ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інформаційних технологій
Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЄКТ

Бакалавр
Освітній рівень

Канал передачі з просторовим кодуванням сигналів для мобільних телекомунікацій
Назва теми

Галузь знань 17 «*Електроніка та телекомунікації*»
Шифр і назва спеціальності

Спеціальність 172 «*Телекомунікації та радіотехніка*»
Шифр і назва спеціальності

Освітня програма «Телекомунікації та радіотехніка»

Шифр КПТР. 2018.009.01.06.ПЗ

Виконав: здобувач 4 курсу, група ТР-18-1 — В.М. СЛОБОДЯН
Підпис — Ініціали, прізвище

Керівник: д-р техн. наук, проф. — Ю.М. БОЙКО
Підпис, дата — Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. Кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій — С.К. ПІДЧЕНКО
підпис — Ініціали, прізвище

__06__ ___06____2022 р.

Хмельницький 2022

Хмельницький національний університет

Факультет *інформаційних технологій*
Кафедра *телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій*
Освітній рівень *бакалавр*
Галузь знань *17 Електроніка та телекомунікації*
Спеціальність *172 Телекомунікації та радіотехніка*
Освітня програма *Телекомунікації та радіотехніка*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТМІТ
____
Підпис, дата

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЄКТ

СЛОБОДЯНУ Владиславу Миколайовичу

1 Тема проєкту: Канал передачі з просторовим кодуванням сигналів для мобільних телекомунікацій
керівник проєкту БОЙКО Юлій Миколайович, д.т.н, професор.
Затверджено наказом по університету від «01» 03. 2022р. № 18
2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру: 20.05.2022р.
3 Вихідні дані до проєкту
Дослідити канал передачі з просторовим кодуванням сигналів для мобільних телекомунікацій.
В процесі виконання кваліфікаційного проєкту:
- вивчити принципи побудови систем з просторовим кодуванням сигналів;
- провести моделювання каналу MIMO у MATLAB;
- дослідити коефіцієнт бітових помилок.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити):
1) Аналіз літературних джерел 2) Структура каналу MIMO 3) Розрахунок і моделювання каналу MIMO.
5 Перелік графічного матеріалу. 1) Структура каналу передачі MIMO; 2) Взаємний зв’язок між антенами MIMO; 3) Канал зв’язку з антенними решітками

6 Консультанти розділів кваліфікаційного проєкту

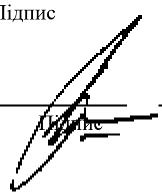
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7 Дата видачі завдання ______01.03.22 р.__________________

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Вступ. Аналіз літературних джерел	15.03.22	Вик.
2	Структура каналу МІМО	01.04.22	Вик.
3	Розрахунок і моделювання каналу МІМО	30.04.22	Вик.
4	Висновки. Презентаційні матеріали за результатами виконання кваліфікаційного проєкту.	20.05.2022	Вик.

Здобувач ____________ В.М. Слободян
Підпис Ініціали, прізвище

Керівник проєкту  ____________ Ю.М. Бойко
Підпис Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційного проєкту:

«Канал передачі з просторовим кодуванням сигналів для мобільних телекомунікацій».

Автор роботи: Слободян Владислав Миколайович

Керівник роботи: доктор техн., проф. Бойко Юлій Миколайович.

Пояснювальна записка: 74 сторінок, 34 рисунків, 16 джерел.

Графічна частина: 4 креслення, 8 презентаційних слайдів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ПРОСТОРОВЕ КОДУВАННЯ СИГНАЛІВ, КАНАЛ MIMO, КОРЕЛЯЦІЯ

Метою кваліфікаційного проєкту є дослідження каналу передачі з просторовим кодуванням сигналів для мобільних телекомунікацій, визначення коефіцієнту бітових помилок

Розглянуті принципи побудови систем з просторовим кодуванням сигналів, переваги систем MIMO. Виконано розрахунок та моделювання каналу MIMO. Системи MIMO характеризуються максимально доступною пропускною здатністю, яка знижується за наявності кореляції між сигналами у каналах. Система MIMO на лінії прямої видимості забезпечує найкраще співвідношення сигнал-шум, коли передавач спрямовує промінь у бік приймача. Канал передачі MIMO на 12 дБ енергетично ефективніший каналу SISO. Досліджена структура каналу MIMO. Фазовані антенні решітки, управління променем та формування діаграми спрямованості – технології, що дозволяють підвищити пропускну спроможність.

В.М. Слободян	
Ініціали, прізвище здобувача	Підпис, дата

Поз.	Формат	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
			Документація загальна		
1	А4	КПТР.2018.009.01.06.ПЗ	Пояснювальна записка	1	74 арк.
			Документація графічна		
2	А2	Плакат 1	Simulink модель дослідження каналу MIMO	1	
3	А2	Плакат 2	Структура каналу передачі MIMO	1	
4	А2	Плакат 3	Взаємний зв'язок між антенами MIMO	1	
5	А2	Плакат 4	Дослідження коефіцієнту бітових помилок	1	

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	КПТР. 2018.009.01.06.ВП		
Розроб.		Слободян В.М.			Канал передачі з просторовим кодуванням сигналів для мобільних телекомунікацій Відомість проекту	Літ.	Аркуш: 1 / Аркушів: 1
Перевір.		Бойко Ю. М.					
Н. контр.		Бойко Ю.М.				ХНУ, гр. ТР-18-1	
Затв.		Підченко С.К.					

ЗМІСТ

Вступ…………………………………………………………………… 8
1 Аналіз літературних джерел... 10
1.1 Технологічна еволюція систем міліметрового діапазону............................. 10
1.2 Сценарії розгортання систем зв’язку п’ятого покоління ……...................... 11
1.3 Формування діаграми спрямованості.. 14
1.4 Радіотракт перетворення сигналів міліметрових хвиль……………………. 19
1.5 Масивні системи MIMO…………………………………………………… 24
1.6 Збільшення пропускної спроможності каналу MIMO…………………... 27
Висновки до першого розділу…………………………....................... 30
2 Структура каналу MIMO……………………………………………….. 31
2.1 Частотний спектр стандарту 5G.. 31
2.2 Якість сигналів у міліметровому діапазоні.. 33
2.3 Формування діаграми спрямованості антени …………………………. 44
2.4 Застосування MIMO та формування діаграми спрямованості..................... 45
2.5 Цілісність каналу міліметрового діапазону.. 47
Висновки до другого розділу……………………………………………. 49
3 Розрахунок і моделювання каналу MIMO... 50
3.1 Принципи організації каналів MIMO ….. 50
3.2 Просторово-часове блочне кодування……….. 53
3.3 Формування променя для систем MIMO-OFDM ……………………….. 57
3.4 Вплив взаємного зв'язку антен у системі MIMO ……………………….. 60
3.5 Підсилення сигналів при рознесенні ……………………………………... 65

Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	КПТР.2018009.01.06 ПЗ
Розробив		Слободян В.			Канал передачі з просторовим кодуванням сигналів для мобільних телекомунікацій
Перевірив		Бойко Ю.М.			Літера: ; Аркуш: 6; Аркушів:
Н. контр.		Бойко Ю.М.			Пояснювальна записка
Затв.		Підченко С.К			ХНУ, гр. ТР-18-1

Висновки до третього розділу…………………………………………………… 71
Висновки... 72
Перелік джерел посилання.. 73

ВСТУП

Різке зростання трафіку бездротової передачі даних у всьому світі чинить значний тиск на існуючі системи бездротового зв'язку. Обмеження доступності спектра призвело інженерів у галузі телекомунікацій до частот міліметрового діапазону, для яких потрібні невеликі випромінюючі елементи [2]. Це зменшення розміру антенного елемента ідеально відповідає вимогам масивних MIMO і робить ці великомасштабні антенні решітки перспективною технологією. Крім того, збільшена кількість антенних елементів призводить до кращої продуктивності та покращеного відношення сигнал/завади плюс шум (SINR). У звичайних системах MIMO максимальна кількість антенних елементів, що використовуються, становить 8 на стороні передавача і ще 8 елементів на стороні приймача (система MIMO 8 × 8). Однак у масовому MIMO і в залежності від реалізованого прототипу для нового радіо 5G кількість підтримуючих антен базової станції буде до 256, а антен обладнання користувача - до 32. Збільшуючи кількість елементів антеної решітки, можна досягти значного поліпшення пропускної здатності та покриття в стільникових мережах. Крім того, більш високі втрати на трасі через високі частоти можна подолати, використовуючи кілька антенних елементів для об'єднання енергії в необхідних напрямках. Це вводить методи формування променя в MIMO, і, таким чином, радіоенергія концентрується в менших кутових секторах, що призводить до значного покращення спектральної ефективності. З введенням масивного MIMO з'явився новий перспективний метод, що додатково використовує кут місця. Це називається 3D MIMO і реалізується шляхом розгортання антени як по горизонталі, так і по вертикалі. Для досягнення 3D MIMO необхідно реалізувати 3D формування променя, дозволяючи, таким чином, базовій станції адаптуватися та динамічно керувати напрямками передачі як по азимуту, так і по куту місця. Це допомагає підвищити продуктивність системи та задовольнити зростаючий попит на ємність.

Використання систем MIMO включає важливість формування діаграми спрямованості, важливість зворотного зв'язку з інформацією про стан каналу, модель антенної решітки з діаграмою спрямованості/поляризацією для масивних систем MIMO, 3D MIMO. Формування променя призводить до значного зниження втрат потужності у зоні покриття. Це, у свою чергу, призводить до менших завад та збільшує спектральну ефективність при використанні просторового мультиплексування. Це також допомагає досягти значної економії енергії. Сценарії мобільності були розглянуті для MIMO, щоб забезпечити надійні схеми передачі. Питання, що стосуються поліпшення управління променем, відновлення після відмови променя та малої затримки, а також високонадійної передачі міліметрового діапазону є актуальними темами.

Метою кваліфікаційного проєкту є дослідження каналу передачі з просторовим кодуванням сигналів для мобільних телекомунікацій. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- вивчити принципи побудови систем з просторовим кодуванням сигналів;
- провести моделювання каналу MIMO у MATLAB;
- дослідити коефіцієнт бітових помилок.

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Технологічна еволюція систем міліметрового діапазону

Сьогодні галузь 5G фокусується в основному на покращенні мобільного широкосмугового зв'язку, спрямованої на збільшення пропускної спроможності мережі з використанням методів формування діаграми спрямованості в середній та верхній області спектра частот. Системи 5G застосовуються у промисловій автоматизації завдяки малій затримці сигналів у таких мережах. Розглянемо основні варіанти використання сигналів міліметрового діапазону хвиль для зв'язку. Важлива архітектура та технології побудови базових станцій міліметрового діапазону. Важливим є питання формування діаграми спрямованості та вплив потужності передавача на вибір технології його виготовлення. Хоча формуванню діаграми спрямованості приділяється велика увага у публікаціях, не менш важливим є процес перетворення сигналів для передачі їх у діапазоні міліметрових хвиль.

Ще кілька років тому йшла дискусія про використання діапазону міліметрових хвиль для мобільного зв'язку і про проблеми, які вирішили розробники радіопристроїв [1]. Незабаром велику частину питань вдалося прояснити, і почався швидкий прогрес у створенні пристроїв для систем зв'язку 5G – від початкових прототипів до успішних польових випробувань, і тепер ми на початковому етапі розгортання мереж 5G міліметрового діапазону. Багато що у фіксованому та мобільному зв'язку збережеться, але ми також побачимо дійсно мобільний зв'язок на частотах міліметрового діапазону.

Перші стандарти введені в дію, технології швидко розвиваються і багато чого прояснилося в питаннях розгортання систем міліметрових хвиль. Незважаючи на значний прогрес, розробники радіоапаратури ще мають вирішити чимало складних завдань.

1.2 Сценарії розгортання систем зв’язку п’ятого покоління

При розробці технології дуже важливо визначити, як буде розгорнуто систему зв'язку. На рисунку 1.1 наведено приклади організації фіксованого та мобільного зв'язку в діапазонах 39 та 28 ГГц у міському середовищі з щільною забудовою та передмісті, де щільність забудови набагато менша.

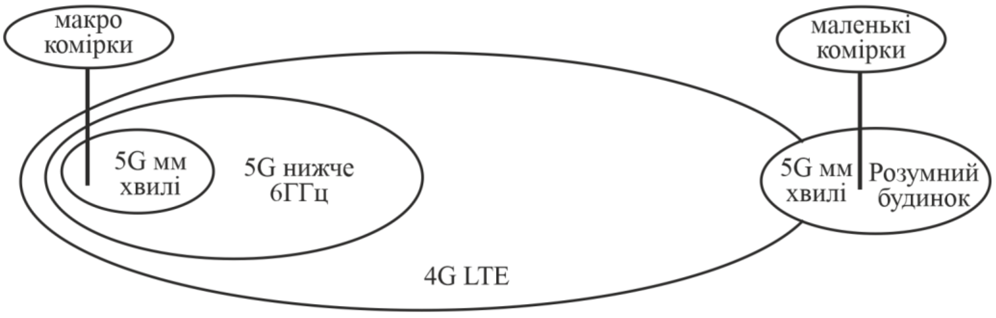


Рисунок 1.1 – Організація фіксованого та мобільного зв'язку в діапазонах міліметрових хвиль

Формування діаграми спрямованості під час використання фіксованого бездротового доступу (FWA – Fixed Wireless Acces), що забезпечує високу пропускну спроможність каналів зв'язку в передмістях є дуже важливим. Базова станція розташовується на опорі лінії електропередач або на щоглі та має забезпечити покриття великої території, щоб рішення було економічно доцільним. За такої організації обладнання споживача знаходиться поза будинком, щоб забезпечити найкращі умови для зв'язку.

Враховуючи, що антена базової станції спрямована вниз і розташування користувачів зафіксовано, не потрібний великий кут охоплення діаграми спрямованості у вертикальній площині, але потужність передавача повинна бути досить значною – не менше 65 дБм EIRP (ефективна потужність ізотропного випромінювання), щоб забезпечити максимально широку зону обслуговування існуючої інфраструктури. Схема формування діаграми спрямованості антен базової станції за різними променями показано на рисунку 1.2.

Рисунок 1.2 – Схема формування діаграми спрямованості антен

Базова станція може знаходитися на даху будівлі або на освітлювальній опорі, що вимагатиме розширення кута охоплення діаграми спрямованості у вертикальній площині. Це пов'язано з тим, що необхідно обслуговувати мобільні пристрої, розташовані на рівні землі (пішоходи та транспортні засоби), а також пристрої, розміщені у більш високих будинках, ніж те, на якому встановлено базову станцію.

При такій конфігурації діаграми спрямованості потужність передавача, можливо, і повинна бути меншою, але скління багатьох будівель вносить значне згасання в сигнал, і тому однозначної відповіді на це питання немає. Основний висновок у тому, що немає універсального рішення. Сценарій розгортання мережі 5G визначатиме спосіб формування діаграми спрямованості антени та вибір технології зв'язку.

Розглянемо практичний приклад і отримаємо простий бюджет зв'язку, щоб проілюструвати вимоги потужності передавача базової станції міліметрових хвиль. Додаткові втрати в тракті зв'язку, в порівнянні з втратами на частотах

стільникових мереж, - серйозна перешкода, яку необхідно подолати під час роботи в діапазоні міліметрових хвиль. Втрати виникають при проходженні сигналів через стіни будівель, листя, тіла людей та інші перешкоди.

Багато робіт, опублікованих останніми роками, присвячено поширенню сигналів у діапазоні міліметрових хвиль. Чудовий огляд наведено у статті "Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks-with a Focus on Propagation Models". У роботі проведено зіставлення кількох моделей, проілюстровано залежність втрат у тракті від навколишнього середовища та порівняння сценаріїв, коли станція знаходиться в полі зору (Line Of Sight - LOS) і поза полем зору (NLOS) приймача. Не вдаючись до подробиць, ми можемо сказати, що загалом сценарій NLOS потрібно розглядати для фіксованого бездротового зв'язку з огляду на бажану дальність зв'язку та ландшафт місцевості. Як приклад, ми наводимо базову станцію з радіусом зв'язку 200 м, розташовану в передмісті. Для цього випадку діаграми спрямованості ми прийняли втрати в тракті 135 дБ, припускаючи, що приймальна антена розташована зовні будівлі і знаходиться поза увагою базової станції. Якщо розглядати розташування антени всередині приміщення, то втрати тракту зростуть на 30 дБ. З іншого боку, якщо ми сприймаємо за основу сценарій LOS, то втрати у тракті може бути зменшено до 110 дБ.

У прикладі число елементів антени базової станції дорівнює 256, а число елементів антени користувача — 64. Передбачається асиметричний спосіб організації зв'язку. Базова станція забезпечує модуляцію 64QAM у низхідному каналі, а у висхідному каналі використовується модуляція 16 QAM.

Канал висхідного зв'язку може бути покращений за рахунок збільшення потужності передавача до дозволених у цьому регіоні значень. При дальності зв'язку 500 м втрати тракту збільшуються до 150 дБ, і для реалізації такого сценарію знадобляться складніші пристрої як у низхідному, так і висхідному каналі. Крім того, суттєво зросте споживання енергії.

1.3 Формування діаграми спрямованості

Тепер розглянемо різні підходи до формування діаграми спрямованості антени: аналоговий та цифровий, як показано на рис. 1.3 і рис. 1.4. Це пов’язано з з поняттям аналогового способу формування діаграми спрямованості.

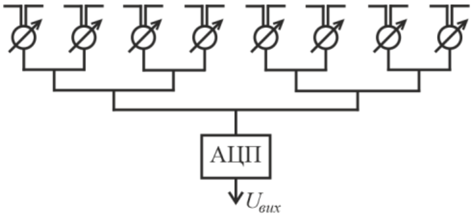


Рисунок 1.3 – Аналогова схема формування діаграми спрямованості антени

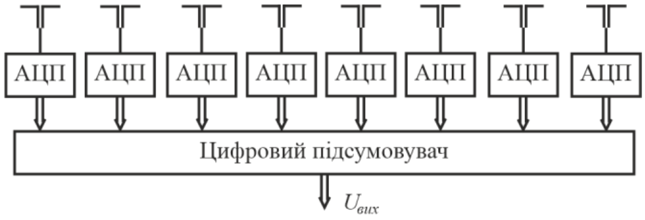


Рисунок 1.4 – Цифрова схема формування діаграми спрямованості антени

У режимі передачі цифрові сигнали за допомогою цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) перетворюються на аналогові, які потім перетворюються на сигнали ВЧ або ПЧ з використанням підвищуючих перетворювачів частоти. У режимі приймання перетворювачі здійснюють зниження частоти прийнятих сигналів, перетворення їх у цифрову форму і передачу в блок цифрової обробки.

У радіочастотному діапазоні (наприклад, 28 ГГц) ми розділяємо один канал на кілька підканалів, керуючи фазою сигналу в кожному з них так, щоб діаграма спрямованості формувалася в далекому полі в напрямку передбачуваного користувача (як у режимі передачі, так і в режимі приймання). Це дозволяє управляти одною пелюсткою діаграми спрямованості у кожному каналі даних. Теоретично, використовуючи таку архітектуру, ми можемо обслуговувати одного користувача в кожний момент часу.

