією. Струм, що виникає в кожному елементі решітки, залежить від його власного збудження і внесків від сусідніх антенних елементів. Рознесення на рівні $0,5\lambda$ має невеликий вплив на BER (бітовий відсоток помилок) як при високій, так і при низькій кореляції.

У випадку високого ступеня зв'язку, наприклад, з відстанню між елементами $0,1\lambda$, результати свідчать, що в залежності від умов кореляції BER зв'язок може бути вищим або нижчим, ніж у випадку, коли зчеплення не враховувалося.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Основні причини виробничих травм та професійних захворювань

Виробничі травми та професійні захворювання є серйозною проблемою в робочих середовищах і можуть виникати з різних причин. Ось кілька основних причин, які сприяють виробничим травмам та професійним захворюванням:

- Необлаштовані робочі місця: Недостатнє обладнання та несприятливі

умови праці можуть призводити до травм, таких як кільця, вивихи, або падіння.

- Важкі фізичні навантаження: Підвищена фізична активність або підняття важких навантажень без відповідного обладнання та заходів безпеки може викликати травми опорно-рухової системи.
- Шкідливі хімічні речовини: Контакт з токсичними речовинами або їх вдихання може призвести до хімічних отруєнь, алергій або хронічних захворювань.
- Фізичні агенти: Довготривалий вплив на організм різних фізичних чинників, таких як висока або низька температура, вібрації, шум, може викликати захворювання або травми.
- Ергономічні проблеми: Неправильно облаштовані робочі місця, погана організація роботи та відсутність ергономічних рішень можуть сприяти розвитку травм, пов'язаних з м'язово-суглобовим апаратом.
- Стрес на роботі: Психосоціальні фактори, такі як стрес, втома, конфлікти на роботі, можуть впливати на психічне та фізичне здоров'я працівників.
- Відсутність особистого захисту: Неправильне використання або відсутність засобів індивідуального захисту може підвищити ризик виробничих травм та захворювань.

Запобігання цим проблемам передбачає впровадження ефективних систем безпеки та охорони здоров'я на робочих місцях, навчання працівників правилам безпеки, а також вдосконалення умов праці та ергономіки.

5.2 Методи дослідження виробничого травматизму.

Дослідження виробничого травматизму є важливою складовою системи управління безпекою праці. Вони дозволяють визначити причини та обставини

виробничих травм, розробляти ефективні заходи для їх запобігання та покращення умов праці. Ось деякі методи дослідження виробничого травматизму:

- Статистичний аналіз: Аналіз статистичних даних про випадки виробничого травматизму може виявити основні тенденції, частоту та тяжкість травм. Це важливий підхід для ідентифікації проблемних областей.
- Аналіз подій та нещасних випадків: Ретельний розгляд окремих випадків травм може допомогти визначити конкретні причини та чинники, що сприяли нещасним випадкам.
- Метод "Дерево вирішення проблем" (Fishbone Diagram або Ishikawa): Цей метод дозволяє визначити різні фактори, які можуть бути причинами виробничого травматизму, такі як люди, обладнання, методи, середовище, процедури та управління.
- Аудит безпеки праці: Спеціалісти можуть проводити аудити безпеки на робочих місцях для визначення відповідності процедур та стандартів, а також виявлення можливих ризиків.
- Оцінка ризиків: Визначення рівня ризику для конкретних видів робіт дозволяє визначити пріоритети щодо управління безпекою та розробки заходів зниження ризиків.
- Аналіз небезпечних факторів: Дослідження різних видів небезпечних факторів, таких як хімічні, фізичні та біологічні агенти, дозволяє визначити їхній вплив на здоров'я працівників.
- Метод SWOT-аналізу (аналіз сильних та слабких сторін, можливостей та загроз): Визначення сильних та слабких сторін управління безпекою праці допомагає визначити можливості для поліпшень та виявлення потенційних загроз.

- Анкетування та інтерв'ю: Збір думок та вражень працівників через анкетування або інтерв'ю допомагає зрозуміти їхню точку зору на умови праці та ідентифікувати можливі ризики.

Ці методи можна комбінувати для отримання комплексного розуміння виробничого травматизму та розробки ефективних заходів зниження ризиків.

ВИСНОВКИ

Системи MIMO визначаються їхньою максимальною пропускнуою здатністю, яка зменшується при наявності кореляції між сигналами на різних каналах. Основним чинником кореляції є взаємодія між елементами антенних решіток як на стороні прийому, так і на стороні передачі. При слабкому зв'язку між антенами (відстань між антенами у решітці $0,5\lambda$) коефіцієнт бітових помилок залишається практично незмінним. У випадку сильного зв'язку (відстань між антенами у решітці $= 0,1\lambda$) коефіцієнт бітових помилок $1e-4$ досягається за меншого на 1 дБ відношення сигнал-шум порівняно з відсутністю зв'язку між антенами.

