

## ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

**ДИПЛОМНА РОБОТА**Другого (магістерського) рівня

Освітній рівень

ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 17 Електроніка та телекомунікації .  
Шифр і назва галузі

СПЕЦІАЛЬНІСТЬ 172 Телекомунікації та радіотехніка .  
Шифр і назва спеціальності

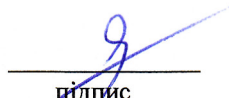
ОСВІТНЯ ПРОГРАМА «Телекомунікації та радіотехніка» .  
Назва освітньої програми

на тему «Синтез антени високого рівня МІМО для девайсів 5G з  
обмеженим простором»

ДРТР. 19022.09.04 ПЗ

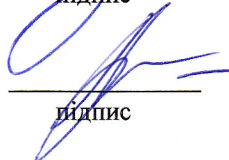
Виконав:

здбувач 2 курсу, група ТРм-22-1

  
підписВіталій СЕМЕНЮК

Ініціали, прізвище

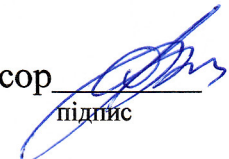
Керівник: д-р техн. наук, професор

  
підписЮлій БОЙКО

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, професор

  
підписСергій ПІДЧЕНКО

Ініціали, прізвище

«01» грудня 2023р.

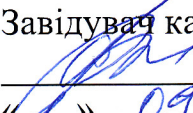
Хмельницький, 2023

## Хмельницький національний університет

Факультет	<u>«Інформаційних технологій»</u>
Кафедра	<u>«Телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій»</u>
Освітній рівень:	<u>Другий (магістерський)</u>
Галузь знань:	<u>17 Електроніка та телекомунікації</u>
Спеціальність:	<u>172 Телекомунікації та радіотехніка</u>
Освітня програма:	<u>Телекомунікації та радіотехніка</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру ТМІТ

 Сергій ПІДЧЕНКО

« 1 » 09 2023 р.

**ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ**СЕМЕНЮКУ Віталію Олеговичу

1 Тема роботи: «Синтез антени високого рівня МІМО для девайсів 5G з обмеженим простором»

керівник роботи: БОЙКО Юлій Миколайович, д-р техн. наук, професор

Затверджено наказом по університету від «15» серпня 2023 р. № 30

2 Строк подання здобувачем проєкту на кафедру \_\_\_\_\_

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

*Мета роботи:* аналіз та вдосконалення конструкції антенної системи МІМО для смартфонів з підтримкою технології 5G на частоті нижче 6 ГГц

*Об'єкт дослідження:* антенна система МІМО для смартфонів з підтримкою технології 5G на частоті нижче 6 ГГц.

*Предмет дослідження:* конструкція та параметри одноплощинної антенної системи МІМО для смартфонів з підтримкою 5G на частоті нижче 6 ГГц, включаючи вивчення її характеристик, продуктивності та впливу взаємодії з руками та головою користувача.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1 Аналіз сучасних технологій 5G для забезпечення міліметрових хвиль в бездротовому зв'язку. 2 Математичні параметри мімо у науковому дослідженні бездротового зв'язку 5G. 3 Методи та стратегії розробки антен МІМО для радіодіапазонів FR-1 та FR-2. 4 реалізація технічного рішення для одноплощинної антенної системи МІМО.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):

презентаційні слайди

## 6 Консультанти розділів дипломної роботи

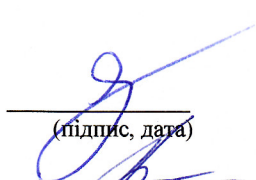
Розділ	Прізвища, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7 Дата видачі завдання 15.08.2023**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на дипломну роботу	07.09.2023р.	<i>виконано</i>
2.	Складання індивідуального плану на дипломну роботу	15.09.2023р.	<i>виконано</i>
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	20.10.2023р.	<i>виконано</i>
4.	Написання другого розділу	05.11.2023р.	<i>виконано</i>
5.	Написання третього розділу	20.11.2023р.	<i>виконано</i>
6.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до дипломну роботу	22.11.2023р.	<i>виконано</i>
7.	Формулювання висновків до роботи	23.11.2023р.	<i>виконано</i>
8.	Підготовка матеріалів для апробації	23.11.2023р.	<i>виконано</i>
9.	Оформлення пояснювальної записки до ДР	26.11.2023р.	<i>виконано</i>

Здобувач

Керівник роботи

  
(підпис, дата)Віталій СЕМЕНЮК  
(підпис, дата)Юлій БОЙКО

## АНОТАЦІЯ

Тема дипломної роботи: «Синтез антени високого рівня МІМО для девайсів 5G з обмеженим простором»

Автор роботи: СЕМЕНЮК Віталій Олегович

Керівник роботи: д-р техн. наук, професор БОЙКО Юлій Миколайович.

Пояснювальна записка: 101 сторінок, 51 рисуноків, 2 таблиць, 50 джерела.

Графічна частина: 15 презентаційних слайдів.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** АНТЕНА МІМО, ДІАГРАМА СПРЯМОВАНОСТІ, СМУГА ПРОПУСКАННЯ, ПЕТЛЕПОДІБНА КОНСТРУКЦІЯ, КОЕФІЦІЄНТ АКТИВНОГО ВІДБИТТЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, КОЕФІЦІЄНТ ПІДСИЛЕННЯ, 5G СМАРТФОН.

*Метою дипломної роботи є аналіз та вдосконалення конструкції антенної системи МІМО для смартфонів з підтримкою технології 5G на частоті нижче 6 ГГц.*

*Об'єктом дослідження є антенна система МІМО для смартфонів з підтримкою технології 5G на частоті нижче 6 ГГц.*

*Предметом дослідження є конструкція та параметри одноплощинної антенної системи МІМО для смартфонів з підтримкою 5G на частоті нижче 6 ГГц, включаючи вивчення її характеристик, продуктивності та впливу взаємодії з руками та головою користувача.*

В дипломній роботі досліджується можливість використання антенної конфігурації з чотирьох випромінювачів у формі петлі, розташованих у кожному куті плати мобільного телефону, з метою забезпечення покращеного рознесення діаграм спрямованості. Прагнеться досягнути оптимальної частотної характеристики, ефективності та покриття випромінюванням, забезпечуючи при цьому задані показники ізоляції між антенними елементами. Додатково, вивчається вплив взаємодії антени МІМО з руками та головою користувача на продуктивність антенної системи в умовах передачі даних та розмови.

## ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	7
ВСТУП .....	8
1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 5G ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЬ В БЕЗДРОТОВОМУ ЗВ'ЯЗКУ .....	13
1.1 Аналіз антен МІМО для технологій 5G.....	13
1.2 Ключові особливості технології 5G.....	16
1.2.1 Технологія міліметрових хвиль – mmWave .....	18
1.2.2 Множинне введення та виведення з багатомасивними антенами (МІМО/m-МІМО).....	19
1.2.3 Малі соти в технології 5G .....	20
1.2.4 Розділення мережі.....	21
1.2.5 Хмарні обчислення в контексті мережі 5G .....	22
1.2.6 Консолідація носіїв та бімформінг.....	23
1.3 Архітектура мережі радіодоступу .....	24
1.3.1 Архітектура мережі радіодоступу для 5G .....	26
1.4 Антени для мережі 5G .....	30
1.4.1 Базові станції макростільника .....	30
1.4.2 Антени для смартфонів .....	33
1.5 Висновок до першого розділу .....	34
2 МАТЕМАТИЧНІ ПАРАМЕТРИ МІМО У НАУКОВОМУ ДОСЛІДЖЕННІ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G.....	35
2.1 Коефіцієнт кореляції обвідної .....	35
2.2 Загальний коефіцієнт активного відбиття.....	36
2.3 Пропускна здатність каналу в системах МІМО .....	38
2.4 Середнє ефективне підсилення в системах МІМО .....	40
2.5 Спектральна ефективність в системах МІМО .....	42
2.6 Переваги систем МІМО в бездротовому зв'язку .....	43
2.7 Формування променя.....	45
2.8 Отримання та відстеження променя .....	47
2.9 Стандартизація базових технологій для mmWave .....	49

	6
2.9.1 3GPP NR FR2.....	49
2.10 Висновки до другого розділу.....	55
3 МЕТОДИ ТА СТРАТЕГІЇ РОЗРОБКИ АНТЕН МІМО ДЛЯ РАДІОДІАПАЗОНІВ FR-1 ТА FR-2: АНАЛІЗ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	56
3.1 Підходи до розробки широкосмугових/надширокосмугових антен МІМО із структурою розв'язки .....	56
3.2 Підходи до проектування реконфігурованої/багатодіапазонної антени МІМО.....	63
3.3 Кругова поляризована широкосмугова, багатосмугова та реконфігурована МІМО антена для діапазону нижче 6 ГГц і mmWave .....	67
3.4 Проблеми проектування антен 5G МІМО.....	70
3.4.1 Зчеплення.....	71
3.4.2 Компактність портативних пристроїв .....	72
3.4.3 Різноманітність поляризації.....	73
3.4.4 Покриття діапазону частот.....	73
3.5 Висновки до третього розділу .....	73
4 РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ДЛЯ ОДНОПЛОЩИННОЇ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ МІМО .....	75
4.1 Аналіз результатів моделювання та їх порівняння з експериментальними даними.....	75
4.2 Конструкція запропонованої одноплощинної антенної системи МІМО.....	79
4.3 Характеристики одноантенних елементів.....	80
4.4 Характеристики запропонованої антени МІМО.....	81
4.5 Вимірювання запропонованої антени МІМО .....	85
4.6 Вплив користувача на характеристики антени.....	88
4.7 Висновки до четвертого розділу .....	90
ВИСНОВКИ.....	92
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	94
ДОДАТКИ.....	100

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

BW	–	Смуга пропускання
DG	–	Підсилення від рознесеності (diversity gain )
ECC	–	Envelope correlation coefficient
FDMA	–	Частотний розподіл
GSM	–	Global System for Mobile Communications
LTE	–	Long-Term Evolution
MIMO	–	Multiple-input and multiple-output
m-MIMO	–	Масивне введення і виведення з багатомасивними антенами
mMTC	–	Massive machine-type communications
mm-Wave	–	Millimetre-wave
OFDMA	–	Ортогональна технологія багатократного доступу для передачі вниз
SC-FDMA	–	Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
TARC	–	Total active reflection coefficient
URLLC	–	Ultra-reliable low-latency communications

## ВСТУП

У сучасному світі, де технології постійно розвиваються та змінюють наше оточення, бездротові комунікації та мобільні додатки стали невід'ємною частиною нашого повсякденного життя. Швидкий ріст мереж п'ятого покоління (5G) відкрив нові можливості для забезпечення зв'язку, що є важливим кроком до майбутнього.

Однією з ключових складових технології 5G є використання антенних систем MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), які дозволяють забезпечити велику швидкість передачі даних, низьку затримку та підвищену якість зв'язку. В даній роботі ми представляємо конструкцію одноплощинної антенної системи MIMO, спеціально розробленої для смартфонів з підтримкою 5G на частоті нижче 6 ГГц.

Ця антенна MIMO складається з чотирьох випромінювачів у формі петлі, які розташовані у кожному куті плати мобільного телефону, що дозволяє досягнути рознесення діаграм спрямованості. Результати дослідження показують, що одноантенний елемент досягає пікового підсилення 3,64 дБі з ефективністю антени понад 90%. Конфігурація антени MIMO дозволяє досягти ізоляції більше 10 дБ між її елементами, що сприяє покращенню продуктивності.

Однак, окрім технічних аспектів, в роботі також розглядається вплив людських рук та голови на продуктивність антени MIMO. Оцінка продуктивності у режимах передачі даних та розмови дозволила з'ясувати прийнятну функціональність антени у реальних умовах використання.

Отже, дана дипломна робота присвячена розробці та аналізу антенної системи MIMO для смартфонів з підтримкою 5G, що важливо для подальшого розвитку бездротового зв'язку та забезпечення якісного з'єднання у мережах нового покоління.

**Актуальність роботи** полягає в необхідності розробки та оптимізації антенних систем MIMO для сучасних смартфонів з підтримкою технології 5G. Враховуючи швидке розширення 5G мереж і зростання вимог до швидкості передачі даних, низької латентності та надійності зв'язку, важливо забезпечити оптимальну продуктивність антенних систем. Подолання обмежень викликані обмеженими розмірами сучасних смартфонів та підвищенням частотної діапазону 5G, а також забезпечення належного функціонування антен під час взаємодії з руками та головою користувача, створює високий попит на дослідження та розробку оптимальних антенних конфігурацій для забезпечення якісного зв'язку та задоволення вимог сучасних користувачів.

**Метою** дипломної роботи є аналіз та вдосконалення конструкції антенної системи MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) для смартфонів з підтримкою технології 5G на частоті нижче 6 ГГц.