Цифровий формувач діаграми спрямованості реалізує той самий принцип, але фазовий зсув сигналів здійснюється у цифровій формі. Потім цифрові сигнали з різною затримкою подаються на ЦАП, з їх допомогою перетворюються на аналогові, які через підвищуючі перетворювачі та підсилювачі потужності (в режимі передачі) спрямовуються на елемент антени. У режимі приймання сигнал від цього елемента антени через малошумний підсилювач, понижуючий перетворювач і АЦП вводяться блок цифрової обробки. Простіше кажучи, кожен приймач-передавач пов'язаний з елементом одиночної антени. Але на практиці до одного приймача може бути підключено кілька елементів антени, залежно від бажаної форми сектора діаграми спрямованості.

Цифровий підхід забезпечує найвищу пропускну здатність і гнучкість системи, а також дозволяє застосувати розраховану на багато користувачів систему MIMO в діапазоні міліметрових хвиль, аналогічно системам, що працюють в середній смузі частот. Його реалізація досить складна, а враховуючи доступні в даний час технології та елементну базу, це призводить до значного енергоспоживання як у радіочастотних, так і цифрових ланцюгах. Тим не менш, у міру подальшого розвитку технологій, цифрове формування діаграми спрямованості використовуватиметься і в діапазоні міліметрових хвиль.

Найпрактичніший і найефективніший підхід до формування діаграми спрямованості найближчим часом — гібридний цифро-аналоговий формувач, який по суті поєднує цифрове попереднє кодування та аналогове формування діаграми спрямованості, щоб створити кілька пелюсток у просторі одночасно (просторове мультиплексування).

Шляхом фокусування вузьких пелюсток діаграми у напрямку передбачуваних користувачів базова станція може повторно застосовувати той самий частотний діапазон для одночасного обслуговування кількох користувачів на заданому часовому інтервалі. Хоча в літературі повідомляється про кілька різних підходів до побудови гібридних формувачів, показаний тут підхід з використанням решіток найбільш практичний з точки зору реалізації і, по суті, є повторенням аналогових формувачів діаграми спрямованості. В даний час

системи, про які йдеться, на практиці підтримують 2-8 цифрових потоків, що використовуються для одночасної підтримки окремих користувачів, або для надання двох і більше рівнів MIMO меншій кількості користувачів.

Тепер трохи заглибимося у вибір технологій для побудови аналогового формувача діаграми спрямованості, базового блоку, на основі якого будується гібридний формувач діаграми спрямованості.

Для цього ми розділили аналогову систему формування діаграми спрямованості на три блоки: цифровий блок перетворення цифрового сигналу в аналоговий сигнал міліметрового діапазону і власне формувач діаграми спрямованості. Не той спосіб, з допомогою якого реалізується система практично. Усі компоненти високочастотної частини системи будуть розміщені в безпосередній близькості один від одного, щоб зменшити втрати, але причина такого поділу незабаром стане очевидною.

Спосіб побудови формувача діаграми спрямованості визначається багатьма факторами, включаючи форму і радіус дії сегмента, рівень потужності, втрати в тракті, теплові шуми і т. д. При реалізації системи зв'язку можуть знадобитися різні рівні потужності передачі, необхідні для розгортання сценаріїв, починаючи від невеликих сот.

У той самий час перетворення цифрових сигналів аналогові сигнали міліметрового діапазону хвиль на базової станції вимагає набагато менше зусиль і може бути реалізовано з урахуванням поточної специфікації для базових станцій [2]. Іншими словами, розробник може знову використовувати один і той же приймач разом з декількома конфігураціями формувача діаграми спрямованості. Це дещо відрізняється від сучасних систем стільникового радіозв'язку, де малосигнальна частина системи є загальною для всіх платформ, а зовнішній інтерфейс пристосований для кожного випадку використання.

Ми намітили прогрес можливих технологій для перетворення ланцюжка сигналів під час переходу від цифрового сигналу до сигналу в антені. Безумовно, цифровий та змішаний сигнали формуються за допомогою КМОП-пристроїв. Залежно від вимог базової станції весь ланцюжок вузлів для обробки сигналів

може бути розроблений за допомогою КМОП-технології або, що ймовірно, з використанням поєднання технологій для забезпечення оптимальної продуктивності. Наприклад, звичайною конфігурацією є застосування КМОП-перетворювачів даних спільно з високопродуктивним перетворенням ПЧ на ВЧ на основі технології SiGe. Як буде показано далі, формувач діаграми спрямованості може бути реалізований на основі декількох технологій відповідно до системних вимог. Залежно від вибору розміру антени та вимог до потужності передавача можлива реалізація формувача на одному кремнієвому кристалі, або це може бути комбінація інтегрального формувача діаграми спрямованості з дискретними підсилювачами потужності та малошумними підсилювачами.

Вибір технології підсилювача потужності заснований на комбінованому обліку необхідної потужності передавача, підсилення антени (кількості елементів антени) та можливості формування сигналу необхідної потужності.

Необхідна випромінювана ефективна потужність може бути досягнута за допомогою меншої кількості елементів антени із застосуванням нових технологій у зовнішньому інтерфейсі (підхід із низькою інтеграцією) або з використанням підходу з високою інтеграцією на основі кремнію. Кожен метод має свої переваги та недоліки, а практична реалізація зводиться до інженерного компромісу габаритів, маси, енергоспоживання та вартості. Щоб згенерувати сигнал потужністю 60 дБм для випадку, оптимальний розмір антени становить 128-256 елементів. При цьому меншій кількості елементів антени відповідає використання підсилювачі потужності на основі технології GaAs, у той час як більшому числу елементів антени є повністю інтегроване рішення на основі кремнієвої технології формування діаграми спрямованості.

Тепер давайте розглянемо проблему з іншого погляду. Ефективна потужність 60 дБм зазвичай вказується для фіксованого радіозв'язку. Але це число може бути більшим або меншим залежно від бажаного радіусу дії базової станції та стану навколишнього середовища. Зважаючи на великі розбіжності у сценаріях розгортання, незалежно від того, чи багато на території зелених насаджень, чи складається вона з вузьких вулиць або широких відкритих

просторів, буде місце великий розкид втрат у радіоканалі, з якими доводиться боротися у кожному конкретному випадку. Наприклад, у щільній міській забудові, де передбачається пряма видимість базової станції, величина ефективної потужності може становити 50 дБм.

Існують визначення та опубліковані специфікації, а також межі потужності передачі, рекомендовані FCC (Федеральна комісія зв'язку США) за класами обладнання [3], і тут ми дотримуємося термінології 3GPP для базових станцій [3]. Клас обладнання певною мірою визначає вибір технології для створення підсилювача потужності. Хоча це і не є точною наукою, ми бачимо, що технологія КМОП добре підходить для реалізації мобільного обладнання (мобільного телефону) і при відносно низькій кількості антен дозволяє досягти необхідної потужності передавача. Обладнання цього типу повинно мати високий рівень інтеграції та бути енергоефективним. Локальна базова станція для малих стільників і обладнання мають схожі вимоги і охоплюють цілий ряд технологій: від КМОП для низького рівня вимог до потужності передавача до поєднання SiGe і КМОП для більш високого рівня потужності. Для базових станцій середнього радіусу дії ідеальна технологія SiGe та КМОП, що дозволяє реалізувати компактний форм-фактор. На верхньому рівні для базових станцій глобальної мережі існує ряд технологій, які можуть бути застосовані, і це зводиться до компромісу розміру антени та вартості технології. Хоча SiGe та КМОП можна застосовувати в діапазоні потужності 60 дБм, підсилювачі потужності GaAs або GaN більш практичні для високої потужності.

Показано, як удосконалюються існуючі технології. Як згадувалося в презентації "Architectures and Technologies for the 5G mm Wave Radio" [5], одним із ключових завдань для розробника є зниження енергоспоживання підсилювачами потужності міліметрового діапазону.

У міру появи нових технологій та архітектури підсилювачів потужності, наведені криві будуть зміщуватись, і для базових станцій високої потужності будуть доступні більш високоінтегровані структури. Хороший огляд досягнень у

технології виготовлення підсилювачів потужності представлений у презентації "A Short Survey on Recent Highly Efficient cmWave 5G Linear Power Amplifier Design".

Підсумовуючи розділ про формувачі діаграми спрямованості, давайте ще раз згадаємо, що в даний час не існує універсального підходу до побудови таких пристроїв і необхідно розробляти різні зовнішні інтерфейси для різних варіантів використання в залежності від призначення пристрою.

1.4 Радіотракт перетворення сигналів міліметрових хвиль

У цьому розділі розглянемо докладніше способи побудови радіотрактів для перетворення цифрових сигналів на ВЧ-сигнали діапазону міліметрових хвиль і реалізації зворотного перетворення. Дуже важливо здійснювати цифро-аналогове та аналого-цифрове перетворення з високою точністю, щоб у наступних системах можна було реалізувати методи модуляції високого порядку, такі як 64 QAM і, можливо, 256 QAM. Одна з головних проблем нових систем зв'язку — пропускна спроможність. Системи 5G, що працюють у діапазоні міліметрових хвиль, повинні забезпечувати смугу пропускання 1 ГГц або навіть ширше залежно від того, які вимоги до каналу передачі формуються на практиці. У той час як смуга пропускання 1 ГГц в діапазоні 28 ГГц характеризує порівняно низьку відносну пропускну здатність (3,5%), та сама смуга пропускання в діапазоні 3 ГГц реалізується набагато складніше і вимагає нових технологічних і конструктивних рішень. Функціональна схема перетворення цифрових сигналів на ВЧ-сигнали міліметрового діапазону може бути виконана на широкосмугових компонентах компанії Analog Devices, призначених для обробки змішаних сигналів.

Цей сигнальний ланцюжок дозволяє обробляти високочастотні сигнали в смузі частот 800 МГц діапазону 28 ГГц, забезпечуючи надзвичайно низький рівень вектора помилки. Докладніше про цей сигнальний ланцюжок та його характеристики можна дізнатися з відео Analog Devices "5G Millimeter Wave Base Station" [8].

Отже, розглянемо перетворювачі сигналів. У прикладі на рис. 6 вхідний ВЧ-сигнал перетворюється на проміжну частоту (ПЧ), значення якого вибирають в діапазоні частот до 3 ГГц (у деяких випадках вище), виходячи зі складності реалізації фільтра проміжної частоти (ФПЧ) і АЦП. Перетворення на цифровий код за допомогою АЦП здійснюється на проміжній частоті. Для роботи на таких високих частотах компанія Analog Devices випускає аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі. Коротко опишемо їх характеристики.

AD9172 – високоефективний здвоєний 16-розрядний ЦАП із цифровою обробкою сигналів та максимальною частотою дискретизації 12,6 ГГц. ЦАП має 8-розрядний порт JESD204B, що забезпечує швидкість передачі даних 15 Гбіт/с, та вбудований помножувач частоти тактового сигналу. Підтримує роботу з широкосмуговими багатосмуговими сигналами в діапазоні до 6 ГГц.

У приймальному тракті використовується здвоєний 14-розрядний АЦП AD9208 із максимальною частотою дискретизації 3 ГГц. АЦП має вбудовані буферні підсилювачі та пристрої вибірки/зберігання, що спрощує роботу з пристроєм. Смуга пропускання аналогової частини не менше ніж 9 ГГц. Це дозволяє обробляти аналогові сигнали із шириною смуги частот до 4,5 ГГц.

Як у приймальній, так і в передавальній частині використовуються широкосмугові підсилювачі з цифровим керуванням, які здійснюють не тільки посилення сигналів, але й перетворення несиметричного сигналу на симетричний і навпаки, завдяки чому можна обійтися без симетруючих пристроїв. На функціональній схемі у передавальному тракті використаний підсилювач ADL5335, а приймальному — ADL5569.

Для формування сигналу проміжної частоти в приймальному тракті встановлений понижувальний перетворювач ADMV1014, а в передавальному - підвищує ADMV1013. Ці перетворювачі призначені для роботи в діапазоні 245-435 ГГц. Така широка робоча смуга частот передбачає їх використання у всіх, визначених зараз діапазонах частот 5-мм хвиль (n257, n258, n260 і n261).

І той, і інший перетворювач підтримують роботу з ПЧ до 6 ГГц і два режими перетворення частоти. Обидва пристрої містять вбудований 4-кратний

помножувач частоти, частота на вході якого може змінюватися в межах 5,4-11,75 ГГц. ADMV1013 підтримує як пряме перетворення з I/Q-складових ВЧ-сигнал, так і перетворення в сигнал з однією бічною смугою. Коефіцієнт посилення перетворювача 14 дБ, рівень інтермодуляційних спотворень третього порядку IP3 24 дБм. При формуванні односмугового сигналу друга бічна смуга послаблюється щонайменше ніж 25 дБ.

ADMV1014 підтримує перетворення ВЧ-сигналів з однією та двома бічними смугами у складові I/Q зі зниженням частоти. Коефіцієнт перетворення 20 дБ, коефіцієнт шуму 3.5 дБ, рівень інтермодуляційних спотворень третього порядку IP3 становить -4 дБм, придушення бічної смуги 28 дБ.

Комутацію антени в режимах передачі/прийому здійснює широкосмуговий перемикач ADRF5020, що відрізняється низькими втратами (не більше 2 дБ) та великим перехідним загасанням - 60 дБ на частоті 30 ГГц.

І, нарешті, розглянемо джерело сигналів стабільної частоти. Враховуючи, що генератор, що задає, робить великий внесок у значення вектора помилки, в діапазоні міліметрових хвиль як гетеродина важливо використовувати джерело сигналів з дуже низьким фазовим шумом. ADF4372 - це широкосмуговий синтезатор на основі системи ФАПЧ з дробовим коефіцієнтом поділу, який має найкращі в галузі параметри. Інтегрований генератор, керований напругою (ГУН) із наднизьким фазовим шумом забезпечує роботу синтезатора в діапазоні частот 62,5 МГц - 16 ГГц. Спектральна щільність фазового шуму ГУН на частоті 8 ГГц становить –111 дБн/Гц при відхиленні від центральної частоти на 100 кГц та –134 дБн/Гц – при відхиленні 1 МГц.

Для будь-якого розробника функціональна схема, наведена на рис. 6 служить хорошою відправною точкою з урахуванням особливостей роботи в діапазонах частот 28 і 39 ГГц. Вона придатна для використання в системах з різними варіантами формування діаграми спрямованості антени, що вимагають застосування широкосмугових приймачів. Компанія Analog Devices пропонує велику кількість компонентів (RF, Microwave та Millimeter Wave Products Selection Guide/), призначених для роботи в частотних діапазонах міліметрових хвиль.

У багатоантенних системах з декількома просторовими каналами вважається, що число передаючих антен не більше за кількість приймальних ($N_t < N_r$). І тут можна отримати швидкості передачі, близькі до граничним без адаптації, тобто. якщо параметри каналу відомі у передавачі.

У МІМО-системі зв'язку з N_t передаючими та N_r приймальними антенами при $N_t \leq N_r$ вхідний потік даних поділяється на N_t підпотоків. Послідовно-паралельний демультиплексор (рисунок1.5) виконує цей поділ.

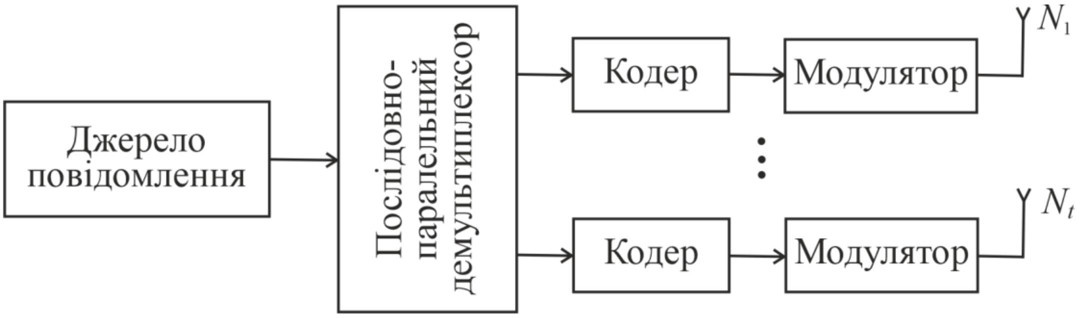


Рисунок 1.5 – Передавач МІМО-системі зв'язку

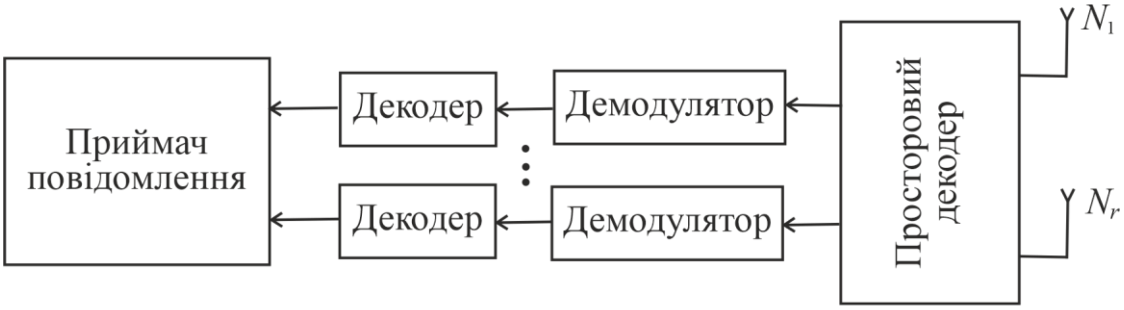


Рисунок 1.6 – Приймач МІМО-системі зв'язку

Кожен підпотік після кодування та модуляції випромінюється окремою антеною. Всі N_t підпотоків випромінюються одночасно в одній і тій же смузі частот. Для всіх підпотоків можуть використовуватися ідентичні коди та модулятори.

Випромінені N_t потоків створюють сигнали кожної з N_r приймальних антен.

Тобто сигнал у кожній приймальній антені — це суміш N_t випромінюваних сигналів, помножених на комплексні передавальні функції від відповідних передаючих антен до аналізованої приймальної антени. Інакше висловлюючись, вектор прийнятих сигналів $\vec{z}(t)$ представляє добуток матриці каналу **H** на вектор випромінюваних сигналів $\vec{u}(t)$.

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

де $\vec{\xi}(t)$ - N_r - мірний вектор шуму.

Далі у приймачі вирішується завдання поділу та оцінки випромінюваних N_t сигналів. Для цього потрібно вирішити систему N_r рівнянь з N_t невідомими. Організована таким чином MIMO-система зв'язку забезпечує передачу інформації N_t просторовими каналами. Причому всі канали працюють в одній і тій же смузі частот і поділяються лише за рахунок просторового рознесення випромінюючих та приймальних антен.

Можливість одночасної передачі інформації з кількох просторових каналах пояснює високу спектральну ефективність багатоантенних систем і пильна увага до них з боку розробників високошвидкісних систем радіозв'язку.

Для оцінки символів, що приймаються, на приймальній стороні використовується алгоритм BLAST. У BLAST-алгоритмі детектування N_t переданих сигналів (оцінка вектора $\vec{u}(t)$) виконується за N_t ітерацій. Порядок, у якому вилучаються сигнали (компоненти вектора $\vec{u}(t)$), суттєво впливає на характеристики системи. На кожній ітерації виконуються три кроки. Підрахунок оцінки вектора ($\vec{u}(t)$) з використанням MMSE-фільтра; Оцінка символу x_{p1} вектора $\vec{u}(t)$, для якого значення h^2 є найбільшим. Модифікація вектора $\vec{z}(t)$ та матриці каналу **H**.