Система MISO на лінії прямої видимості надає оптимальне співвідношення сигнал-шум, коли передавач направляє промінь у бік приймача. Також, оскільки система SIMO забезпечує підсилення від масиву на вході приймача, а система MISO забезпечує підсилення масиву від масиву передачі, система MIMO має перевагу, отримуючи підсилення як від передачі, так і від прийому. В обох випадках, масив передачі та масив прийому внесуть узгоджений внесок у підсилення, яке становить загальне підсилення 12 дБ порівняно з випадком SISO.

Досліджені залежності коефіцієнта бітових помилок від відношення сигнал-шум для системи зв'язку з різними видами модуляції: QPSK, 16QAM, 64QAM. Коефіцієнт бітових помилок $1e-4$ з найменшим відношенням сигнал-

шум у 24 дБ можна отримати при використанні модуляції QPSK. У випадку використання модуляції 16QAM необхідно збільшити відношення сигнал-шум на 6 дБ для досягнення такого ж коефіцієнта бітових помилок.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Климаш М.М. Технології безпроводного зв'язку /М.М. Климаш, В.О.Пелішок, П.М. Михайлович. – Львів, 2007. – 818 с.
2. Anioke, C. L., Nnamani, C. O. and Ani, C. I. “Review of Wireless MIMOChannel Models” Nigerian Journal of Technology, 35(2): 381-391, 2016.
3. Яценко С.В. Модель OFDM з цикло-стаціонарним визначенням спектру
/ С.В. Яценко, А.В. Булашенко // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи». Київ, 18 – 24 листопада 2019 р — Київ, 2019. — С. 192 – 194.
4. Вус О.С. Технологія MIMO в безпроводному зв'язку / О.С. Вус, А.В. Булашенко// Матеріали II Всеукраїнської науково-методичної конференції, м. Шостка, 20 квітня 2017 року. – Суми: Сумський державний університет, 2017. — С. 191 – 194.
5. Вус О.С. Підвищення надійності у системах MIMO / О.С. Вус, А.В. Булашенко // Матеріали XI науково-технічної конференція студентів, аспірантів та викладачів радіотехнічного факультета «Радіоелектроніка в XXI столітті». — Київ: КПІ, 16-18 травня 2017. – С. 20 – 23.
6. Вус О.С. Модель MIMO у радіомережі 4G / О.С. Вус, А.В. Булашенко // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи». Київ, 20 – 26 березня 2017 р — Київ, 2017. — С. 158 – 161.
7. Шинкарук О.М. Основи функціонування багатоканальних систем передачі інформації : навч. посібник /О.М. Шинкарук, Ю.М. Бойко, І.І.

Чесановський. – Хмельницький : ХНУ, 2011. – 231 с.

8. Бойко Ю. М. Теоретичні аспекти підвищення завадостійкості й ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завад : монографія / Ю. М. Бойко, В. А. Дружинін, С. В. Толюпа. - Київ : Логос, 2018. - 227 с.

Документація технічна фірми Analog Devices. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://www.analog.com/en/index.html>. – Назва з екрану.

10. Науково-прикладні питання забезпечення роздільної здатності і ефективності обробки сигналів у радіотехнічних та телекомунікаційних системах за наявності завад : монографія / Ю. М. Бойко, О. М. Шинкарук, Л. В. Карпова, І.І. Чесановський. – Хмельницький : ХНУ, 2019. – 218 с.

11. Гусєв О.Ю. Теорія електричного зв'язку / О.Ю. Гусєв, Г.Ф. Конахович, В.І. Корнієнко, Г.В. Кузнецов, О.Ю. Пузиренко. Навч. посібник. - Львів: Магнолія, 2006.– 364 с.

12. Багатоканальний електров'язок та телекомунікаційні технології: Підручник для студентів вищих навчальних закладів / За заг. ред. В. В. Поповського. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 596 с.

13. Банкет В.Л. Методы пространственно-временного кодирования для систем радиосвязи / В.Л. Банкет, Н.В. Незгазинская, М.С. Токар // Цифрові технології, 2009. - №6. – С. 5-16.

14. Солонина А.И. Цифровая обработка сигналов и Matlab: учеб. пособие / А.И. Солонина, Д.М. Клионский, Т.В. Меркучева, С.Н. Перов. – СПб.: БХВ- Петербург, 2013. – 512 с.

15. S. Rostami, K. Arshad and P. Rapajic, "Resource Allocation in LTE-Based MIMO Systems with Carrier Aggregation," 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/VTCFall.2016.7881200.