Досліджується можливість використання антенної конфігурації з чотирьох випромінювачів у формі петлі, розташованих у кожному куті плати мобільного телефону, з метою забезпечення покращеного рознесення діаграм спрямованості. Прагнеться досягнути оптимальної частотної характеристики, ефективності та покриття випромінюванням, забезпечуючи при цьому задані показники ізоляції між антенними елементами. Додатково, вивчається вплив взаємодії антени MIMO з руками та головою користувача на продуктивність антенної системи в умовах передачі даних та розмови.

**Метод дослідження**, використовуваний у даній роботі, базується на поєднанні експериментальних та аналітичних підходів. Першочергово, проводиться аналіз літературних джерел та наявних даних про антенні технології, MIMO-системи та параметри 5G мереж для визначення ключових вимог та тенденцій.

Далі, виконується концептуальне проектування антенної системи, включаючи вибір форми випромінювачів, розташування на платі смартфону, та розрахунки параметрів для досягнення покращеної характеристики.

Для практичної оцінки антенної системи, проводяться експерименти з виготовлення прототипу та його вимірювання за допомогою антенних вимірювальних приладів. Результати вимірювань порівнюються з теоретичними розрахунками, що дозволяє підтвердити ефективність конструкції.

Для дослідження впливу взаємодії з руками та головою користувача, можуть бути використані чисельні моделі або віртуальні середовища для симуляції реальних умов використання.

Комплексне поєднання аналізу, експериментальних досліджень та моделювання дозволяє отримати вичерпний огляд та оцінку продуктивності розробленої антенної системи МІМО для смартфонів 5G.

**Об'єктом дослідження** є антенна система МІМО (Multiple-Input Multiple-Output) для смартфонів з підтримкою технології 5G на частоті нижче 6 ГГц.

**Предметом дослідження** є конструкція та параметри одноплосинної антенної системи МІМО для смартфонів з підтримкою 5G на частоті нижче 6 ГГц, включаючи вивчення її характеристик, продуктивності та впливу взаємодії з руками та головою користувача.

Для досягнення мети використані **методи** множинного доступу в бездротовому зв'язку для передачі даних від одного пристрою до іншого через радіоресурси.

Для досягнення мети були використані наступні методи:

- проведений огляд наукової літератури та даних, що стосуються антенних технологій, МІМО-систем та 5G мереж, для визначення ключових питань та вимог.

- предстало конструкцію антенної системи, включаючи вибір форми випромінювачів, їх розташування на платі смартфона та розрахунки параметрів.

- використання чисельних моделей або віртуальних середовищ для симуляції взаємодії антени МІМО з руками та головою користувача.

- оцінка отриманих даних з експериментів та моделювання для визначення ефективності та продуктивності антенної системи.

Комбінація цих методів дозволила досягнути мети роботи – розробки та аналізу антенної системи МІМО для смартфонів 5G.

**Наукова новизна** отриманих результатів: представлено нову конструкцію одноплосинної антенної системи МІМО для смартфонів 5G, що базується на розташуванні чотирьох випромінювачів у формі петлі в кутах плати мобільного телефону.

Вдалося досягнути оптимальних характеристик антенних елементів, зокрема пікового підсилення 3,64 дБі та ефективності антени понад 90% для одного антенного елемента. Проведено дослідження впливу взаємодії антени МІМО з руками та головою користувача на її продуктивність, що розширює знання про фактори, що впливають на зв'язок. Враховуючи особливості 5G мереж та потребу у багатонаправленому зв'язку, розроблена антенна система забезпечує відповідне покриття випромінюванням для підтримки різних сторін плати мобільного телефону.

Отримані результати можуть бути використані для покращення продуктивності антенних систем МІМО у сучасних смартфонах з підтримкою 5G, що має практичне значення для розвитку та вдосконалення телекомунікаційних технологій.

Одержані результати мають важливе **практичне значення** для телекомунікаційної індустрії та розвитку мобільних технологій: вдосконалено технологію 5G, а саме представлена антенна система МІМО сприяє

покращенню продуктивності мереж 5G, забезпечуючи більш стабільний та швидкий зв'язок, що важливо для розширення можливостей та якості телекомунікаційних послуг.

Загалом, практичне значення результатів дослідження полягає в покращенні продуктивності, надійності та якості зв'язку в мобільних мережах 5G, що впливає на розвиток та покращення телекомунікаційної інфраструктури та забезпечує високу якість обслуговування для користувачів.

За темою дипломної роботи опублікована одна стаття у науковому журналі "Вісник Хмельницького національного університету" № 5 за 2023 р., серія "Технічні науки", який включено до наукометричних баз (Index Copernicus, Google Scholar)

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 5G ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЬ В БЕЗДРОТОВОМУ ЗВ'ЯЗКУ

## 1.1 Аналіз антен МІМО для технологій 5G

Бездротові та мобільні застосунки зазнали значного зростання, перейшовши від аналогового зв'язку до цифрового. Сучасні конструкції антен стикаються з проблемами, пов'язаними з обмеженням простору, сумісністю, підтримкою кількох частотних діапазонів, дотриманням нормативів коефіцієнта поглинання (SAR) і сумісністю зі слуховими апаратами. Крім того, цифровий зв'язок вимагає вирішення таких проблем, як змінна швидкість передачі даних, висока пропускна здатність і масштабована пропускна здатність на базових станціях і мобільних пристроях. Поведінка антени МІМО характеризується кількома параметрами. Підсилення далекого поля вимірює інтенсивність випромінювання в дальній зоні. Підсилення рознесеності кількісно визначає покращення якості сигналу, досягнутого завдяки використанню кількох антен. Коефіцієнт кореляції обвідної оцінює кореляцію між різними елементами антени. Загальний коефіцієнт активного відбиття вимірює відбиття та втрати в антенній системі. Середнє ефективне підсилення оцінює середнє підсилення в певному напрямку.

Мобільні мережі наступного покоління (5G, 5G) забезпечують набагато швидше з'єднання та значно вищі швидкості передачі даних порівняно з системами четвертого покоління (4G) з кращою стабільністю, більшою пропускною здатністю каналу, більшою спектральною ефективністю та меншим споживанням енергії. Міжнародний союз електрозв'язку визначає новий радіозв'язок (NR) для міжнародного мобільного зв'язку (IMT) NR FR-1 (діапазон нижче 6 ГГц) із каналами n78 (3,3–3,8 ГГц), n77 (3,3–3,8 ГГц), n79 (4,4–5 ГГц). Загальна кількість абонентів мобільного зв'язку сягнула приблизно 8,4 мільярда в першому кварталі 2023 року, а чистий приріст – 39 мільйонів.