1.5 Масивні системи MIMO

Massive MIMO покращує продуктивність систем 5G з точки зору швидкості передачі даних та спектральної ефективності, при цьому обслуговуючи велику кількість користувачів. Крім того, він дозволяє виконувати тривимірне формування променя, щоб забезпечити більше степенів свободи та збільшити кількість користувачів із високою пропускною здатністю. Очікується, що Massive MIMO забезпечить більше переваг порівняно з іншими рішеннями щодо ефективності використання енергії та спектру. Це буде досягнуто за рахунок фокусування випромінювання у напрямку передбачуваних користувачів, що забезпечить одночасну передачу багатьом користувачам за умови збереження низького рівня завад. Це може збільшити пропускну здатність порівняно зі звичайним антеним рішенням, внаслідок чого спектральна ефективність до 50 разів вища, ніж реальна технологія 4G. Однак, щоб повною мірою скористатися перевагами цієї технології та вирішити проблеми реалізації в реальних умовах, потрібна складна радіосистема.

Щоб домогтися формування променя, кількість антен, доступних на базовій станції, має бути принаймні в десять разів більше, ніж кількість UE з однією антеною, що розташовані всередині комірки. Нова структура цього великомасштабного MIMO (massive MIMO) близька до випадку спільного розміщення і дозволяє передавачам фокусувати енергію у дуже вузькій області за допомогою формування променя. При збільшенні кількості антен потужність краще фокусується у вужчому промені, і, отже, на стороні приймача для будь-якого користувача рівень сигналу вище для цього користувача, тоді як інші користувачі отримують нижчі сигнали.

Час, необхідний для оцінки каналу (також відомого як навчання каналу) масивної системи MIMO, залежить від кількості використовуваних антен базової станції. Кількість пілот-сигналів, які приймаються цими антенами, залежить від

кількості UE, і базові станції навчаються паралельно, оскільки вони вимірюють сигнали від різних UE. Крім того, кількість терміналів користувача масштабується в залежності від часу когерентності. У міру збільшення часу когерентності в соті може обслуговуватись більше користувачів.

У разі навчання каналу системи дуплексу з часовим поділом (TDD) параметр інформації про стан каналу (CSI) використовується у зв'язку між UE та мережею, щоб описати якість каналу та рекомендувати правильну матрицю попереднього кодування. CSI каналу низхідної лінії зв'язку оцінюється за допомогою виконання вимірювань каналу висхідної лінії зв'язку з використанням переданих пілот-сигналів від користувачів. Таким чином, система використовує взаємність каналів у разі TDD. У дуплексній системі з частотним поділом каналів (FDD) канали висхідної та низхідної лінії зв'язку налаштовуються незалежно. Час, необхідний для навчання низхідного каналу, пропорційно кількості антен. Отже, використання великих антенних решіток навряд чи добре працюватиме з FDD. Отже, необхідно забезпечити оцінки CSI у системі FDD.

У системі мультиплексування з ортогональним частотним поділом (OFDM) опорні сигнали (RS) використовуються для оцінки каналу. У циклі зворотного зв'язку, UE обчислює показник рангу (RI), який виражає кількість потоків інформації, які мобільний пристрій може обробляти одночасно і на одних і тих же частотних ресурсах. Якщо SNR низький, мобільний пристрій поверне низьке значення RI. У цьому випадку один і той же потік посилатиметься всіма антенами базової станції і це може збільшити охоплення.

Індикатор якості каналу (CQI) є параметром, який використовується для опису SNR, і він повідомляється UE базової станції. Потім CQI транслюється у відповідний індекс схеми модуляції та кодування (MCS) на базовій станції. Індекс MCS вказує порядок модуляції та кодову швидкість, які слід використовувати для підтримання якості каналу.

Крім того, індикатор матриці попереднього кодування (PMI) використовується для повідомлення базової станції найкращої матриці попереднього кодування. Він повідомляє базової станції, як попередньо кодувати

інформацію перед передачею на кожну з антен, щоб UE могло якнайкраще відновити цю інформацію. Таким чином PMI є індексом кодової книги. У цій кодовій книзі є записи, що описують процес розподілу чи чергування інформації між антенами. Таким чином, UE спрощується, уникаючи складних обчислень каналу, і, таким чином, MIMO реалізується більш надійним способом. UE знає про стан каналу завдяки переданим опорним сигналам від антен BS. Параметр PMI визначає матрицю попереднього кодування, використовувану базовою станцією для поточної передачі як SU-MIMO, так MU-MIMO.

Для більш ефективної оцінки інформації про стан каналу LTE версії 10 TM9 були введені два нових опорних сигналу (восьмирівневе просторове мультиплексування). Це опорний сигнал інформації про стан каналу (CSI-RS), який є спільним для всіх користувачів у соті, та опорний сигнал демодуляції (DMRS), який спеціально призначений для кожного UE. CSI-RS використовуються UE для розрахунку та повідомлення зворотного зв'язку CSI (CQI/PMI/RI), у той час як DMRS використовуються для демодуляції сигналу і вже використовуються для формування діаграми спрямованості.

Продуктивність систем MIMO обмежена точними вимірами CSI та зворотним зв'язком. Таким чином, ключові удосконалення технології включають підвищення точності зворотного зв'язку матриці попереднього кодування за рахунок використання аналогового зворотного зв'язку CSI і швидше зворотного зв'язку CQI. Це відображатиме реальну якість каналу при вимірюванні CQI на попередньо запланованих CSI-RS.

У той час як планування в MU-MIMO засноване на призначенні набору векторів каналів для UE і залежить від точності CSI, для масивного MIMO рекомендується розглянути двоетапне планування UE та метод зворотного зв'язку, де UE згруповані в кілька груп, та зворотна зв'язок каналу повідомляється кожної групи. Проведено порівняння двоетапної схеми з іншими традиційними методами, такими як повна CSI (де базова станція збирає CSI всіх UE) та часткова CSI зі зворотним зв'язком. У підході з частковим зворотним зв'язком CSI величина зворотного зв'язку відносно мала, але продуктивність передачі по

низхідній лінії зв'язку зазвичай нижче, ніж у підходу з повною CSI. З іншого боку, двоетапна схема призводить до меншої кількості зворотний зв'язок у порівнянні з методом часткової CSI, але забезпечує спектральну ефективність, дуже близьку до ефективності підходу з повним зворотним зв'язком CSI.

1.6 Збільшення пропускної спроможності каналу MIMO

Збільшення ступенів свободи, тобто гнучкість антеної решітки базової станції для спрямування променів, коли кількість антен на базовій станції набагато більша, ніж вектори попереднього кодування, важливо, і це буде розглянуто для антеної решітки моделі масивного MIMO. Використання антеної решітки з діаграмою спрямованості/поляризацією у майбутній масивній системі MIMO допоможе покращити спектральну ефективність системи. Ідея полягає в тому, щоб отримати вигоду з двох схем. Перший - це множинний доступ з поділом променів (BDMA), який створює кількість секторів B за допомогою тривимірного формування променя замість одного сектора, а другий - схема шаблону/поляризації. Комбінована схема називається багатостанційним доступом з поділом шаблону/поляризації (P 2БДМА). Розглянемо чотири різні типи (K = 4) елементів діаграми спрямованості/поляризації антени. Антенна решітка діаграми спрямованості/поляризації розбивається на K віртуальних антенних решіток, і кожна з них формує промінь, розподілений по B секторах. Якщо N є кількістю антен UE, то в кожному секторі може бути реалізовано N на K каналів, і (N, K) символів можуть бути передані щонайменше в одному і тому ж часовому/частотному ресурсі.

Збільшення можливих шаблонів поляризації у майбутніх масових MIMO призведе до ще більшої кількості степенів свободи. Це призводить до більш високої ефективності використання спектра, що, у свою чергу, покращує пропускну здатність каналу за рахунок використання характеристик низької кореляції антен каналів з різною діаграмою спрямованості/поляризацією.

Розглянемо чотири різні системи: перша є одиночним 120-градусним сектором традиційної трисекторної системи (N = 4). Друга є 8-секторною системою, що складається з однієї антеної решітки тільки з вертикальною поляризацією (BDMA: K = 1, N = 1). Третій є 8-секторною системою, що складається з двох віртуальних антенних решіток, одна з вертикальною поляризацією, а інша з горизонтальною поляризацією (BDMA: K = 2, N = 2). Нарешті, четверта система є 8-секторною системою, що складається з чотирьох віртуальних антенних решіток з відмінними один від одного діаграмами спрямованості/поляризаціями.

Як згадувалося раніше, у масивному MIMO використовується велика кількість антенних елементів для формування діаграми спрямованості. Через збільшення кількості антенних елементів існує проблема зворотного зв'язку, яка може призвести до серйозних навантажень системи. Запропоноване вирішення цієї проблеми - схема угруповання антен (AGS). Відповідно до цієї схеми CSI агрегується з груп антенних елементів та повертається UE.

Розглянемо AGS, де UE повідомляє лише 4 значення шляхом агрегування CSI з чотирьох груп, що містять в цілому 16 антенних елементів. На підвищення функціональності цієї схеми важливо визначити привласнені групи. Наприклад, антени з однаковою діаграмою спрямованості/поляризації групуються і відповідна діаграма спрямованості/поляризації вибирається на основі інформації про канал. Таким чином, різні схеми патернів/поляризації можуть використовуватися з тим самим тимчасовим/частотним ресурсом.

Щоб задовольнити майбутні потреби масового MIMO, перспективною технологією є 3D MIMO, і вона спрямована на вирішення проблеми розміщення великої кількості антенних елементів (наприклад, 32 з кроком 0,5λ) в обмеженому доступному просторі. У системі 3D MIMO діаграмою спрямованості можна управляти по азимуту та кутам місця шляхом належної зміни вагових коефіцієнтів збудження елементів антеної решітки.

Коли підвищення використовується разом з азимутом, досягається краща продуктивність середньої комірки та межі комірки порівняно із звичайними системами MIMO, що використовуються в мережах 4G-LTE. TDD 3D-MIMO

використовує взаємність каналів, і при польових випробуваннях виграш вищий у порівнянні з традиційним 2D-MIMO. Однак вищезазначені переваги вимагають точної роботи у трьох вимірах та викликають нові проблеми.

Для підтримки формування променя за висотою за допомогою FD-MIMO і більш точного управління напрямком формування променя в передавачі використовуються блоки приймача (TXRU) для управління амплітудою та фазою вагових коефіцієнтів збудження. Однак велика кількість TXRU викликає великі накладні витрати CSI-RS та надмірне споживання ресурсів CSI-RS. Для 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. Було досліджено продуктивність і здійсненність формування променя по куту місця для 3D MIMO, і було повідомлено, що різні схеми вигідні для 3D MIMO і демонструють різний приріст пропускної спроможності, тоді як кращий вибір залежить від кількості TXRU. До таких схем відносяться схема без попереднього кодування, в якій різні порти CSI-RS використовують один і той же широкий промінь, схема з формуванням променя, в якій порти CSI-RS використовують вузькі промені, що не охоплюють всю соту, і гібридна схема, тобто CSI з попереднім кодуванням та формуванням променя.

Щоб досягти очікуваного виграшу від 3D-MIMO, майбутні системи повинні уникати невідповідностей та відповідати застарілим системам. Тому, що стосується 3D-MIMO, специфікація системи все ще перебуває на стадії вдосконалення, і все ще існує великий запас для поліпшення.

3D MIMO підвищує ефективність використання стільникового спектру, тому eNB може планувати більше користувачів. У міру збільшення кількості підключених користувачів зростає потреба в опорних сигналах з боку користувачів та eNB для оцінки каналу. Отже, вимоги до пропускної спроможності опорного сигналу стануть вищими, інакше кількість реальних користувачів, що підтримуються, буде обмежена.

Висновки до першого розділу

Розглянуті передумови та переваги майбутніх потужних систем MIMO. Дослідження показує хорошу продуктивність завдяки використовуваним методам каналу низхідної лінії зв'язку, таким як групування користувачів та схеми зворотного зв'язку на основі груп. Крім того, прийняття моделі антеної решітки з діаграмою спрямованості/поляризації для масового MIMO показує збільшення степенів свободи каналів MIMO і, отже, поліпшену пропускну здатність каналу.

Розширення існуючої технології до 3D MIMO покращить існуючу реалізацію та дозволить використовувати гнучкі діаграми спрямованості по азимуту та куту місця. Формування діаграми спрямованості висхідної лінії зв'язку та взаємне використання каналів на стороні обладнання користувача можуть бути реалізовані зі зростанням кількості антен.

2 СТРУКТУРА КАНАЛУ МІМО

2.1 Частотний спектр стандарту 5G

Стандарт 5G ставить цілі, які важко досягти. Для надання таких можливостей, як перегляд потокового відео у форматі UHD з роздільною здатністю 4K або 8K та реалізації основних цільових сценаріїв використання мереж з покращеним мобільним широкосмуговим доступом (eMBB) потрібні швидкості передачі даних до 20 Гбіт/с у низхідному каналі (DL) та 10 Гбіт/с у висхідному каналі (UL). Збільшити швидкість передачі даних можна різними способами, але основою забезпечення високих швидкостей при використанні мобільного широкосмугового доступу є спектр сигналу. Стандарт 5G New Radio (NR) визначає нові частотні діапазони нижче 6 ГГц і передбачає подальший перехід на частоти міліметрового діапазону довжин хвиль, де доступні ширші смуги частот для організації каналів зв'язку з великою пропускною здатністю.

Ширші смуги пропускання обіцяють споживачам підвищення якості передачі даних, а інженерам – нові проблеми, з якими їм доведеться зіткнутися під час виконання всіх вимог до якості сигналів у міліметровому діапазоні. Негативні фактори, боротьба з якими не становила великої проблеми на частотах нижче 6 ГГц, тепер викликають значні труднощі та вимагають прийняття додаткових заходів, а також застосування нових методів вимірювань, здатних забезпечити потрібні показники точності в оцінці характеристик компонентів та пристроїв стандарту 5G.

Для надання більших можливостей для споживачів та покриття по всьому світу потрібне узгоджене використання частотного спектру у всіх регіонах.

Стандарт 5G NR регламентує використання частот до 52,6 ГГц із загальною займаної смугою радіочастот сигналів (піддіапазонів) близько 10 ГГц:

- діапазон 1: від 400 МГц до 6 ГГц додає смугу частот 1,5 ГГц з наступними піддіапазонами: 3,3-4,2 ГГц, 3,3-3,8 ГГц, 4,4-5 ГГц;

- діапазон 2: від 24,25 до 52,6 ГГц додає смугу частот 8,25 ГГц з наступними піддіапазонами: 26,5-29,5 ГГц, 24,25-27,5 ГГц, 37-40 ГГц.

У деяких країнах проводились дослідження та випробування на піддіапазонах нижче 6 ГГц, а на частотах сантиметрового та міліметрового діапазонів довжин хвиль вже були розгорнуті ділянки мереж та:

- у діапазоні до 1 ГГц є кілька піддіапазонів, які планується задіяти для потреб пристроїв Інтернету речей (IoT). Це частоти близько 600, 700 та 800 МГц;

- діапазон 1-6 ГГц буде використовуватися для збільшення зон покриття та пропускної спроможності мереж. Діапазон 3,3–3,8 ГГц – може бути задіяний для впровадження множини різних сервісів зв'язку стандарту 5G. Також розглядається використання діапазону 4,4–4,9 ГГц;

- діапазон вище 6 ГГц в основному буде задіяний для випадків, коли потрібні дуже широкосмугові сигнали. Початкові цільові частоти міліметрового діапазону 28 та 39 ГГц. Незважаючи на те, що специфікації стандарту 5G NR версії 15 припускають використовувати частоти до 52,6 ГГц, вже розпочато дослідження для впровадження майбутніх версій стандартів, у яких планується задіяти частотні піддіапазони 64-71 ГГц та 71-76 ГГц.

За аналогією зі стандартом LTE для формування широкосмугових сигналів можуть використовуватися багатокомпонентні несучі, причому для діапазону 2 смуга частот може становити до 800 МГц. Об'єми використання частотного спектру визначатимуться різними країнами індивідуально. Поки розроблена тільки стартова версія стандарту 5G NR, і очікується, що з пізнішими версіями будуть продовжені намічені тенденції використання частотного спектру, розширення смуг пропускання та вдосконалення використовуваних сигналів з урахуванням нових завдань та цільових сценаріїв використання.

У діапазоні до 6 ГГц виникають кілька нових проблем, пов'язаних із розробкою пристроїв у нових піддіапазонах 3,4-3,7 ГГц та 4,4-4,9 ГГц та обумовлених численними нестандартними вимірювальними завданнями, які потрібно вирішувати під час випробувань пристроїв, труднощів із сумісністю та контролем якості конструкцій антенних решіток, виконаних за технологією MIMO, методом вимірювань з радіоефіру (over-the air - OTA). Але, як би там не було, особливості діапазону до 6 ГГц по суті є наслідком розширення вже існуючих можливостей стандарту LTE-A, а справжні проблеми почнуться із переходом у міліметровий діапазон.

Стандарти Wi-Fi IEEE 802.11ad/ay вже забезпечує фіксований бездротовий доступ на частотах близько 60 ГГц в режимах від точки до точки або від точки до багатьох точок». На початковому етапі при реалізації фіксованого бездротового доступу за стандартами 5G передбачається використання аналогічних конфігурацій MIMO і форм сигналів, а для прив'язки та управління будуть використовуватись існуючі мережі 4G eNB, тобто. передбачається робота у неавтономному режимі (NSA). Основні відмінності з'являються, коли технології мобільного зв'язку перейдуть у міліметровий діапазон. Доведеться вирішувати проблеми з надання та підтримання каналу зв'язку при переміщенні абонентського пристрою, наприклад, в межах площі автостоянки, шосе або в швидкісному потязі.

2.2 Якість сигналів у міліметровому діапазоні

На якість сигналу може впливати багато факторів, включаючи обробку в основній смузі, модуляцію, фільтрацію та перенесення спектру сигналу на більш високі частоти. З поширенням більш широкосмугових каналів, які будуть використовуватися, як очікується, під час переходу у міліметровий діапазон, проектування пристроїв на модулюючих частотах та на ВЧ може ускладнитися

проблемами, пов'язаними з порушеннями форми сигналу, які при перенесенні спектра на більш високі частоти або при розширенні смуги, стають більш відчутними. Притаманні системам зв'язку з OFDM-модуляцією (мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів) властивості ортогональності перешкоджають взаємному впливу несучих, що перекриваються. Однак, порушення форми сигналу, пов'язані з IQ-спотвореннями, фазовим шумом, лінійною (АМ-АМ) та нелінійною (АМ-ФМ) компресією, а також частотні зсуви можуть стати причиною спотворень модульованого сигналу. Чинником, який найбільш часто викликає проблеми у системах зв'язку з OFDM-модуляцією міліметрового діапазону є фазовий шум. Дуже високий рівень фазових шумів у пристрої може призвести до того, що піднесучі будуть відчувати взаємний вплив, що погіршує якість демодульованого сигналу.

Подібні проблеми досить важко вирішити, а їх вплив може погіршити загальні параметри пристрою. Пристрої повинні проектуватися таким чином, щоб долати фізичні проблеми, пов'язані з особливостями широкосмугових сигналів міліметрового діапазону, а засоби вимірювань, які застосовуються для контролю характеристик цих пристроїв, повинні мати ще більш високі характеристики, що дозволяють забезпечити належну точність при проведенні вимірювань параметрів сигналів та оцінки їх якості, не створюючи у своїй нових проблем. Узагальнена структурна схема приймача приведена на рисунку 2.1.

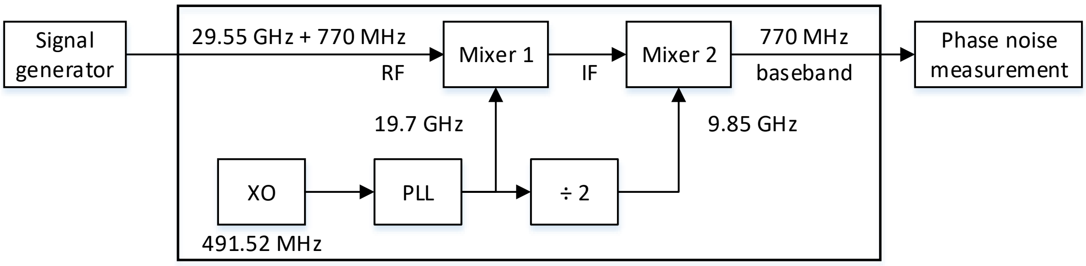


Рисунок 2.1 – Узагальнена структурна схема приймача

Аналіз параметрів модуляції – один із найкорисніших показників якостісигналів. Помилки, спричинені спотвореннями сигналу, можна виявити при

дослідженні сигнального сузір'я на комплексній площині Іншим ключовим показником якості модуляції сигналу є величиною модуля вектора помилки (EVM), за результатами вимірів якої можна оцінити спотворення форми сигналу.

5G NR регламентує використання сигналів із CP-OFDM модуляцією (мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів та циклічним префіксом), яка є схемою модуляції з багатьма несучими.

Фазовий шум, а також будь-які відхилення фази або амплітуди, що виникли у вузлах пристрою та виявляються у вигляді спотворень спектру широкосмугового сигналу, позначаться на результатах вимірювань модуля вектора помилки. Модуль вектор помилки являє собою нормалізовану різницю двох векторів на комплексній площині (рисунок 2.2): вектора вимірюваного IQ-сигналу та опорного вектора IQ- сигналу (розрахункова величина). Він характеризує степінь відхилення реального сигналу від ідеального (зразкового). Як правило, модуль вектора помилки виявляється у дБ чи відсотках.

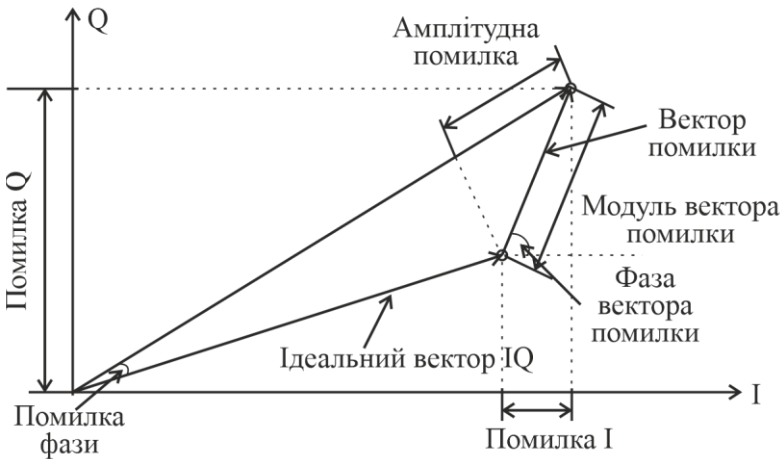


Рисунок 2.2 – Особливості обчислення модуля вектора помилки.

У міру того, як щільність модуляції зростатиме, а очікується, що у стандарті 5G будуть застосовуватись схеми модуляції з високою щільністю (від 256 QAM спочатку до 1024 QAM у майбутньому), до компонентів та пристроїв будуть пред'являтися все більш жорсткі вимоги щодо модуля вектора помилки.

Наприклад, таблиця 3 показує, як зростають вимоги у частині модуля вектора помилки (EVM) для абонентських пристроїв (UE) стандарту 3GPP із зростанням 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%

Крім того, для підтвердження відповідності параметрів спектра сигналів потрібно провести їхній вимір. При вимірюваннях параметрів спектра сигналів абонентських пристроїв стандарту 5G контролюються такі показники: 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.

Для компонентів та пристроїв стандарту 5G потрібно, щоб вимірювальне обладнання мало характеристики, достатні для отримання достовірної оцінки сигнального сузір'я та модуля вектора помилки. Крім того, у міру розвитку стандартів 5G, важливе значення матиме гнучкість вимірювального обладнання для перенесення вимірювань параметрів спектра на більш високі частоти.

Розглянемо приклад генерування форми хвилі NR (TM або FRC) та додавання спотворення. Тут ми розглядаємо фазовий шум та нелінійність без пам'яті. Потім ми обчислюємо EVM результуючого сигналу. Ми будуємо середньоквадратичне значення та пікові значення EVM для кожного символу OFDM, слоту та піднесучої. Ми також обчислюємо загальну EVM (середньоквадратичне значення EVM, усереднене по всій формі хвилі). На рисунку 2.3 показано схема обробки сигналу в каналі зв’язку.

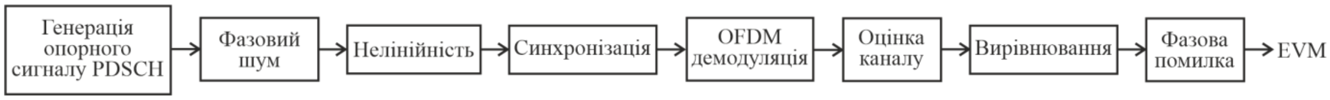


Рисунок 2.3 – Схема обробки сигналу в каналі зв’язку

Залежність потужності фазового шуму від зміщення частоти на вході приймача приведено на рисунку 2.4.

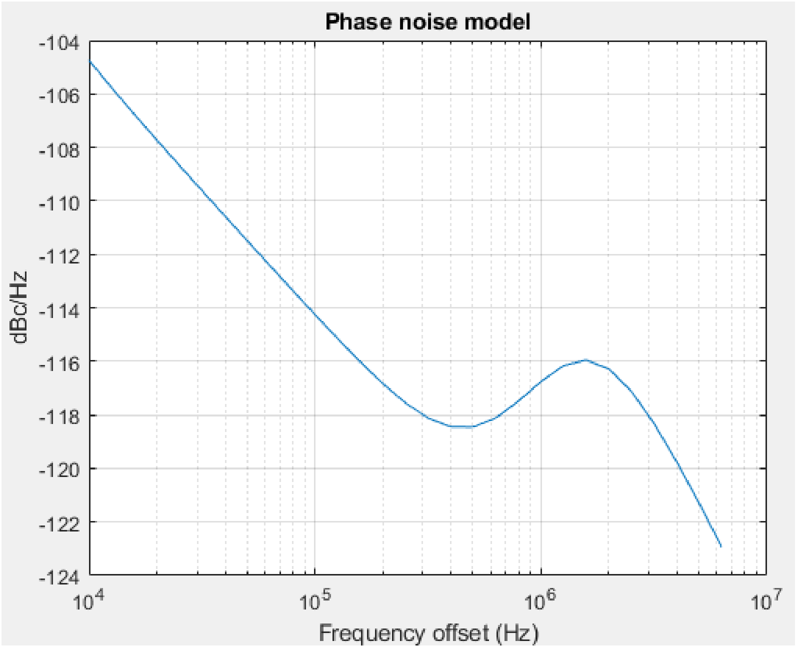


Рисунок 2.4 – Залежність потужності фазового шуму від зміщення частоти

Введемо нелінійні спотворення. Нелінійна обробка сигналів використовується для підвищення продуктивності систем 5G. Передача з кількома входами та кількома виходами та неортогональний множинний доступ (NOMA), допомогать покращити продуктивність бездротових систем. Через особливості фізичного рівня систем 5G нелінійні спотворення підсилювального тракту є одним з основних негативних впливів на сигнал. Існуючі математичні моделі нелінійностей підсилювачів при моделюванні сигналів п'ятого покоління вимагають адаптації. На рисунку 2.5 показано вплив нелінійності каналі зв’язку.

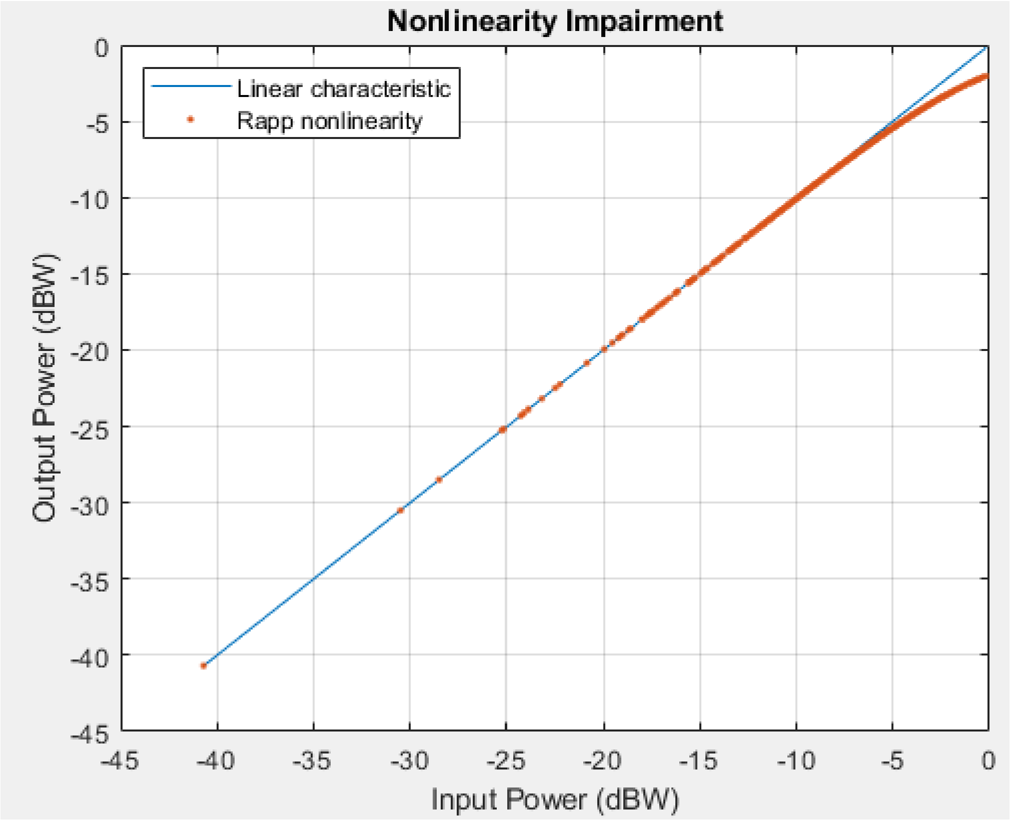


Рисунок 2.5 – Вплив нелінійності у каналі зв’язку

Далі необхідно виконати декодування та аналіз сигналу, що включає таки кроки:

- синхронізація з використанням сигналу демодуляції DM-RS по одному кадру для FDD (два кадри для TDD)
- демодуляція OFDM прийнятого сигналу
- оцінка каналу
- вирівнювання
- оцінка та компенсація загальної фазової помилки (CPE)
- розрахунок PDSCH EVM з включенням перемикача evm3GPP для обробки відповідно до вимог вимірювання EVM.

Приклад вимірює та виводить різну статистику, пов'язану з EVM, на символ, на слот та на пік EVM на кадр та RMS EVM. Далі відображається EVM для кожного слота та фрейму, як показано на рисунку 2.6. Також відображається загальне значення EVM, усереднене по всій формі вхідного сигналу. Створюємо

ряд графіків: EVM у порівнянні з кожним символом OFDM, слотом, піднесучій та загальним EVM. На кожному графіку відображається пікове значення порівняно із середньоквадратичним значенням EVM.

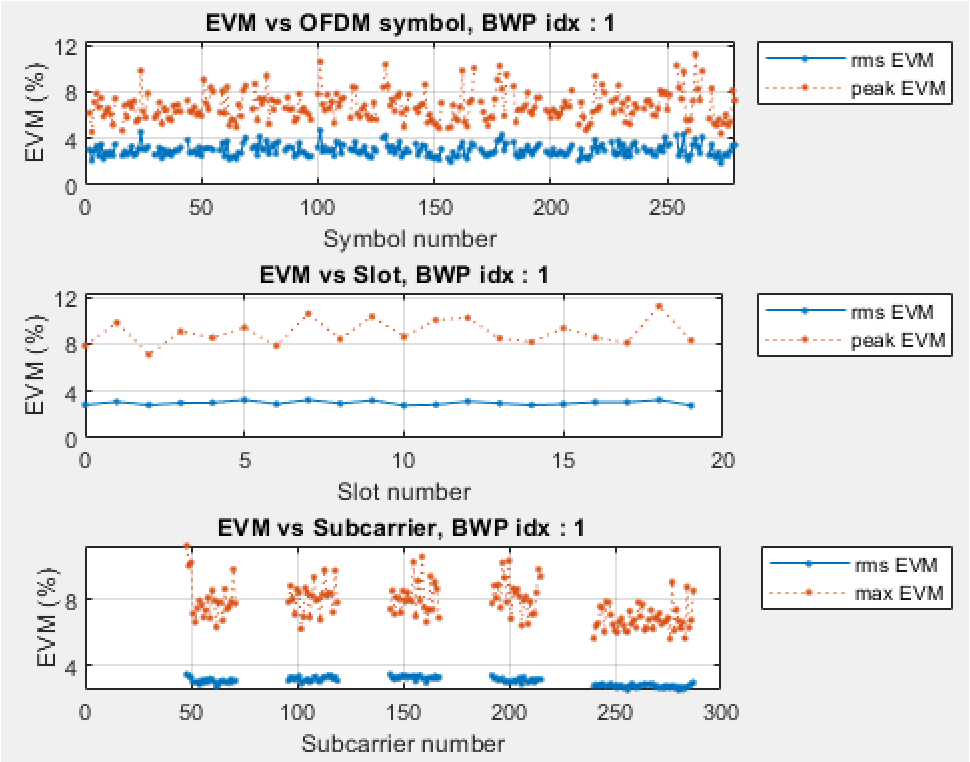


Рисунок 2.6 – Графіки значень EVM на символ, слот і піднесуву

Функція приймача полягає у вилученні векторної інформації з сигналу, яка може бути виражена у вигляді амплітуди та фази. Реальні сигнали мають шуми та інші недоліки, які ставлять під загрозу здатність приймача демодулювати сигнал та відновлювати передані біти. Використовують поняття величини вектора помилки (EVM) для опису помилки у квадратурно-модульованому сигналі. EVM іноді називають відносною помилкою сузір'я (RCE).

Вектор помилки представляє векторну різницю між виміряним сигналом і його ідеальною версією. EVM – це середньоквадратичне (RMS) значення вектора помилки за деякий інтервал часу (оцінюється в дійсні моменти часу символів). EVM зазвичай вказується у відсотках від ідеального сигналу, але може бути

показаний у децибелах. Для вимірювання EVM потрібен точний приймач, який може порівнювати вимірюваний сигнал із його ідеальною версією.

Констеляційна діаграма сигналу 16-QAM приведена на рисуну 2.7.

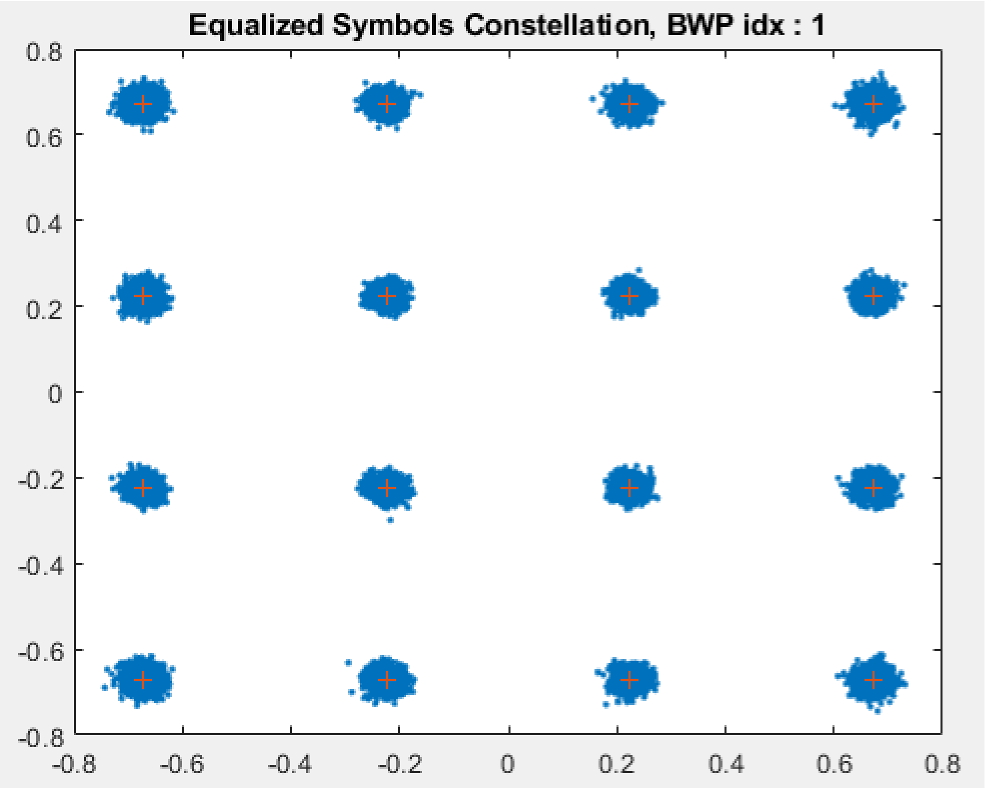


Рисунок 2.7 – Констеляційна діаграма сигналу 16-QAM

На рисунку 2.7 показана діаграма сузір'я сигналу 16-QAM. Кожен із цих 16 векторних станів представляє 4 біти інформації. В ідеалі ці стани мають бути крихітними точками на діаграмі без шуму чи спотворень. Звичайно, канали зв'язку завжди недосконалі. Широкосмуговий шум, фазовий шум, нелінійність, помилки частотної характеристики і сигнали, що заважають, можуть сприяти погіршенню EVM. Вектори, що потрапляють всередину межі похибки, вважаються «хорошими», а ті, що поза межами — «поганими». Показаний сигнал є дуже чистим, всі точки знаходяться в межах помилок, а EVM становить 0,37%.

Сітка ресурсів для визначення EVM приведена на рисунку 2.8.