Величезний обсяг трафіку даних у всьому світі зріс у рази, тому звичайні антени, такі як PIFA та монополи, не можуть задовольнити попит. Нова технологія кількох антен із антенною решіткою та MIMO є перспективною технологією для забезпечення кращої пропускної здатності каналу з додатковою пропускною здатністю або потужністю передачі. MIMO та m-MIMO – це технологія наступного покоління для мобільного зв'язку, яка об'єднує кілька елементів у передавача і приймача, що забезпечує кращу спектральну ефективність, вищу швидкість передачі даних і пропускну здатність каналу. На рисунку 1.1 наведено еволюцію мобільних технологій від 1G до 5G. З появою стільникових мереж першого покоління (1G) у 1980-х роках мобільні технології зазнали значного прогресу. З кожним новим поколінням швидкість мережі, пропускна спроможність і функціональні можливості покращувалися, створюючи нові мобільні пристрої та програми.

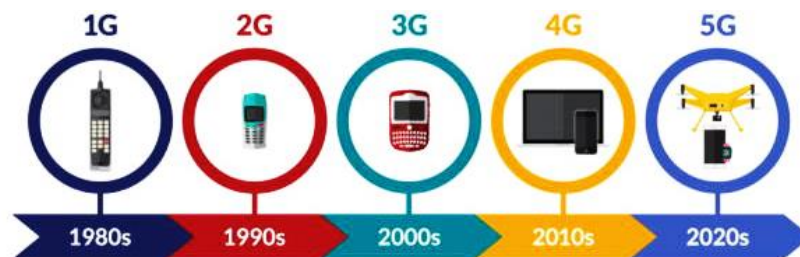


Рисунок 1.1 – Еволюція покоління мобільного зв'язку

#### Еволюція мобільних технологій 1G–5G:

Мережі першого покоління (1G) були аналоговими і підтримували лише голосові виклики. Ці мережі піддавалися перешкодам і шпигунству, оскільки вони використовували частотну модуляцію (FM) для передачі сигналів. У 1979 році Японія запустила першу мережу 1G. Мережі другого покоління (2G) були першими цифровими стільниковими мережами, які були розроблені на початку 1990-х років. Для підвищення пропускної здатності та якості голосового зв'язку ці мережі використовували технології TDMA і CDMA. Служба коротких текстових повідомлень (SMS) дозволяє абонентам

надсилати або отримувати текстові повідомлення і також була впроваджена в мережах 2G. Мережі третього покоління (3G) були розроблені на початку 2000-х років і значно покращили швидкість мережі та ємність даних. Ці мережі забезпечили мобільний доступ до Інтернету, відеодзвінки та обмін мультимедійними повідомленнями завдяки використанню технологій HSPA (високошвидкісний пакетний доступ) і WCDMA (широкосмуговий множинний доступ з кодовим розділенням каналів). Мережі четвертого покоління (4G), представлені наприкінці 2000-х років, забезпечували вищу швидкість мережі та більшу ємність даних, ніж мережі 3G. Технологія довгострокового розвитку (LTE) була використана в цих мережах для забезпечення швидшої швидкості завантаження та вивантаження, меншої затримки та покращеного покриття. Більш складні програми UE, такі як онлайн-ігри, потокове відео та хмарні обчислення, також стали можливими завдяки мережам 4G. П'ятого покоління (5G) мереж, які вперше з'явилися у 2010-х роках, є найновішою ітерацією бездротової технології. Мережі 5G використовують сучасну радіотехнологію, включаючи міліметрову хвилю (mmWave) та масивне MIMO, щоб забезпечити швидкість мережі вищу, знижену затримку та більшу місткість для передачі даних, порівняно з мережами 4G. Вони також дозволяють нові застосування, такі як віртуальна та розширена реальність, смарт-міста та автономні автомобілі. Еволюція поколінь мобільного зв'язку разом із їх характеристиками узагальнена в таблиці 1.1 [1].

У цьому огляді представлено детальний аналіз найбільш широко використовуваних конфігурацій антен MIMO, широкосмугових/надширокосмугових антен MIMO, багатодіапазонних/реконфігурованих антен MIMO та антен MIMO з круговою поляризацією. Детальне порівняння характеристик MIMO-антен також представлено для різних широкосмугових, багатосмугових і циркулярно поляризованих антен MIMO. Дослідження висвітлює різні методи проектування ефективних MIMO-антен для систем 5G. Компактність портативних пристроїв та гаджетів, що використовуються у сучасному бездротовому зв'язку, створює значні виклики щодо розміру антен

та зменшення взаємного зв'язку при розташуванні кількох антен у таких сценаріях. Коли декілька антен розташовано поруч, взаємний зв'язок між ними стає критичною проблемою. У дослідженні висвітлені різні техніки ізоляції або роз'єднання, що використовуються в наукових роботах, та їх ефективність у зменшенні взаємного зв'язку між різними портами в MIMO-антенах з обмеженнями та перевагами.

У першу чергу, у аналізі висвітлені різні техніки проектування ширококутових/надширокутових антен та проведений порівняльний аналіз на основі їх характеристик продуктивності, таких як ефективність підсилення, ізоляція та параметри різноманітності MIMO-антен. По-друге, обговорюються підходи до мультидіапазонних/переконфігурованих антен, де можлива переконфігурація за допомогою включення на основі PIN-діода та мультидіапазонність за допомогою аналізу характерних мод, щілин, дефективних земельних структур, часткової земельної площі, або EBG (структури електронного діапазону пропускання) чи інших періодичних структур, таких як FSS (структури вибору частоти). Зрештою, детально обговорюються підходи до проектування MIMO-антен з циркулярною поляризацією для LHCP/RHCP або бідирекціональними або з різноманітним поляризацією.

## 1.2 Ключові особливості технології 5G

У контексті 5G термін «ключові механізми» відноситься до фундаментальних технологій або компонентів, які є важливими для успішного створення та функціонування мереж 5G [2,3,4]. Ці засоби відіграють життєво важливу роль у забезпеченні необхідних можливостей і функцій, які роблять 5G можливим, дозволяючи йому надавати свої відмінні характеристики та переваги.