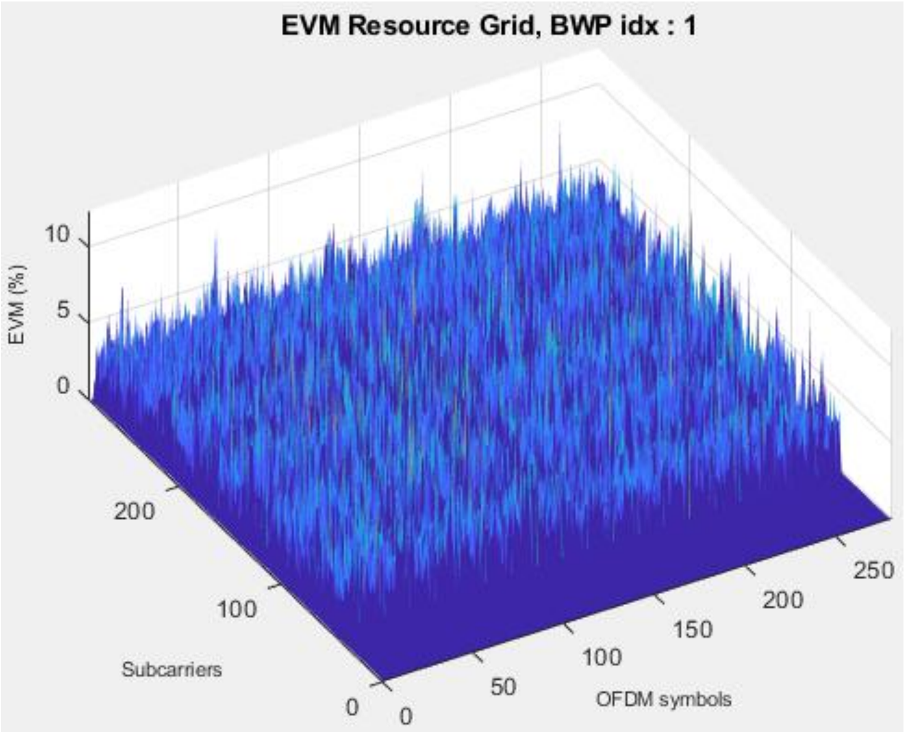


Рисунок 2.8 – Сітка ресурсів сигналу 5G

Для забезпечення високої якості вимірювань параметрів широкосмугових пристроїв на частотах міліметрового діапазону потрібно вимірювальне обладнання, модуль вектора помилки якого краще, ніж у досліджуваного пристрою (ДП) або системи. Типові вимоги:

- для вимірювання параметрів компонентів: на 10 дБ краще, ніж у системи;
- для вимірювання параметрів системи: на 3 дБ краще, ніж у зразкового джерела радіосигналів.

Типова схема вимірювань параметрів передавача, приймача або інших компонентів у пристрої бездротової передачі даних (залежно від типу) зазвичай включає джерело сигналів для формування вхідного впливу та ДП, ДП та аналізатор, або всі разом. Вимірювання в основній смузі частот та в діапазоні до 6 ГГц, як правило, виконуються з використанням кабелів. Вимірювання на частотах сантиметрового та міліметрового діапазонів, швидше за все, доведеться виконувати методом ОТА через високий рівень інтеграції, очікуваного в антенах

та радіочастотних інтегральних схемах, внаслідок якого з'єднувачі в контрольних точках для підключення кабелів можуть просто бути відсутнім.

На рисунку 2.9 показано блок-схему випробувального стенду для формування та аналізу сигналів стандарту 5G. Воно має характеристики, необхідні для оцінки характеристик компонентів та пристроїв стандарту 5G щодо спотворень сигналів, які можуть створити проблеми на частотах міліметрового діапазону. Для формування сигналу із цифровою модуляцією стандарту 5G NR та подачі на вхід ДП використовується векторний генератор сигналів. Для захоплення радіочастотного сигналу на виході ДП, оцифровки та дослідження його параметрів, у тому числі параметрів модуляції, використовується векторний аналізатор сигналів. Дане рішення має гнучкість конфігурації для роботи з вимірювальними завданнями при різних комбінаціях частот і піддіапазонів, а також з різним ступенем достовірності, зумовленим характеристиками вимірюваних компонентів та пристроїв стандарту 5G.

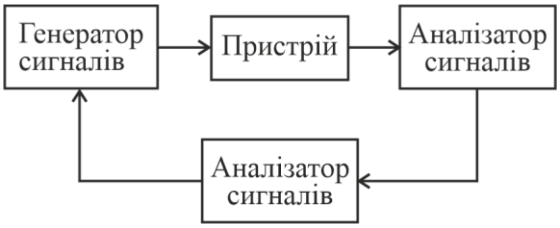


Рисунок 2.9 - Схема стенду для формування та аналізу сигналів 5G

Інші джерела похибок вимірювальної системи можуть ховатися у самій схемі вимірів. При побудові схеми вимірювань за умов дуже високих частот та широких смуг пропускання таке допоміжне обладнання, як тестове оснащення, кабельні зборки, переходи, спрямовані відгалужувачі, фільтри, підсилювачі, розгалужувачі та комутатори між ДП та вимірювальними приладами, можуть мати набагато негативніший вплив, ніж при вимірах на частотах до 6 ГГц. Для забезпечення максимальної точності вимірювань вимірювальна система має бути відкалібрована у вимірювальній площині, відповідного місця підключення ДП.

Завдання полягає в тому, щоб отримати характеристики ДП без урахування негативного впливу тестового оснащення та допоміжного обладнання. Вимірювальна система має забезпечувати ще більш високі характеристики, ніж ті, яких ми прагнемо досягти під час проектування пристрою. Можливість виконання вимірювань у площині ДП є запорукою високої точності та повторюваності. Правильно виконане калібрування вимірювальної системи усуває складові систематичної похибки вимірювань, пов'язані з АЧХ і ФЧХ тестової оснастки, і вкрай корисна при роботі з широкосмуговими сигналами. До складу пропонованого вимірювального стенду для випробувань пристроїв стандарту 5G входить програмний засіб для калібрування системи Signal Optimizer.

Крім калібрування точність вимірювальної установки може бути покращена за допомогою правильного вибору та використання кабелів, з'єднувачів та переходів. Використовувані в них матеріали, їх структура та геометрія спеціально оптимізуються до роботи у певному діапазоні частот. Використання кабелів та елементів з'єднання поганої якості у дорогій вимірювальній системі може призвести до значного погіршення її характеристик. Оскільки більшість аналізаторів сигналів міліметрового діапазону здатні працювати на нижчих частотах, на яких спільно з ними може використовуватися низькочастотна вимірювальна оснастка, може мати місце ситуація, коли це ж вимірювальне оснащення буде використана на більш високих частотах, що може погіршити якість вимірів. При зменшенні довжини хвилі зменшуються і геометричні співвідношення в кабелях та з'єднувачах. Це означає, що приладдя з традиційними з'єднувачами типу SMA та прецизійними 3,5 мм вже не можуть використовуватися для вимірювань на частотах міліметрового діапазону, хоча вони й фізично сумісні із з'єднувачами типу 2,92 мм.

Вибравши 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.

2.3 Формування діаграми спрямованості антени

Розглядаючи технології 5G, найчастіше обговорюються проблеми, пов'язані з MIMO (множинне введення-виведення), управлінням променем та формуванням діаграми спрямованості антени. Успішне вирішення цих проблем дозволить підвищити швидкість передачі даних у 100 разів та пропускну здатність у 1000 разів відповідно до концепції оперативної групи з мережевих аспектів IMT-2020.

Згідно зі звітом компанії Ericsson Mobility1 (листопад 2017 р.), мобільний трафік щорічно зростає приблизно на 65%, а очікуваний середньорічний темп зростання становить 42%. Прогнозується, що до 2023 році кількість абонентів мобільного зв'язку досягне 9,1 мільярда, 1 мільярд з яких використовуватиме покращений мобільний широкосмуговий доступ 5G.

MIMO – один із найкращих способів підвищення пропускної спроможності та ефективності мережі. Багатоантенні технології для абонентських пристроїв повинні забезпечувати роботу у кількох частотних діапазонах – до 6 ГГц і в міліметровому діапазоні довжин хвиль, а також підтримувати багато сценаріїв та масові з'єднання пристроїв Інтернету речей (IoT-пристроїв) за максимальної пропускної спроможності. При реалізації MIMO у пристроях 5G розробники стикаються з новими проблемами, включаючи необхідність перевірки тривимірної діаграми спрямованості антени, підтвердження цілісності каналу міліметрового діапазону та оптимізації характеристик пристрою.

Для того щоб мати можливість вирішувати проблеми, що виникають, потрібно розуміння основних методів передачі та приймання високоякісних та завадостійких сигналів за допомогою пристрою стандарту 5G. Кожен з багатьох методів використання декількох антен має певні переваги та недоліки, що змушує приймати компромісні рішення. Просторове рознесення, що використовується для підвищення надійності різних видів радіозв'язку, забезпечується за допомогою передачі кількох копій одного сигналу через декілька антен. Цей метод підвищує можливість коректного приймання сигналу.

При просторовому мультиплексуванні різні дані подаються на кожну антену та всі антени працюють на одній частоті. В цьому випадку створюється кілька каналів із незалежними потоками, що дозволяє підвищити загальну швидкість передачі даних.

Управління променем та формування діаграми спрямованості (ДС) – додаткові методи використання кількох антен для вузьконаправленої передачі, що забезпечують збільшення підсилення при точному позиціонуванні основної пелюстки ДС відносно приймальної антени пристрою. Формування діаграми спрямованості складніше, ніж керування променем, оскільки вимагає створення зворотного зв'язку в каналі, щоб змінювати форму та напрямок променя. Застосування просторового мультиплексування у поєднанні з формуванням діаграми спрямованості підвищує завадостійкість і пропускну здатність.

Метод значного підвищення спектральної ефективності за рахунок направлення кількох променів на різні пристрої називається розрахованим на багато користувачів MIMO.

2.4 Застосування MIMO та формування діаграми спрямованості

Застосування MIMO та формування діаграми спрямованості у міліметровому діапазоні створює багато нових проблем для розробників пристроїв. Стандарти 5G NR визначають структуру фреймів на фізичному рівні, новий опорний сигнал та нові режими передачі для підтримки швидкостей покращеного мобільного широкосмугового доступу (eMBB) 5G. Розробники мають аналізувати тривимірні діаграми спрямованості та забезпечувати зв'язок з базовою станцією з необхідними характеристиками, надійністю та якістю.

Нижче наведено основні аспекти для успішного проектування пристроїв 5G:

- перевірка тривимірної діаграми спрямованості антени;
- підтвердження цілісності каналу міліметрового діапазону;
- оптимізація параметрів пристрою для реальних умов експлуатації.

Для управління променем або формування діаграми спрямованості в мобільних пристроях будуть використовуватись багатоелементні антенні решітки. Фазовані антенні решітки є недорогим та ефективним рішенням для динамічного створення та наведення променя у необхідному напрямку. Фазована антенна решітка складається з окремих антенних елементів. Змінюючи відношення фази та амплітуди сигналів, що подаються на окремі елементи, можна формувати діаграму спрямованості антеної решітки. Такі ґрати щільно інтегруються в РЧ ІС і можуть бути протестовані тільки методом радіоефіру, оскільки контрольні точки для всіх сигналів реалізувати неможливо.

Перевірка діаграми спрямованості. Характеристики променя оцінюються за допомогою вимірювання тривимірних діаграм спрямованості антени та перевірки коефіцієнта підсилення, рівня бічних пелюсток і нулів діаграми спрямованості антени для всього діапазону частот та смуг пропускання стандарту 5G. Для налаштування антени та отримання максимального сигналу бічні пелюстки та нулі діаграми спрямованості повинні знаходитися у визначених положеннях.

Перевірка прототипів дуже важлива, але створення прототипу міліметрового діапазону потребує великих витрат. Моделювання антени в САПР з моделями каналів та лініями зв'язку з базовими станціями дозволить на ранніх етапах проектування оцінити можливості зниження витрат на створення прототипу та доопрацювання пристрою. Дані моделювання дуже важливі, їх можна використовувати для діагностики на всіх етапах проектування. На рис. 3 показано моделювання на рівні каналу зв'язку з моделями каналів міліметрового діапазону, що дозволяє оцінити характеристики змодельовані антени. За такого підходу в процесі моделювання можна додавати різні спотворення, щоб оптимізувати пристрій перед тим, як створити дослідний зразок.

Після ухвалення рішення про створення дослідного зразка розробники повинні перевірити відповідність розкриття основної пелюстки діаграми спрямованості, положення нулів, значення коефіцієнта підсилення у заданому діапазоні та меж вихідної потужності антени певним вимогам. Тестування дослідних зразків потрібно виконувати з використанням радіоефіру

2.5 Цілісність каналу міліметрового діапазону

Застосування в системах LTE антен із широкими секторами покриття дозволить охопити більше потенційних абонентів. Для вирішення проблем передачі сигналів міліметрового діапазону під час реалізації технології 5G передбачається використовувати вузьконаправлені антени, але це створює труднощі для пошуку сигналів базової станції абонентськими терміналами. Підтримка якості зв'язку теж непросте завдання, особливо при переміщенні пристрою в зоні дії мережі. У релізі 15 стандарту 5G NR задані нові процедури початкового доступу та підключення для встановлення бездротового з'єднання. Оскільки пристрій та базова станція не знають заздалегідь місця розташування один одного, базова станція виконує сканування променем у всіх напрямках для передачі інформації про канал у блоках синхронізації, як показано на малюнку 5. Абонентський термінал виявляє найбільш сильний сигнал базової станції та передає сигнал у відповідь. Тепер, коли базова станція має інформацію про направлення на абонентський термінал, зв'язок може бути встановлений.

Також визначено процедури для захоплення та супроводу за променем, наведення променя, зворотного зв'язку за променем та передачі обслуговування. Якщо використовується змішана нумерологія, то для встановлення з'єднання необхідно буде більше часу. Розробники повинні реалізувати, перевірити та оптимізувати всі ці функції, інакше користувач зіткнеться з пропусками викликів або зниженням якості з'єднання.

Тестування протоколу на ранніх етапах розробки гарантує, що пристрій зможе нормально встановлювати та підтримувати з'єднання. Емулятор мережі із вбудованою системою визначення протоколу обміну може емулювати сигнали мережі та тестувати результуючі сигнали пристрою для перевірки та оптимізації управління початковим доступом та променем.

Оптимізація параметрів пристрою для реальних умов експлуатації. Пропускна здатність та затримка – основні параметри систем бездротового зв'язку При занадто великих затримках взаємодії з користувачами погіршується. Різні рівні стеку протоколів повинні працювати узгоджено, щоб забезпечити цільову затримку та пропускну здатність системи 5G. Важливо розуміти, як працюватиме пристрій не тільки під час захоплення променя, а й під час передачі обслуговування (хендовер), повернення до з'єднання 4G, а також при виконанні інших функцій керування променем.

Одним із найефективніших методів тестування наскрізної пропускної здатності системи є використання емулятора мережі для передачі команд протоколу абонентському терміналу та вимірювання відгуку цього терміналу. Емулятор мережі створює сценарії, щоб налаштувати з'єднання з базовою станцією 5G, змінити рівні потужності опорних сигналів та синхросигналів, задати параметри формування діаграми спрямованості та ресурсні блоки для управління передачею та прийомом.

Тестування більшості компонентів та пристроїв виконується у середовищі із контрольованим радіодоступом. Однак ці пристрої повинні працювати в умовах, де існують проблеми розповсюдження сигналу, включаючи дуже великі втрати в тракті передачі, завмирання, обумовлене багатопроменевим поширенням, та розкид затримки. Ці спотворення у реальних умовах впливають на характеристики пристроїв, тому їх потрібно враховувати. Додавання емулятора каналу у вимірювальну систему дозволяє оцінити наскрізну пропускну здатність для всього стека протоколів у різних реальних умовах радіозв'язку.

Висновки до другого розділу

MIMO, управління променем та формування діаграми спрямованості – найважливіші технології, що використовуються у пристроях стандарту 5G. Реалізація багатоелементних антенних систем створює нові проблеми для розробників. Наявність оптимальних інструментів для вимірювання діаграми спрямованості антени, можливість перевірки роботи пристроїв у мережі, а також забезпечення очікуваної якості обслуговування мають найважливіше значення. Розробляються контрольно-вимірювальні рішення для оцінки структури променя та характеристик пристроїв у змодельованій мережі, тому розробники можуть без проблем виконувати всі операції – від налагодження протоколу до вимірювань ВЧ-тракту – для підвищення ефективності проектування навіть на самих ранніх етапах розгортання мереж 5G. Стандарт регламентує використання міліметрового діапазону на частотах до 52,6 ГГц зі смугами каналів до 800 МГц. На частотах міліметрового діапазону сигнали стають більш чутливими до спотворень і порушень структури, що вимагає особливої уваги при виборі вимірювального обладнання, кабелів, з'єднувачів та засобів калібрування вимірювальної системи для отримання точних та достовірних результатів вимірів.

3 РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ МІМО

3.1 Принципи організації каналів МІМО

Модель сигналу MIMO – множинний вхід – множинний вихід (рис. 3.1).

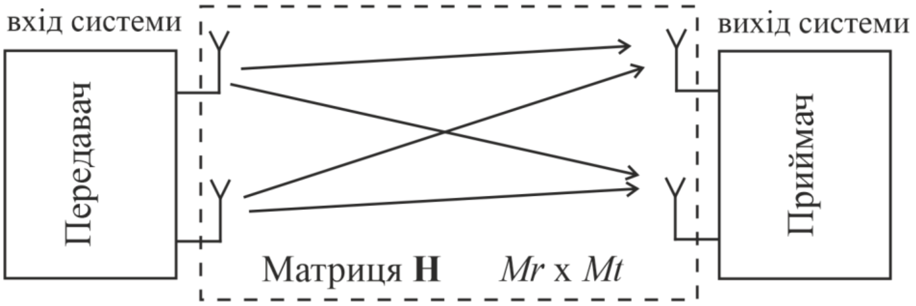


Рисунок 3.1 – Загальна структура каналу MIMO (Матриця каналу **H** – матриця підсилення; Mr - кількість антен приймача; Mt - кількість антен передавача)

Перш ніж ми почнемо говорити про пропускну здатність, розберемося спочатку з математичним описом отриманого сигналу (received signal). Прийнятий сигнал можна представити у вигляді:

$$y = \sqrt{\frac{P}{Mt}}\mathrm{H}s + n \tag{3.1}$$

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 розписати докладніше:

$$s_i = \gamma_i d_i,\ i = 1, 2, \ldots, Mt, \tag{3.2}$$

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

Підсилення шляху розповсюдження (або вага антени - antenna weight) означає розподіл вихідної потужності, що пропорційна «силі» певної траси. Іншими словами, ми хочемо виділити більше потужності для хороших каналів (шляхів розповсюдження) та менше енергії для поганих каналів.

Вагові коефіцієнти антени обмежені кількістю передаючих антен:

$$\sum_{i=1}^{r} \gamma_i = Mt \tag{3.3}$$

де r – ранг канальної матриці.

Розмірність матриці H становить $Mr \times Mt$, де Mr - кількість приймальних антен. Формула (3.1) може бути адаптована і під окремі випадки MIMO. MISO (Multiple Input Single Output – кілька передавальних антен одна приймальна):

$$y = \sqrt{\frac{P}{Mt}} \mathrm{h} s + n \tag{3.4}$$

де h - це вектор $1 \times Mt$.

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

$$y = \sqrt{P} \mathrm{h} s + n, \tag{3.5}$$

де h - це вектор $Mr \times 1$

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

$$y = \sqrt{P}\mathrm{h}s + n \tag{3.6}$$

Подальший розгляд можна поділити на два великі кейси: інформація про стан каналу (CSI - channel state information) невідома передавачу (CU - Channel Unknown) і інформація про стан каналу відома передавачу (CK - Channel Known).

Вище ми розглянули випадок, коли канал невідомий передавачу (open-loop case, передача без зворотного зв'язку). Ми не можемо вибрати будь-який ефективний напрямок, і тому передаємо рівну потужність через всі антени (тракти, шляхи поширення). Підсилення шляху поширення (path gain) дорівнює 1:

$$\gamma_i = 1, \quad i = 1, 2, \ldots, Mt \tag{3.7}$$

Необхідно виділити більше потужності для хороших каналів (шляхів розповсюдження) та менше енергії для поганих каналів.

Якщо канал відомий (closed-loop case – із зворотним зв'язком), ми можемо використати розширені сценарії передачі із деякими додатковими алгоритмами обробки сигналів. Наприклад, з лінійними підходами такими, як попереднє кодування (pre-coding) та пост-обробка (post-processing).

Якщо ми маємо CSI (Channel State Information) на передавальній стороні, тобто матриця H, яку ми можемо математично обробити. Наприклад, застосувавши алгоритм SVD (Singular Value Decomposition).

$$\mathrm{H} = \begin{bmatrix} \underset{Mr\times Mr}{\mathrm{U}} & \underset{Mr\times Mt}{\Sigma} & \underset{Mt\times Mt}{\mathrm{V}^{\mathrm{H}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underset{Mr\times r}{\mathrm{U}_s} & \underset{Mr\times(Mr-r)}{\mathrm{U}_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underset{r\times Mt}{\Sigma} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underset{r\times Mt}{V_s^H} \\ \underset{(Mt-r)\times Mt}{V_0^H} \end{bmatrix}$$

Матриця Σ - діагональна матриця, а елементи її діагоналі (сингулярні значення) - це, по суті, коефіцієнти передачі унікальних шляхів поширення. Якщо ми досягнемо перемноження сигналу на матрицю сингулярних значень Σ, а не на канальну H, то канал MIMO розпадеться на масив паралельних SISO каналів. Матриця лінійного попереднього кодування повинна бути $\mathrm{F}=\mathrm{V}_s$, а матриця лінійної пост-обробки (демодулятор) $\mathrm{D}=\mathrm{U}_s^H$ (H означає ермітове сполучення).

Відмітимо, що канал MIMO схематично це можна представити наступним чином, як показано на рисунку 3.2.

Рисунок 3.2 – Схема каналу MIMO з пре-кодуванням та пост-обробкою

Термін «пропускна спроможність» виходить з теорії інформації. Зазвичай розгляд зупинявся на класичному випадку AWGN каналу, однак формулу відносно легко можна вивести і для випадку MIMO каналу із завмираннями.

3.2 Просторово-часове блочне кодування

Системи зв'язку MIMO мають кращу пропускну спроможність. ніж інші. При збільшенні SNR необхідність знання канальної матриці зменшується. Модель каналу SIMO перевершує MISO за умови відсутності у передавача інформації про канал (потужність у MISO розділяється по всіх антенах,) і збігається з MISO у разі відомого каналу. Просторово-часове блочне кодування або STBC (Space-Time Block Coding) - це найпростіша техніка, що використовує рознесення передаючих

антен. Її застосування не передбачає знання параметрів радіоканалу під час передачі і не вимагає складних алгоритмів обробки сигналів у приймачі. Недолік техніки STBC у тому, що вона забезпечує менш високу швидкість передачі інформації, як інші методи просторового кодування.

Якщо є дві випромінюючі антени та одна приймальна, символи передаються та приймаються парами (блоком з двох символів). Під час першого символьного інтервалу, перший символ x_1 у модуляторі перетворюється 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 символьні інтервали, позначимо через $z_1(t)$ і $z_2(t)$. Вони визначаються виразами:

$$\begin{cases} z_1(t) = h_1 u_1(t) + h_2 u_2(t) \\ z_2(t) = -h_1 u_2^*(t) + h_2 u_1^*(t) \end{cases} \tag{3.8}$$

де h_1 та h_2 - комплексні коефіцієнти передачі каналу. Значення h_1 і h_2 відповідають відношенню комплексної амплітуди напруги на виході приймальної антени до комплексної амплітуди сигналу на вході першої (другої) передаючої антени. Вважаємо, що розглядається вузькосмуговий канал, і залежність федінгів від частоти можна не враховувати. З сигналів $z_1(t)$ і $z_2(t)$, прийнятих у перший і другий символьні інтервали, складемо лінійні комбінації:

$$\begin{cases} \hat{u}_1(t) = h_1^* z_1(t) + h_2 z_2^*(t) \\ \hat{u}_2(t) = h_2^* z(t) - h_1 z_2^*(t) \end{cases} \tag{3.9}$$

Підстановка виразів (1) у (2) приводить до наступних виразів:

$$\begin{cases} \hat{u}_1(t) = \left(|h_1|^2 + |h_2|^2\right) \cdot u_1(t) \\ \hat{u}_2(t) = \left(|h_1|^2 + |h_2|^2\right) \cdot u_2(t) \end{cases} \quad (3.10)$$

де $|\bullet|$ - модуль числа.

Вираз (3) показує, що комбінуючи прийняті сигнали відповідно до виразу (2), можна отримати сигнали, які відрізняються від переданих сигналів $u_1(t)$ та $u_2(t)$ лише дійсним множником. Розглянутий вище алгоритм просторово-часового кодування є ортогональним алгоритмом Аламоуті [4, 6].

Процес передачі та приймання сигналів при просторово-часовому блоковому кодуванні схематично показаний на рис. 3.2.

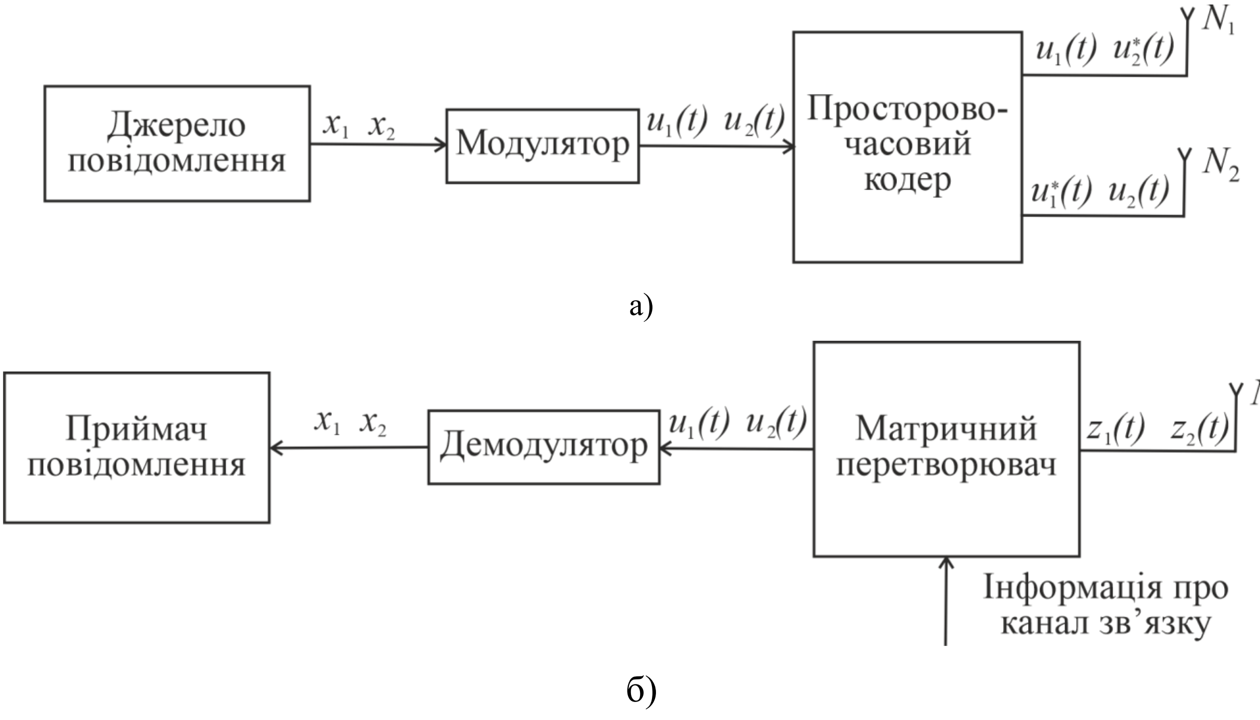


Рисунок 3.2 – Передавач (а) і приймач (б) системи з просторово-часовим блочним кодуванням

Відповідно до схеми (рис. 3.2) символи від джерела повідомлення надходять на модулятор та просторово-часовий кодер (ПВК). Різні комбінації

вхідних сигналів випромінюються передаючими антенами. На приймальній стороні прийняті сигнали подаються на вхід матричного перетворювача (МП), на який також надходить інформація про комплексні федінги каналу. На виході матричного перетворювача спостерігаються передані сигнали.

Схема STBC, наведена на рис. 3.1, зберігається і тоді, коли число передавальних антен більше двох. В цьому випадку довжина блоку збільшується і процедура комбінування символів блоку ускладнюється. Запишемо співвідношення (1) – (3) у матричній формі. Введемо вектори $\vec{u}(t)$ і $\vec{z}(t)$, переданих і прийнятих сигналів, запишемо вираз у вигляді:

$$\vec{z}(t) = \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2^*(t) \end{bmatrix} = \begin{Vmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{Vmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = \mathrm{H}\vec{u}(t) \quad (3.11)$$

де H - матриця, що складається з комплексних коефіцієнтів каналу, а також з величин, що відрізняються від них комплексним спряженням та знаком. Можна помітити, що введена матриця H має таку властивість:

$$\mathrm{H}^{\mathrm{H}}\mathrm{H} = \left(|h_1|^2 + |h_2|^2\right)I = |h|I \quad (3.12)$$

де $(\bullet)^{\mathrm{H}}$ - ермітове спряження (комплексне спряження і транспонування); I - одинична матриця; $|h|$ - сума квадратів модулів всіх федингів радіоканалу.

Отримання оцінки вектора переданих сигналів визначається виразом:

$$\hat{\vec{u}}(t) = \mathrm{H}^{\mathrm{H}}\vec{z}(t) \quad (3.13)$$

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

Степінь виграшу багатоантенної STBC-системи в порівнянні з одноантенною системою зв'язку визначається виразом

$$\hat{\vec{u}}(t) = \vec{u}(t)\sum_{n=1}^{Nt}\left|h_n\right|^2 \quad (3.14)$$

Вираз (7) показує, що потужність сигналу на виході системи просторово-часового кодування дорівнює сумі потужностей, що надходять у приймач від усіх антенн передавача. Перевага розглянутої системи просторово-часового блочного кодування в тому, що вона досягається без ускладнення приймального блоку.

Система MISO на лінії прямої видимості забезпечує найкраще співвідношення сигнал-шум, коли передавач знає про приймач і спрямовує промінь у бік приймача. Оскільки система SIMO забезпечує підсилення від масиву на вході приймача, а система MISO забезпечує підсилення масиву від масиву передачі, система MIMO з поширенням LOS може отримати вигоду від підсилення масиву передачі, так і від прийому. Припустимо, система MIMO з масивом передачі з 4 елементами та масивом прийому з 4 елементами. Як і очікувалося, крива BER показує, що як масив передачі, так і масив прийому роблять внесок у підсилення масиву 6 дБ, що дає загальне підсилення 12 дБ порівняно з випадком SISO.

Розглянемо багатопроменевий канал MISO. У порівнянні з випадком багатопроменевого каналу SIMO продуктивність багатопроменевої системи MISO не така хороша. Це пов’язано з тим, що є лише одна копія прийнятого сигналу, а потужність передачі розподіляється між кількома шляхами.

3.3 Формування променя для систем MIMO-OFDM

У минулі часи мобільні антени проектували свій сигнал фіксованою дугою з дозволеною потужністю, і шанси зловити хороший сигнал залежали від багатьої факторів, не останнім з яких була ваша відстань від антени. Новий тип антени, що розгортається для мереж 5G, використовує технологію, яку називають формуванням променя,

По-перше, важливо нагадати собі, що дві основні переваги 5G (значне збільшення пропускної спроможності та швидкості передачі даних по мережі) досягаються за рахунок поєднання модернізованих технологій, включаючи сам алгоритм 5G, частоту радіохвиль та антени як на телефоні, так і на великих пристроях, які ми бачимо на дахах будівель.

Найменші антени 5G, які ми називаємо LampSite, розміщуються в будівлях з високою щільністю розміщення, таких як аеропорти, торгові центри або спортивні стадіони, і включають чотири передавачі і чотири приймачі.

Розглянемо фізику радіохвиль. Регулюючи потужність сусідніх крихітних антен в блоці Massive MIMO, ми можемо перетворювати радіохвилі в промені і спрямовувати ці промені на мобільні телефони, що приймають, так само, як промінь прожектора нашого корабля. Це формування променя.

Далі сигнал поширюється каналом MIMO. У загальному випадку інтерес представляють два впливи поширення на потужність сигналу, що приймається: одне з них - це втрати при поширенні через відстань поширення, часто звані втратами на шляху поширення у вільному просторі; а інший - завмирання через багатопроменеве поширення. На рисунку 3.4 рображена структура каналу зв'язку

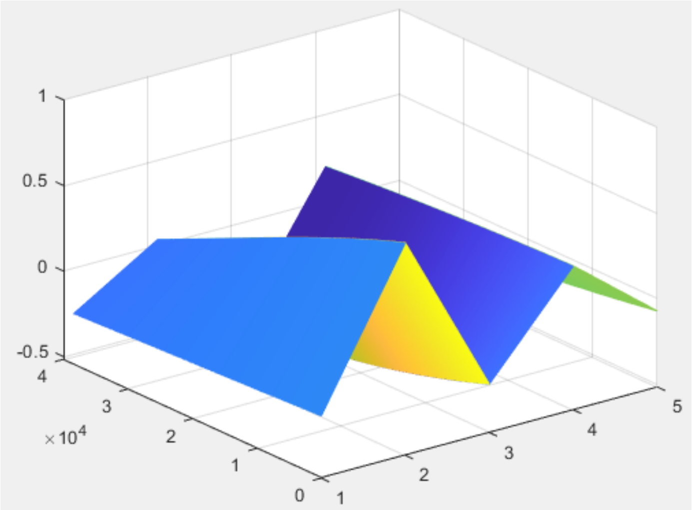


Рисунок 3.4 – Структура каналу зв'язку MIMO

Сигнал у каналі зв'язку має часову діаграму, зображену на рис. 3.5.

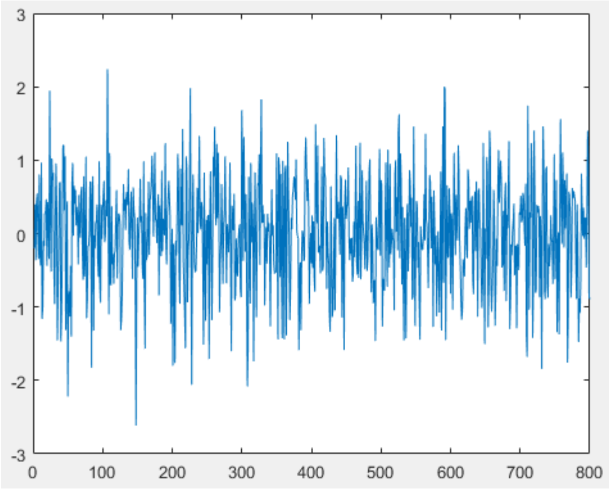


Рисунок 3.5 – Часова діаграма сигналу у каналі зв’язку

Приймальна антена збирає як сигнал, що поширюється, так і завади і передає їх приймачу для відновлення корисної інформації. Приймач MIMO-OFDM, має каскади: демодулятор OFDM, демодулятор QAM, дескремблер, еквалайзер декодер Вітербі та інші. Схема сузір'я показана на рисунку 3.6.

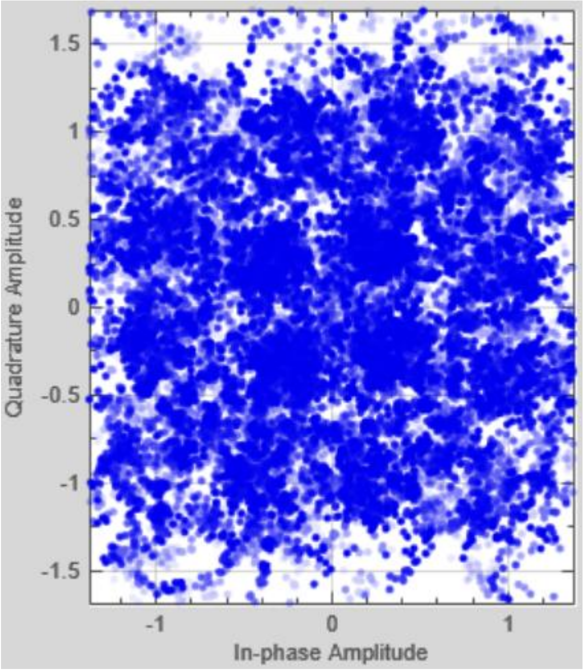


Рисунок 3.6 - Сузір'я цифрової модуляції з низьким відношенням сигнал-шум

Високий BER в основному пов'язаний з тим, що мобільний пристрій знаходиться поза напрямом управління масивом базових станцій. Якщо мобільний телефон вирівняний у напрямку кермового керування, BER значно покращується, як показано на рисунку 3.7.

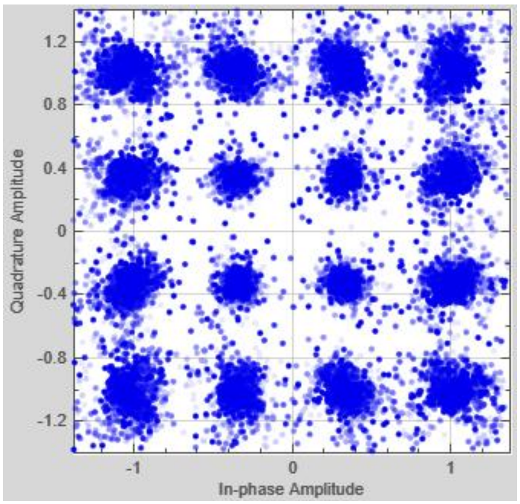


Рисунок 3.7 - Сузір'я цифрової модуляції з високим відношенням сигнал-шум

Обчислення, пов'язані з цим, дуже складні, тому ми використовуємо AI (Artificial intelligence – штучний інтелект) в задній частині антени. Технологія формування променя має певні переваги. Це дозволяє радіохвилі відбиватися від будівель, забезпечуючи надійний сигнал в областях, які не обов'язково знаходяться у прямій видимості (LoS) антен Massive MIMO.