Таблиця 1.1 – Еволюція поколінь мобільного зв'язку та їх характеристики

Покоління мобільного зв'язку	Діапазон частот	Ширина каналу зв'язку	Модуляційна форма	Методи доступу	Пікова швидкість передачі даних	Спектральна ефективність	Сценарії використання
2G	900 МГц, 1800 МГц	200 КHz	GMSK	TDMA	114 кбіт/с в напрямку вниз (DL) і 20 кбіт/с в напрямку вгору (UL)	-	Послуги голосового та текстового спілкування для мобільних користувачів.
3G	2100 МГц	5 МГц	OFDM	WCDMA	Зі шв. передачі даних у напрямку вниз 21 Мбіт/с і у напрямку вгору 5,7 Мбіт/с, при ширині каналу 20 МГц і технології 4 × 4 MIMO теоретична пікова шв. передачі даних становить 1 Гбіт/с у напрямку вниз і 500 Мбіт/с у напрямку вгору.	<1 біта на секунду на герц (bps/Hz).	Відеоконференції та мережі високої швидкості для передачі даних.
4G	700 МГц, 800 МГц, 900 МГц, 1700/2100 МГц, 1800 МГц, 1900 МГц, 2300 МГц, 2500 МГц, і 2600 МГц	20 МГц	Modulation (QAM) and Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)	OFDMA, SC-FDMA - для передачі вгору	Зі швидкістю передачі даних у напрямку вниз 21 Мбіт/с і у напрямку вгору 5,7 Мбіт/с, при ширині каналу 20 МГц і технології 4 × 4 MIMO теоретична пікова швидкість передачі даних становить 1 Гбіт/с у напрямку вниз і 500 Мбіт/с у напрямку вгору.	2–4 (bps/Hz)	Послуги передачі даних вищої швидкості, нижча затримка та краща якість обслуговування порівняно з мережами 3G, включаючи відеострімінг та онлайн-гри
5G	Нижче 1 ГГц, від 1 до 6 ГГц та понад 6 ГГц, включаючи високочастотні (міліметрові хвилі) частоти	Нижче 6 ГГц - до 100 МГц і мм-хвилі - до 400 МГц.	(QPSK), 16 QAM, 64QAM, 256QAM	OFDMA, SC-FDMA	20 Гбіт/с для передачі вниз (DL) і 10 Гбіт/с для передачі вгору (UL).	До 30 бітів на секунду на герц (bps/Hz).	(eMBB) - Розширений мобільний широкопasmовий зв'язок, (mMTC) - Велика кількість машинного зв'язку, (URLLC) - Наднадійний зв'язок із малою затримкою.

### 1.2.1 Технологія міліметрових хвиль – mmWave

Технологія міліметрових хвиль (mmWave) [5] є ключовою технологією стільникового зв'язку п'ятого покоління (5G). Він використовує радіочастоти в діапазоні NR FR-I (від 410 МГц до 7,125 МГц) і FR-II (від 24 ГГц до 52 ГГц), який охоплює діапазони мм хвиль, як показано на рисунку 1.3.

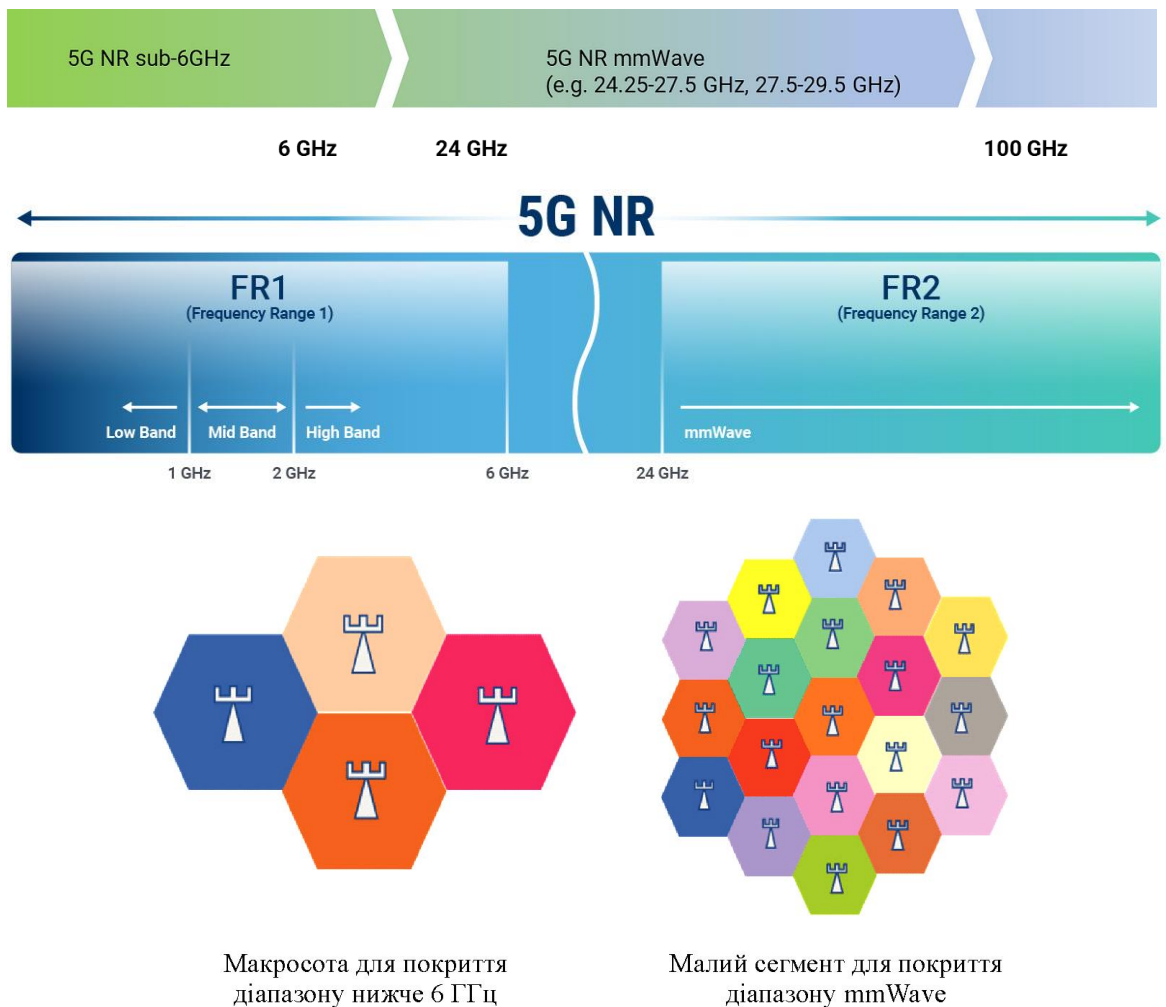


Рисунок 1.3 – Спектр частот 5G NR FR1 та FR2

з вимогами до розміру соти.

Інша проблема полягає в тому, що сигнали mmWave більш чутливі до перешкод від інших бездротових сигналів, а також до метеорологічних умов, таких як дощ і туман. Щоб пом'якшити ці проблеми, мережі 5G, які

використовують технологію mmWave, використовують передові методи обробки сигналів і формування променя для фокусування сигналів у певних напрямках, що покращує якість сигналу та зменшує перешкоди. Незважаючи на ці проблеми, технологія mmWave пропонує значні переваги для мереж 5G, включаючи більш високу швидкість передачі даних, меншу затримку та збільшену пропускну здатність. Ці переваги особливо важливі для додатків, які потребують високої пропускну здатності, таких як VR (віртуальна реальність), AR (доповнена реальність) і потокове відео HD.

### 1.2.2 Множинне введення та виведення з багатомасивними антенами (MIMO/m-MIMO)

Технології m-MIMO є ще однією ключовою технологією для бездротового зв'язку 5G. Вона використовує кілька антен для одночасної передачі та прийому сигналів, що збільшує пропускну здатність та покриття мережі. Технології SISO, SIMO або MISO також використовувалися для передачі та прийому сигналів у традиційній бездротовій системі зв'язку. Однак з технологією Massive MIMO використовуються кілька антенних елементів як на стороні передавача, так і на стороні приймача. На рисунку 1.4 показана антенна решітка MIMO розміром  $16T \times 16R$ , яка дозволяє передавати та приймати кілька сигналів одночасно, що збільшує пропускну здатність та покриття мережі [6].

Технологія Massive MIMO працює за допомогою складних алгоритмів обробки сигналів для розділення різних сигналів, які передаються та приймаються кількома антенами. Це дозволяє телекомунікаційним компаніям або регуляторним органам ефективно використовувати наявний спектр і зменшує перешкоди між різними сигналами. Технологія Massive MIMO підвищує не лише пропускну здатність та покриття, але і покращує якість бездротового сигналу.

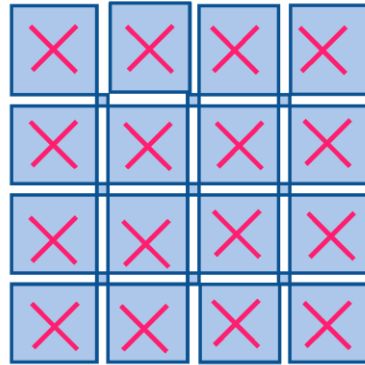


Рисунок 1.4 – Антенна решітка МІМО 16Т × 16R  
(де X позначає трансивер).

### 1.2.3 Малі соти в технології 5G

З розвитком мереж і зростанням потреби в передачі даних впровадження малих сот стало життєдієвим рішенням. Це невеликі, низької потужності точки бездротового доступу, які працюють у ліцензованому діапазоні та управляються операторами, пропонують покращене покриття та пропускну здатність мережі. Вони особливо корисні для вирішення проблем з покриттям, підтримкою якості обслуговування та ефективним використанням ресурсів спектра. Малими сотами вдається вирішити це завдання, надаючи додаткове покриття та пропускну здатність в областях, де великі макросоти не ефективні. Малими сотами можуть бути мікро-, макро-, фемто- або метро-типу. У міських районах мікро- та метро-типу малих сот забезпечують покриття до кількох сотень метрів. Пікосоти надають покриття в межах декількох десятків метрів, як у приміщеннях, так і на вулицях, головним чином у громадських місцях, таких як торгові центри, аеропорти та залізничні станції. Фемтосоти в основному використовуються в житлових районах, охоплюючи діапазон декількох десятків метрів.

Ці малі соти встановлюються на фонарях, стовпах для комунікацій та інших наявних інфраструктурних об'єктах у міських середовищах за допомогою великої кількості точок доступу (APs). Завдяки використанню малих сіток, бездротові мережі 5G можуть забезпечувати покращене покриття

та пропускну здатність в густонаселених міських середовищах, що є важливим для багатьох застосувань, таких як розумні міста, автономні автомобілі та пристрої Інтернету речей (IoT). Існують певні виклики щодо фемтосот і мікросот, такі як управління ресурсами через розкладання на межі зони покриття, статичне та динамічне виділення спектру, а також часті переходи в деяких сценаріях [6,7].

#### 1.2.4 Розділення мережі

Розділення мережі (Network Slicing) – це ще одна функція бездротової мережі 5G, яка дозволяє створювати багато віртуальних мереж в одній фізичній мережі, дозволяючи операторам зв'язку надавати користувачам індивідуальні послуги, як показано на схемі на рис. 1.5. У традиційній бездротовій мережі всі користувачі діляться однаковими ресурсами мережі, що може обмежувати можливості мережі забезпечувати різноманітні послуги з різними вимогами до пропускну здатності, затримки та надійності. Мережевий сегмент (Network Slice) - це відокремлена і ізольована частина мережі, спроектована для самостійного та безпечного функціонування. Він створюється шляхом логічного розділення ресурсів для задоволення конкретних потреб користувачів, з урахуванням якості обслуговування (QoS), наданої сегментом. Концепція розділення мережі (Network Slicing) дозволяє ефективно розподіляти ресурси мережі, що призводить до оптимізації витрат і можливості відповідати різноманітним вимогам. В основному, розділення мережі дозволяє налаштовувати та налагоджувати можливості мережі для найкращого відповідання індивідуальним потребам різних користувачів чи додатків. Розділення мережі дозволяє операторам створювати віртуальні мережі з унікальними ресурсами та характеристиками для підтримки різноманітних послуг та додатків. Кожен мережевий сегмент налаштовується для задоволення конкретних потреб певного закладу чи додатка, таких як низька затримка для автономних автомобілів або висока пропускну здатність

для потокової передачі відео. Розділення мережі є ключовою функцією для багатьох сценаріїв використання 5G, таких як розумні міста, промислова автоматизація та охорона здоров'я. Воно дозволяє операторам надавати індивідуальні можливості різним користувачам та додаткам, а також дозволяє мережі підтримувати широкий спектр послуг з різними вимогами до пропускної здатності, затримки та надійності [8].