3.4 Вплив взаємного зв'язку антен у системі MIMO

Визначимо, як взаємний зв'язок антен впливає на продуктивність передачі ортогонального просторово-часового блокового коду (OSTBC) по каналу з кількома входами та кількома виходами (MIMO). Передавач та приймач мають по дві дипольні антени. Дослідимо коефіцієнт бітових помилок. Системні параметри:

QPSK-модульований Alamouti OSTBC передається по квазістатичному каналу Релея 2x2 з плоскою частотою. Система працює на частоті 24 ГГц. Діапазон SNR, що підлягає моделюванню, становить від 0 до 10 дБ.

Двохелементні резонансні дипольні масиви використовуються як на стороні передачі (Tx), так і на стороні прийому (Rx). У Tx диполі рознесені на половину довжини хвилі. У Rx інтервал становить десяту частину довжини хвилі.

Матриці просторової кореляції передачі та прийому фіксують середовище поширення каналу. Без зв'язку передбачається, що два елементи в Tx не корельовані, а два елементи в Rx мають високу кореляцію. Комбінована/загальна кореляційна матриця для всього каналу є добутком Кронекера.

З поєднанням ми використовуємо підхід у [3] для модифікації матриць кореляції Tx і Rx шляхом їх попереднього та подальшого множення на відповідні матриці зв'язку.

Змоделюйте QPSK-модульований код Аламоуті для кожного значення SNR з антеною і без неї. Один код Аламоуті моделюється через канал MIMO кожної ітерації. Щоб змоделювати квазістатичний канал, ми отримуємо новий набір коефіцієнтів підсилення каналу кожної передачі коду (ітерації). Сильний зв'язок (відстань = 0,1λ), сильна кореляція (0,9) показана на рисунку 3.8. Сильний зв'язок (відстань = 0,1λ), слабка кореляція (0,1) показана на рисунку 3.9.

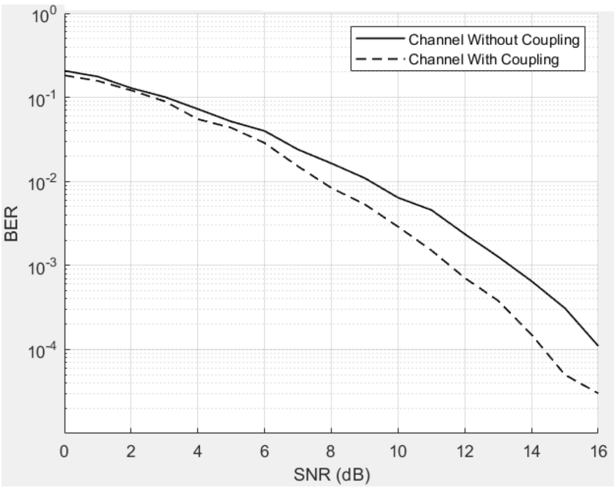


Рисунок 3.8 – Сильний зв'язок (відстань = 0,1λ), сильна кореляція (0,9)

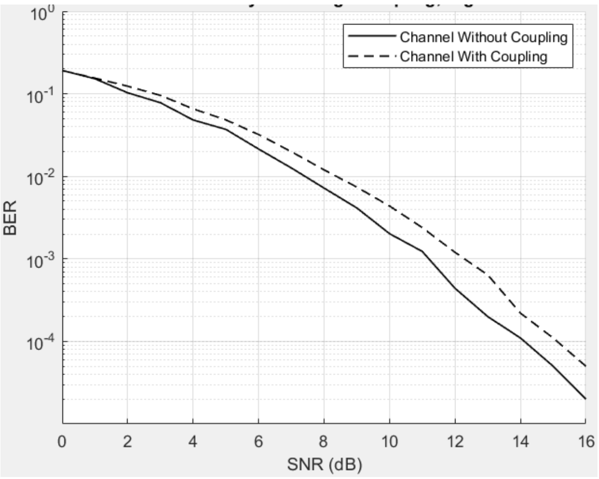


Рисунок 3.9 – Сильний зв'язок (відстань = 0,1λ), слабка кореляція (0,1)

Слабкий зв'язок (відстань = 0,5λ), сильна кореляція (0,9) показана на рисунку 3.10. Слабкий зв'язок (відстань = 0,5λ), слабка кореляція (0,1) показана на рисунку 3.11.

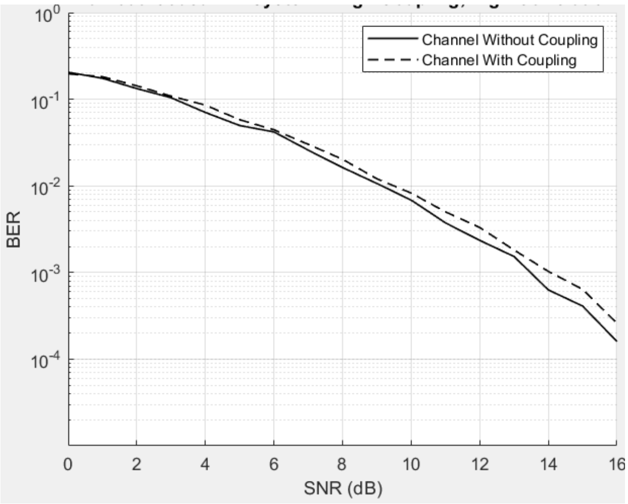


Рисунок 3.10 – Слабкий зв'язок (відстань = 0,5λ), сильна кореляція (0,9)

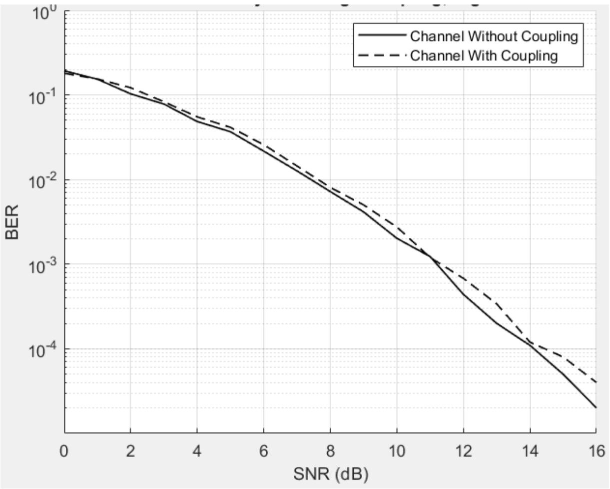


Рисунок 3.11 – Слабкий зв'язок (відстань = 0,5λ), слабка кореляція (0,1)

Чим менша відстань, тим більше взаємний зв’язок. Подібно до того, що було зроблено вище для високої кореляції (0,9) та високого зв'язку (рознос = 0,1λ) при Rx, тепер ми показуємо результати залежності BER від SNR для низької кореляції (0,1) та/або низького зв'язку (рознесення = 0,5λ).).

Антенні масиви стали частиною стандартної конфігурації систем бездротового зв'язку 5G. Оскільки в антеній решітці є кілька елементів, такі системи бездротового зв'язку часто називають системами з кількома входами та кількома виходами (MIMO). Антенні решітки можуть допомогти покращити співвідношення сигнал-шум, досліджуючи надмірність у кількох каналах передачі та прийому. Вони також дозволяють повторно використати просторову інформацію в системі для покращення покриття.

Припустимо, що система розгорнута на частоті 60 ГГц. Передавач розміщено на початку координат, а приймач розміщено на відстані 1,6 км.

Протягом усього цього прикладу функція scatteringchanmtx використовується для створення матриці каналу для різних конфігурацій масивів

передачі та прийому. Функція імітує кілька розсіювачів між масивами передачі та прийому. Сигнал спочатку проходить від передавального масиву до всіх розсіювачів, а потім відбивається від розсіювачів і досягає приймального масиву. Таким чином, кожен розсіювач визначає шлях проходження сигналу між масивом передачі та прийому, а результуюча матриця каналу описує середовище з багатопроменевим поширенням. Функція працює з антенними решітками довільного розміру будь-якої смуги частот.

Найпростіший бездротовий канал – це поширення по лінії прямої видимості (LOS). Такі канали часто можна знайти у сільській місцевості.

Розглянемо канал SISO LOS. Перш ніж обговорювати продуктивність системи MIMO, корисно побудувати базовий рівень із системою зв'язку з одним входом та одним виходом (SISO). Канал SISO LOS має прямий шлях від передавача до приймача. Такий канал можна змоделювати як окремий випадок багатопроменевого каналу. Використовуючи модуляцію BPSK, частоту помилок по бітах (BER) для такого каналу SISO зображено на рисунку 3.12.

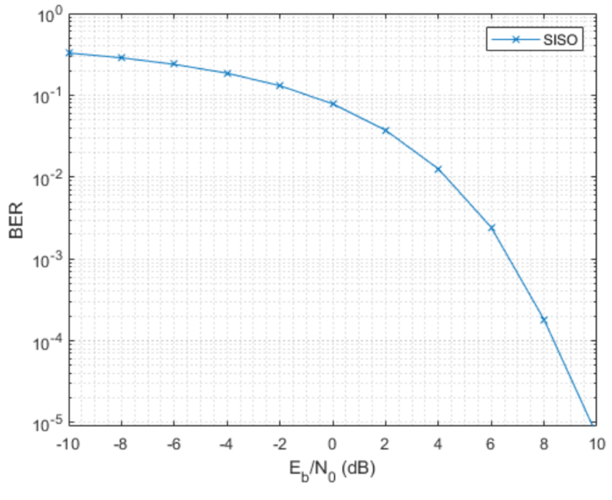


Рисунок 3.12 - Частота помилок по бітах (BER) для каналу SISO

Розглянемо канал SIMO LOS. З базовим рівнем, встановленим для системи SISO, тут основна увага приділяється системі з одним входом та кількома

виходами (SIMO). У такій системі є одна передавальна антена, і кілька приймальних антен. Існує прямий шлях між передавачем та приймачем.

У системі SIMO, оскільки сигнали через елементи приймальної решітки когерентні, можна направити приймальну решітку в бік передавача для поліпшення SNR. Це передбачає, що напрямок вхідного сигналу відомий приймачу. Кут часто виходить з використанням алгоритмів оцінки напрямку приходу. Крива BER показує підсилення 6 дБ, для приймального масиву.

Розглянемо канал MISO LOS. Система з кількома входами та одним виходом (MISO) працює аналогічним чином. У цьому випадку передавач є 4-елементним ULA (лінійний масив антен) з розносом в половину довжини хвилі. Система MISO на лінії прямої видимості забезпечує найкраще співвідношення сигнал-шум, коли передавач знає про приймач.

З попереднім керуванням продуктивність MISO відповідає продуктивності SIMO, збільшуючи SNR на 6 дБ. Це може бути не так інтуїтивно зрозуміло, порівняно з випадком SIMO, оскільки загальна потужність передачі не збільшується. Однак, замінивши одиночну ізотропну антену 4-елементною передаючою антенною решіткою, можна отримати підсилення 6 дБ.

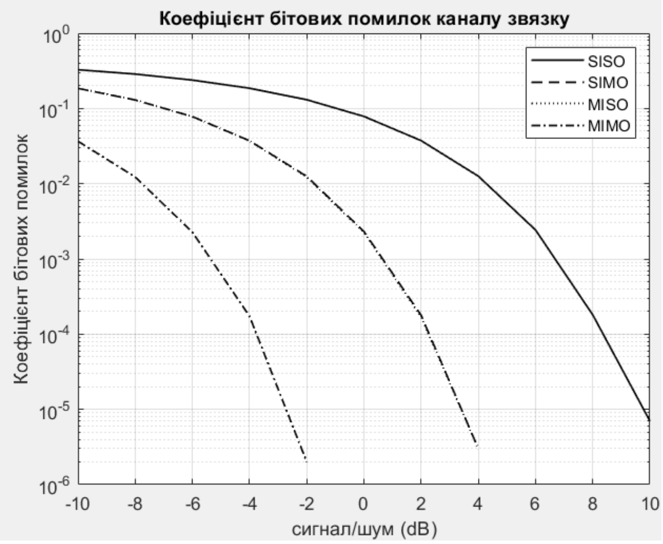


Рисунок 3.13 – Залежність коефіцієнту бітових помилок від відношення сигнал-шум для систем зв’язку: один вхід-один вихід; один вхід-багато виходів; багато входів-один вихід; багато входів-багато виходів

Розглянемо канал MIMO LOS. Оскільки система SIMO забезпечує підсилення масиву від масиву приймача, а система MISO забезпечує підсилення масиву від масиву передавача, система MIMO з поширенням LOS може отримати вигоду від підсилення масиву передачі, так і від прийому. Крива BER показує, що як масив передачі, так і масив прийому роблять внесок у підсилення масиву 6 дБ, що дає загальне підсилення 12 дБ порівняно з випадком SISO.

3.5 Підсилення сигналів при рознесенні

Усі канали у попередніх розділах є каналами прямої видимості. Хоча такі канали зустрічаються в деяких системах бездротового зв'язку, зазвичай бездротовий зв'язок відбувається в умовах багатопроменевого завмирання. Проведемо дослідження, як масиви можна використовувати у середовищі з кількома шляхами. Розглянемо багатопроменевий канал SISO. Припустимо, що у каналі 10 випадково розміщених розсіювачів, тоді буде 10 шляхів від передавача до приймача, як показано на рисунку.

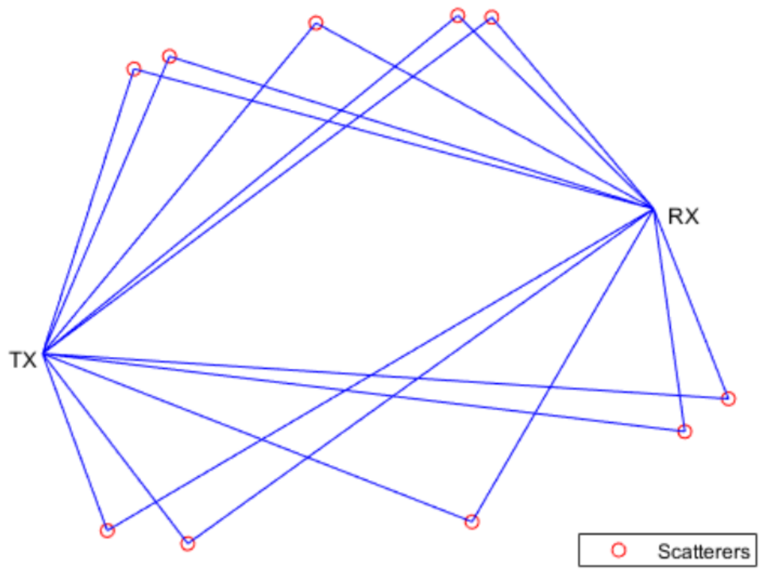


Рисунок 3.14 – Шляхи розповсюдження сигналу для системи MIMO

Для простоти припустимо, що сигнали, що проходять по всіх шляхах, надходять протягом одного і того ж символьного періоду, тому частота каналу є плоскою. Щоб змоделювати криву BER для каналу із завмираннями, канал повинен змінюватися з часом. Припустимо, ми маємо 1000 кадрів, і кожен кадр має 10000 біт. У порівнянні з кривою BER, отриманої для каналу LOS, BER падає набагато повільніше зі збільшенням відношення енергії на біт до спектральної щільності потужності шуму (Eb/N0) через замирання, викликане багатопроменевим поширенням.

Багатопроменевий канал SIMO. Чим більше приймальних антен використовується у приймальній решітці, тим більше копій прийнятих сигналів доступно у приймачі. Знову припустимо, що у приймачі використовується 4-елементний ULA (лінійний масив).

Оптимальні ваги комбіновані можуть бути отримані шляхом зіставлення відгуку каналу. Таку схему комбінування часто називають комбінуванням із максимальним відношенням (MRC). Хоча теоретично така схема вимагає знання каналу, практично відгук каналу часто можна оцінити за масивом приймача.

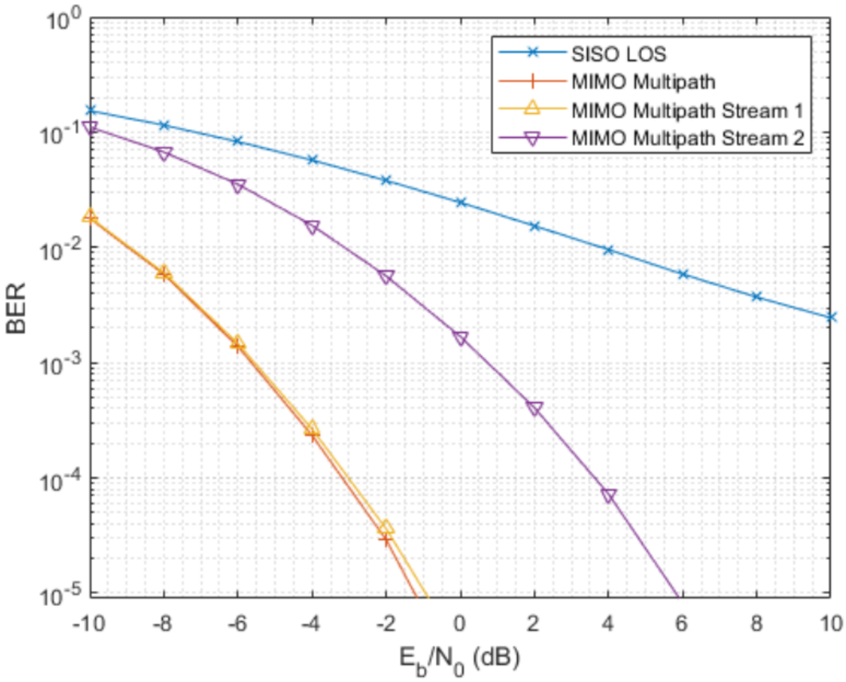


Рисунок 3.15 – Залежність коефіцієнту бітових помилок від відношення сигнал-шум для системи MIMO з багатьма шляхами розповсюдження

Прийнятий сигнал більше не зважується з вектором управління в певному напрямку. Замість цієї ваги приймаючого масива, в цьому випадку задаються комплексним сполученням відгуку каналу. В іншому випадку можливо, що через багатопроменевість сигнал, що приймається, не збігається за фазою з переданим. Це передбачає, що відгук каналу відомий приймачу. Якщо відгук каналу невідомий, для оцінки відгуку каналу можна використовувати пілот-сигнали.

Багатопроменевий канал MISO. Розглянемо випадок, коли в системі MISO існує багатопроменеве поширення. По-перше, якщо канал відомий передавачу, то стратегія покращення SNR аналогічна комбінуванню максимального відношення.

Якщо канал невідомий передавачу, є ще способи досліджувати рознесення за допомогою просторово-часового кодування. Наприклад, код Аламоуті є відомою схемою кодування, яку можна використовувати для досягнення виграшу від рознесення, коли канал невідомий.

Покажемо на графіку, як виглядає канал. Створимо канал MIMO 4x4, в якому передавач і приймач є 4-елементними ULA. Існує кілька шляхів між масивом передачі та масивом прийому через наявність розсіювачів. Кожен шлях складається з одного відображення відповідного розсіювача.