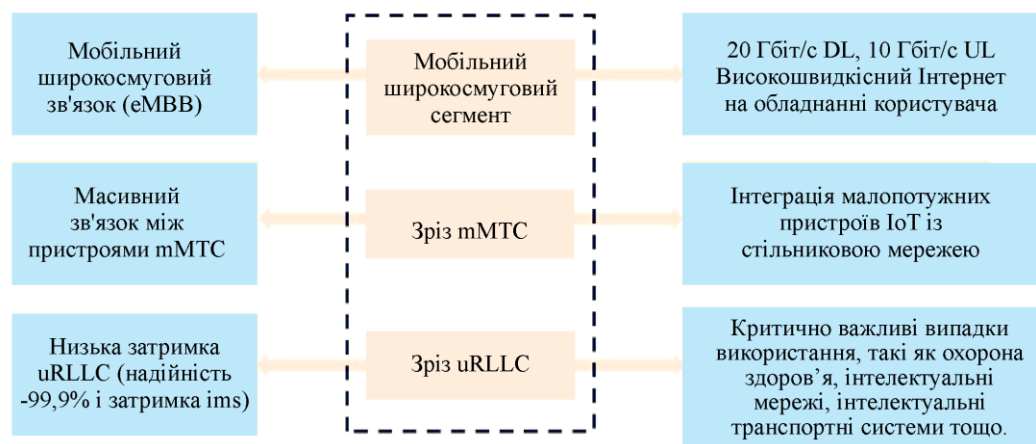


Рисунок 1.5 – Функція розділення мережі (Network Slicing) 5G для різних варіантів використання

### 1.2.5 Хмарні обчислення в контексті мережі 5G

Мережі 5G та бездротові мережі наступного покоління (B5G) використовують хмарні обчислення, що має ще одну перевагу для бездротового зв'язку. Це означає надання обчислювальних послуг через хмару, включаючи сервери, зберігання, додатки та інші ресурси, які можуть бути віддалено доступні користувачам та пристроям. У мережі 5G хмарні обчислення надають безліч послуг та додатків для користувачів та пристроїв, включаючи обчислення на краю мережі, штучний інтелект та додатки для Інтернету речей (IoT). Хмарні обчислення дозволяють надавати ці послуги та додатки масштабовано, ефективно та витратно-ефективно, що є важливим для підтримки великого обсягу даних та високих вимог до продуктивності в

бездротових мережах 5G. Хмарні обчислення також дозволяють виконувати алгоритми штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) на великих обсягах даних масштабовано та витратно-ефективно. Машинне навчання надає безліч переваг, таких як здатність аналізувати великі обсяги даних та виявляти закономірності і тенденції [9]. Ця здатність дозволяє точно передбачати майбутні події. Ще однією перевагою є те, що алгоритми машинного навчання можуть самостійно приймати рішення та розвиватися з часом, постійно покращуючи свою продуктивність без участі людини. Більше того, ці алгоритми відмінно впораються з обробкою складних та багатовимірних даних, навіть в невизначених та динамічних середовищах, схожих на ті, що зустрічаються в сценаріях 5G/6G. Крім того, алгоритми машинного навчання проявляють прискорені темпи навчання, особливо при розв'язанні завдань великого масштабу. Це важливо для багатьох застосувань 5G, таких як автономні автомобілі та промислова автоматизація, які вимагають прийняття рішень в реальному часі та аналіз великої кількості даних.

#### 1.2.6 Консолідація носіїв та бімформінг

Об'єднання носіїв передбачає поєднання декількох смуг частот для створення ширших смуг частот, що може забезпечити вищі швидкості передачі даних і кращу продуктивність [10]. Це дозволяє операторам більш ефективно використовувати доступний спектр і надавати вищу якість обслуговування користувачам.

Бімформінг – це технологія в радіозв'язку, в якій антени налаштовуються таким чином, щоб створювати напрямлену діаграму спрямованості сигналу, яка зосереджує енергію в певному напрямку. Це дозволяє покращити якість зв'язку в обраному напрямку та зменшити спотворення і перешкоди в інших напрямках. Технологія бімформінгу широко використовується в системах масивного введення-виведення (MIMO) і в мережах 5G для підвищення швидкості передачі даних та продуктивності зв'язку. Бімформінг передбачає

напрямлених передачу та прийом сигналів між базовою станцією та користувацьким обладнанням. Він використовує кілька антен для створення вузьких променів, які можуть бути спрямовані на конкретних користувачів або пристрої, замість того, щоб розсилувати сигнали у всіх напрямках, як показано на рисунку 1.6. Це дозволяє операторам забезпечувати вищі швидкості передачі даних, краще покриття та більш ефективне використання доступного спектру. Бімформінг є критичною технологією для міліметрових хвильових (mmWave) частот, які використовуються в деяких мережах 5G для забезпечення дуже високих швидкостей передачі даних. Частоти mmWave мають великі втрати при поширенні, що означає, що їх легко поглинають об'єкти на шляху сигналу, такі як будівлі та дерева. Бімформінг дозволяє операторам подолати ці втрати при поширенні, спрямовуючи сигнал на конкретних користувачів або пристрої, замість того, щоб розсилувати його у всіх напрямках.

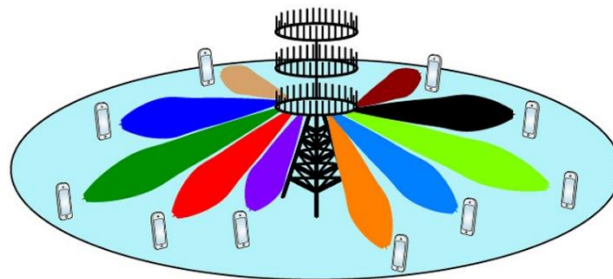


Рисунок 1.6 – Вузький бімформінг на вузлі gNodeB в мобільній комунікації 5G з використанням масивного MIMO

### 1.3 Архітектура мережі радіодоступу

Мережа радіодоступу (RAN – Radio Access Network) розвивалася з початку комерційних бездротових мереж (аналоговий стільниковий зв'язок 1-го покоління). У ранніх поколіннях антена була єдиним компонентом, встановленим на вершині вежі. Усі інші функції RAN, включаючи радіо та обробку основної смуги, виконувалися в обладнанні, яке називається базовою

приймально-передавальною станцією (BTS – Base Transceiver Station), яке зазвичай встановлюється в укритті на землі. Радіосигнал від антени був підключений до BTS через довгі коаксіальні кабелі, що призвело до значної втрати радіочастотного сигналу, особливо на високих частотах.