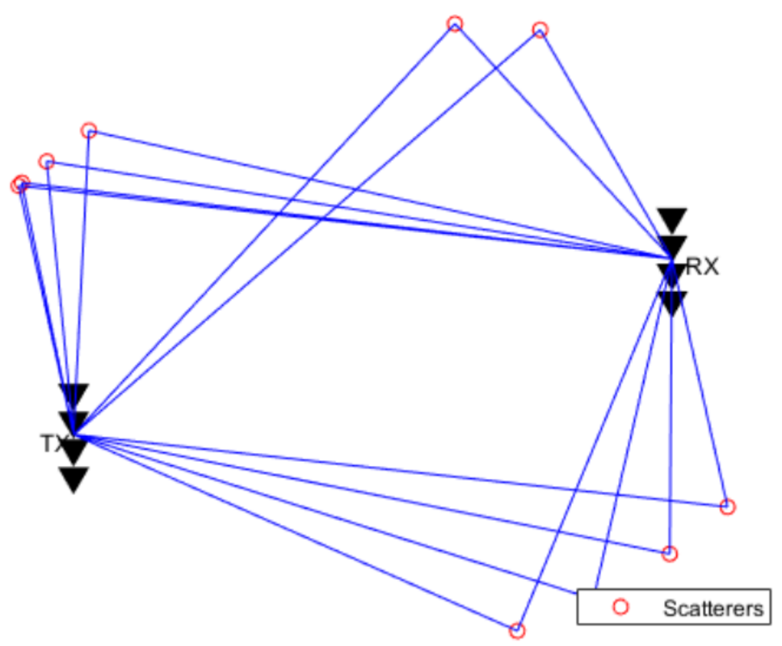


Рисунок 3.16 – Шляхи розповсюдження системи MIMO

Є два способи скористатися перевагою MIMO-каналу. Перший спосіб полягає у вивченні виграшу від рознесення, що забезпечується каналом MIMO. На рисунку 3.17 показаний виграш від рознесення кривою BER.

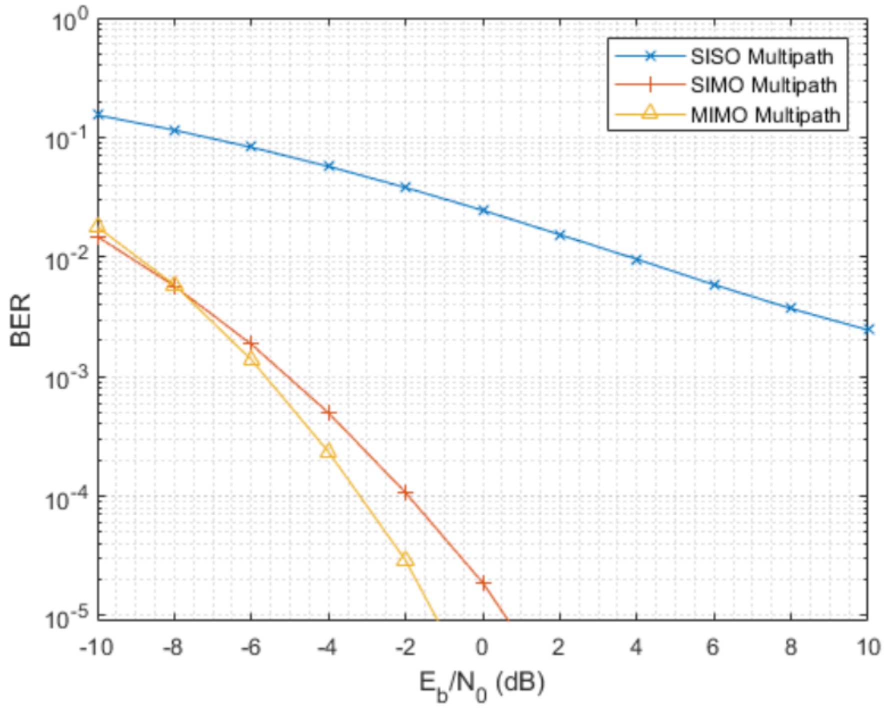


Рисунок 3.17 – Залежність коефіцієнту бітових помилок від відношення сигнал-шум для системи MIMO з рознесенням

Порівняйте криву BER з MIMO каналу з кривою BER, отриманої з системи SIMO. У разі багатопроменевості виграш від рознесення каналу MIMO не обов'язково краще, ніж виграш від рознесення, що забезпечується каналом SIMO. Це пов’язано з тим, що з отримання найкращого виграшу від рознесення використовується лише домінуючий режим у каналі MIMO, хоча у каналі є інші режими, які використовуються.

Ідея просторового мультиплексування полягає в тому, що багатопроменевий канал MIMO з багатим середовищем розсіювання може одночасно відправляти кілька потоків даних каналом. Наприклад, матриця каналу MIMO 4x4 стає повною через розсіювачі. Це означає, що одночасно можна

надсилати до 4 потоків даних. Мета просторового мультиплексування полягає не так у підвищенні SNR, як у збільшенні пропускної спроможності.

Ідея просторового мультиплексування полягає в тому, щоб розділити матрицю каналу на множинний режим, щоб потік даних, відправлений з різних елементів масиву передачі, можна було незалежно відновити з прийнятого сигналу. Для цього потік даних попередньо кодується перед передачею, а потім поєднується після прийому. Вага попереднього кодування та об'єднання можуть бути обчислені з матриці каналу за допомогою.

Щоб зрозуміти, чому комбінація попереднього кодування та комбінування ваг може допомогти передавати кілька потоків даних одночасно, досліджуйте добуток ваг та матриці каналу.

Добуток є діагональною матрицею, що означає, що інформація, отримана кожним елементом масиву прийому, є просто масштабованою версією елемента масиву передачі. Таким чином, він поводиться як кілька ортогональних підканалів усередині вихідного каналу. Перший підканал відповідає домінуючим напрямкам передачі та прийому, тому виграш від рознесення не втрачається. Крім того, тепер можна використовувати інші підканали для передачі інформації.

Хоча другий потік не може забезпечити таке саме підсилення, як перший потік, оскільки він використовує менш домінуючий підканал, загальна пропускна здатність збільшується. Тому в наступному розділі продуктивність вимірюється пропускною здатністю каналу, а не кривою BER.

Найбільш інтуїтивний спосіб передачі даних у системі MIMO – це рівномірний розподіл потужності між передаючими елементами. Однак пропускна здатність каналу може бути додатково покращена, якщо канал відомий передавачу. У цьому випадку передавач міг би використовувати алгоритм заповнення водою, щоб зробити вибір передачі тільки в тих підканалах, де може бути отримано задовільне відношення сигнал-шум.

Від формування променя до попереднього кодування. Нарешті, варто подивитися, як ці різні методи використання масивів співвідносяться один з

одним. Починаючи з каналу LOS, як згадувалося в попередніх розділах, перевага, що забезпечується масивом, полягає у покращенні SNR.

Зі схеми видно, що в цьому випадку ваги передачі та прийому утворюють два промені, спрямованих один до одного. Залежно від характеру каналу масиви можуть використовуватися або для поліпшення SNR за рахунок підсилення масиву або підсилення рознесення, або підвищення пропускної здатності за рахунок просторового мультиплексування.

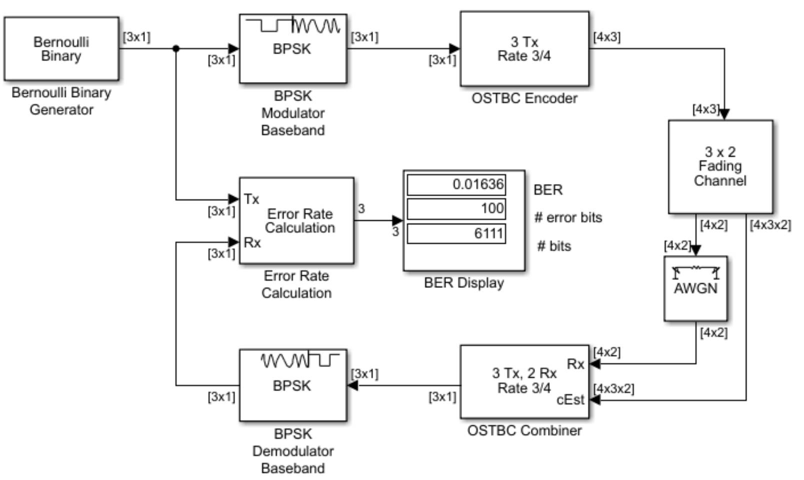


Рисунок 3.18 – Simulink модель системи MIMO

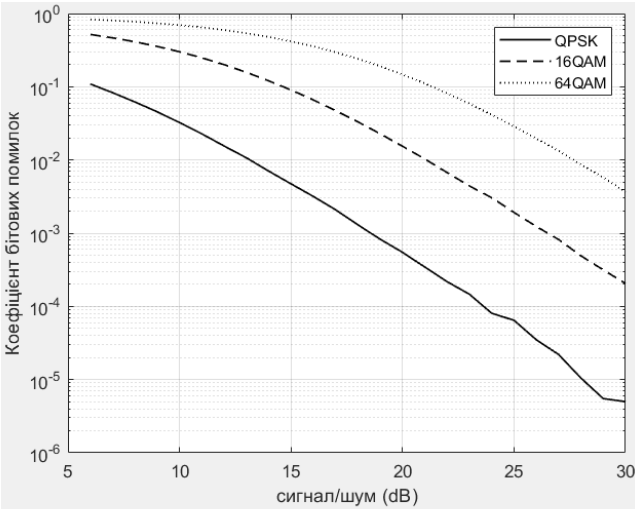


Рисунок 3.19 – Залежність коефіцієнту бітових помилок від відношення сигнал-шум системи MIMO і модуляцією QPSK, 16-QAM, 64-QAM

Отже, підсилення масиву досягається шляхом формування променя. Коли є лише один доступний шлях між масивами передачі та прийому, попереднє кодування вироджується у схему формування діаграми спрямованості.

При збільшенні позиційності модуляції, для отримання заданого коефіцієнту 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. Для збільшення швидкості передачі з 2 біт на символ до 6 біт на символ при коефіцієнті бітової помилки 1e-5, необхідно збільшити відношення сигнал-шум на 13 дБ.

Висновки до третього розділу

Взаємний зв'язок - це електромагнітна взаємодія між елементами антени у антенній решітці. Струм, що виникає в кожному антенному елементі решітки залежить від їх власного збудження, а також від вкладів сусідніх антенних елементів. Рознесення 0,5λ незначно впливає на BER як при високій, так і при низькій кореляції. Для випадку з високим степенем зв'язку, тобто з відстанню між елементами 0,1λ, результати показують, що в залежності від умов кореляції BER зв’язок може бути вище або нижче ніж зв'язок у випадку, коли зчеплення не враховувалося.

ВИСНОВКИ

1. Системи MIMO характеризуються максимально доступною пропускною здатністю, яка знижується за наявності кореляції між сигналами на різних каналах. Кореляція в першу чергу викликана взаємним зв'язком між елементами антенних решіток як на приймальній, так і на передаючій стороні. У випадку наявності слабкого зв’язку між антенами (відстань між антенами у решітці 0,5λ), коефіцієнт бітових помилок майже не змінюється. У випадку наявності сильного зв’язку (відстань між антенами у решітці = 0,1λ), коефіцієнт бітових помилок 1e-4 досягається при меншому на 1 дБ відношенні сигнал-шум, ніж при відсутності зв’язку між антенами.

2. Система MISO на лінії прямої видимості забезпечує найкраще співвідношення сигнал-шум, коли передавач спрямовує промінь у бік приймача. Оскільки система SIMO забезпечує підсилення від масиву на вході приймача, а система MISO забезпечує підсилення масиву від масиву передачі, система MIMO може отримати вигоду від підсилення масиву передачі, так і від прийому. Як масив передачі, так і масив прийому роблять внесок у підсилення 6 дБ, що дає загальне підсилення 12 дБ порівняно з випадком SISO.

3. Досліджені залежності коефіцієнту 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 24 дБ можна досягти при використанні модуляції QPSK. При використанні модуляції 16QAM відношення сигнал-шум необхідно збільшити на 6 дБ для досягнення такого ж коефіцієнту бітових помилок.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Климаш М.М. Технології безпровідного зв'язку /М.М. Климаш, В.О. Пелішок, П.М. Михайлевич. – Львів, 2007. – 818 с.

2. Anioke, C. L., Nnamani, C. O. and Ani, C. I. "Review of Wireless MIMO Channel Models" Nigerian Journal of Technology, 35(2): 381-391, 2016.

3. Ященко С.В. Модель OFDM з цикло-стаціонарним визначенням спектру / С.В. Ященко, 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 безпровідному 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.

9. 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 електрозв’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.

16. Boiko J., Pyatin I., Karpova L., Eromenko O. (2021) Study of the Influence of Changing Signal Propagation Conditions in the Communication Channel on Bit Error Rate. In: Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 69. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71892-3_4

Відгук на кваліфікаційну роботу виконану за темою «Канал передачі з просторовим кодуванням сигналів для мобільних телекомунікацій» студента гр. ТР-18-1 Слободяна В.М.

Сучасні системи мобільного зв'язку підтримує гнучку смугу пропускання, яка є основним фактором пропускної спроможності. Для підвищення швидкості передачі інформації також важливо використання антен MIMO. Сьогодні у світі впроваджуються системи зв'язку наступного покоління, тому тема роботи є актуальною.

У кваліфікаційному проєкті студента Слободяна В.М. розглядаються принципи використання каналу MIMO – систем зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами. Фазовані антенні решітки, управління променем та формування діаграми спрямованості – найважливіші технології, що використовуються у пристроях стандарту 5G. Системи MIMO характеризуються максимально доступною пропускною здатністю, яка знижується за наявності кореляції між сигналами на різних каналах. Кореляція в першу чергу викликана взаємним зв'язком між елементами антенних решіток як на приймальній, так і на передаючій стороні. Система MISO на лінії прямої видимості забезпечує найкраще співвідношення сигнал-шум, коли передавач спрямовує промінь у бік приймача. Оскільки система SIMO забезпечує підсилення від масиву на вході приймача, а система MISO забезпечує підсилення масиву від масиву передачі, система MIMO може отримати вигоду від підсилення масиву передачі, так і від прийому. Як масив передачі, так і масив прийому роблять внесок у підсилення 6 дБ, що дає загальне підсилення 12 дБ порівняно з випадком SISO. Досліджені залежності коефіцієнту 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 24 дБ можна досягти для модуляції QPSK. При використанні модуляції 16QAM відношення сигнал-шум необхідно збільшити на 6 дБ для досягнення такого ж коефіцієнту бітових помилок.

В цілому під час роботи над кваліфікаційним проєктом студент Слободян В.М. проявив себе як грамотний спеціаліст в галузі телекомунікацій, показав вміння та навички і набуті компетентності при проведенні досліджень.

Кваліфікаційний проєкт виконано на високому технічному рівні, він має безперечну актуальність в області сучасних телекомунікацій, а студент Слободян В.М. заслуговує оцінки «відмінно».

Професор кафедри телекомунікацій,
медійних та інтелектуальних технологій Бойко Б.М.

Рецензія
опонента на бакалаврську кваліфікаційну роботу виконану за темою:
«Канал передачі з просторовим кодуванням сигналів для
мобільних телекомунікацій» студента гр. ТР-18-1 Слободяна В.М.

В кваліфікаційному проєкті студента Слободяна В.М. проведено моделювання каналу передачі з просторовим кодуванням сигналів для мобільних телекомунікацій. Розглянуті принципи використання технологій MIMO, необхідність збільшення пропускної спроможності каналів зв'язку, проведено дослідження коефіцієнту бітових помилок.

Системи MIMO характеризуються максимально доступною пропускною здатністю, яка знижується за наявності кореляції між сигналами на різних каналах. Кореляція в першу чергу викликана взаємним зв'язком між елементами антенних решіток як на приймальній, так і на передаючій стороні. У випадку наявності слабкого зв'язку між антенами (відстань між антенами у решітці 0,5λ), коефіцієнт бітових помилок майже не змінюється. У випадку наявності сильного зв'язку (відстань між антенами у решітці = 0,1λ), коефіцієнт бітових помилок 1е-4 досягається при меншому на 1 дБ відношенні сигнал-шум, ніж при відсутності зв'язку між антенами. Система MISO на лінії прямої видимості забезпечує найкраще співвідношення сигнал-шум, коли передавач спрямовує промінь у бік приймача. Системи MIMO на 12 дБ енергетично ефективніші порівняно з системами SISO. Досліджені залежності коефіцієнту бітових помилок від відношення сигнал-шум для системи зв'язку з різними видами модуляції: QPSK, 16QAM, 64QAM. Коефіцієнт бітових помилок 1е-4 з відношенням сигнал-шум 24 дБ можна досягти при використанні модуляції QPSK. При використанні модуляції 16QAM відношення сигнал-шум необхідно збільшити на 6 дБ для досягнення такого ж коефіцієнту бітових помилок.

В цілому дослідження каналу передачі з просторовим кодуванням сигналів для мобільних телекомунікацій виконано на високому технічному рівні, має актуальність в області сучасних телекомунікацій, а студент Слободян В.М. заслуговує оцінки «відмінно».

Опонент: к.т.н., доцент
кафедри фізики та електротехніки **Олександр ЄРЬОМЕНКО**

Завідувачу кафедри телекомунікацій,
медійних та інтелектуальних технологій_ХНУ
Підченку Сергію Костянтиновичу____________
здобувача вищої освіти, студента Слободяна
Владислав Миколайович, факультету
інформаційних технологій, 4-го курсу,
група ТР-18-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу мого кваліфікаційного проєкту виконаного за темою «Радіоприймальний пристрій з цифровою фільтрацією» для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

_____30.05.2022_________ ________________

дата підпис

РІШЕННЯ **КАФЕДРИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Канал передачі з просторовим кодуванням сигналів для мобільних телекомунікацій

Автор: *Слободян Владислав Миколайович*

Спеціальність: *172 Телекомунікації та радіотехніка*

Науковий керівник: *д.т.н., професор Бойко Юлій Миколайович*

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	-
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	-
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	-
5	Інше:	-

Підтвердження: Виявленні запозичення не є плагіатом так як розміщенні в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження (є власні терміни, визначення тощо), складають 3,27% та мають посилання на приведений список літературних джерел.

«30» травня 2022 р.

Науковий керівник Бойко Ю.М.

Завідувач кафедрою ТМІТ Підченко С.К.

Mon May 30 21:50:29 EEST 2022, Стецюк Віктор Іванович, Хмельницький національний університет, ХНУ

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 3.0%

Словари проверки: en_US, ru_RU, ua_UA. **Ошибок в документах: 8%**

	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
ID: 104240 Название: Канал передачі з просторовим кодуванням сигналів для мобільних телекомунікацій Добавлено в БД: 2022-05-30 Авторы: Слободян Владислав Миколайович Руководители: Бойко Юлій Миколайович Консультанты: Опоненты:	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	89382	1346	2639 (3%)	38 (3%)

Источник плагиата

ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы

UNICHECK

Имя пользователя:
Kafedra TMIT KhNU

Дата проверки:
30.05.2022 21:03:26 EEST

Дата отчета:
30.05.2022 21:33:06 EEST

ID **проверки:**
1011385823

Тип проверки:
Doc vs Internet

ID **пользователя:**
100005657

Название файла: Слободян_ТР_18

Количество страниц: 74 Количество слов: 15210 Количество символов: 113394 Размер файла: 3.46 MB ID **файла: 1011269647**

3.13%
Совпадения

Наибольшее совпадение: 0.55% с Интернет-источником (http://elar.khnu.km.ua/jspui/bitstream/123456789/9520/1/%D0.

3.13% Источники из Интернета | 196 .... **Страница** 76