На поточному етапі бездротових мереж (від 2G до 4G) функції радіо та основної смуги розділені. У розгортанні макростільника кластер антен, що утворюють три або більше секторів, використовуються для створення повного покриття на 360 градусів. Кожен сектор оснащено спрямованою антеною з високим коефіцієнтом посилення та віддаленою радіоголовкою (RRH – Remote Radio Head), яка обслуговує радіочастотне коло, аналого-цифрові перетворювачі (ADC – Analog-to-Digital converters), цифро-аналогові перетворювачі (DAC – Digital-to-Analog converters) і перетворювачі підвищення/пониження. RRH зазвичай встановлюються на вежі, підключеної до антени (антен) за допомогою коротких радіочастотних кабелів. Починаючи з 4G, RRH зазвичай має конфігурації MIMO з  $2 \times 2$ ,  $4 \times 4$ ,  $8 \times 8$  або навіть більшою кількістю антен для Massive MIMO. Модуль базової смуги (BBU – Baseband Unit) керує обробкою базової смуги та інтерфейсом зворотного зв'язку. Один BBU, зазвичай встановлений на землі, підключається до кількох RRH залежно від кількості секторів, які підтримує базова станція. Інтерфейс протоколу, що з'єднує RRH і BBU, відомий як Загальний громадський радіоінтерфейс або CPRI. Об'єднана інфраструктура (антени, RRH і BBU) називається eNodeB у 4G (Evolved NodeB).

У випадку базових станцій малого радіусу дії (малі стільники) типи антен можуть варіюватися від всеспрямованих антен із низьким коефіцієнтом підсилення до спрямованих антен з патчем із більшим коефіцієнтом посилення для одного сектора. У випадку патч-антен функції RRH і BBU об'єднані в один блок.

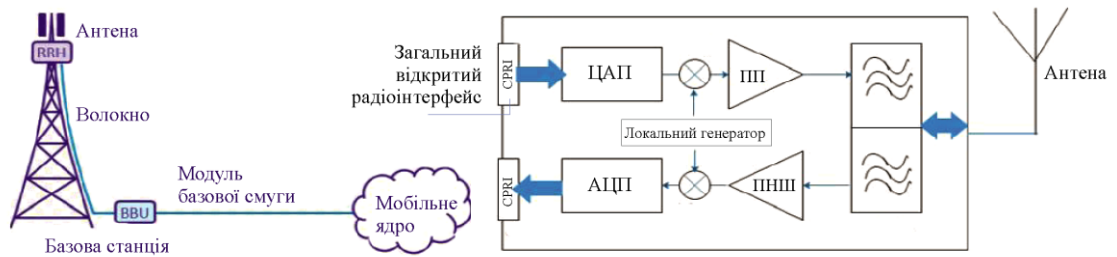


Рисунок 1.7 – Мережа радіодоступу нижче 6 ГГц

### 1.3.1 Архітектура мережі радіодоступу для 5G

Мережі радіодоступу значно еволюціонували з часів свого початку, до того рівня, коли сучасні мережі радіодоступу підтримують антени з множинним входом та виходом (MIMO), широкосмуговість спектру, агрегацію несучих на декількох діапазонах, з численними вдосконаленнями для 5G та майбутніх поколінь. Сучасні архітектури мереж радіодоступу (RAN) відокремлюють площину користувача від площини керування у різних елементах мережі. Ця відокремленість площини керування та площини даних є ключовим аспектом гнучкої RAN 5G, оскільки вона відповідає методам мережі, орієнтованої на програмне забезпечення (SDN – Software Defined Network) та віртуалізації функцій мережі (NFV – Network Function Virtualization), таким як кола обслуговування. На рисунку 1.8 наведено огляд різних можливих варіантів розділення мережі радіодоступу (RAN) для gNodeB [11], включаючи розділення на розподілений блок (DU – distributed unit) та центральний блок (CU – centralized Unit). Для CU також можливе розподілення на площину користувача (CU-UP) та площину керування (CU-CP), де інтерфейс E1 з'єднує обидві частини.

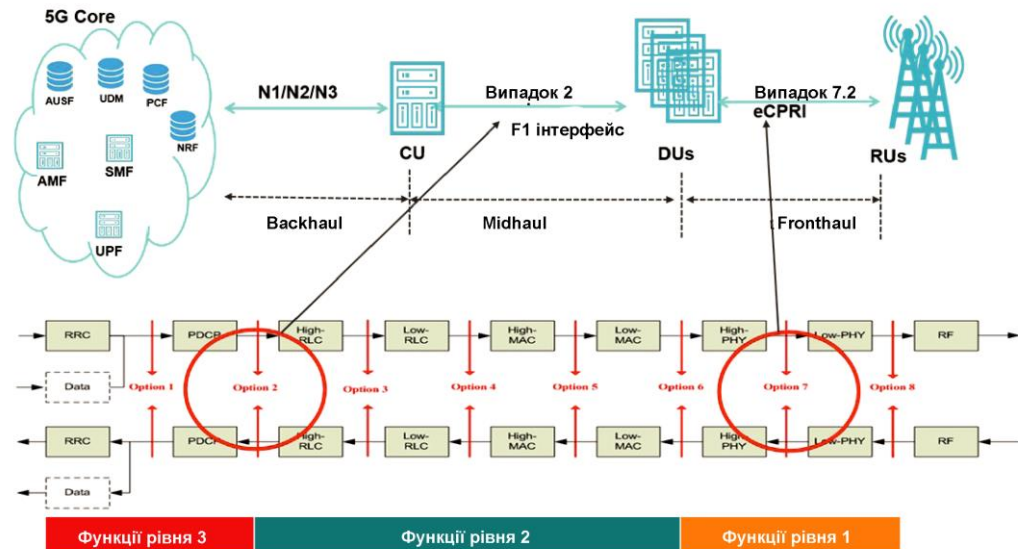


Рисунок 1.8 – Варіанти розділення RAN та елементи мережі RAN

Варіант 1 – (Розділення RRC/PDCP 1A-подібне), розподілена архітектура, схожа на «все в одному» низький рівень.

Варіант 2 – (Розділення PDCP/RLC 3C-подібне).

Варіант 3 – (Високий рівень RLC/Низький рівень RLC, внутрішнє розділення RLC).

Варіант 4 – (Розділення RLC-MAC).

Варіант 5 – (Внутрішнє розділення MAC).

Варіант 6 – (Розділення MAC-PHY).

Варіант 7 – (Внутрішнє розділення PHY).

Варіант 8 – (Розділення PHY-RF), схоже на інтерфейс CPRI, як визначено в 4G.

Ця декомпозиція та ізоляція функцій разом із чітко визначеними інтерфейсами між ними дозволяє операторам відділяти програмне забезпечення від апаратного забезпечення. Вибір того, як розділити функції нового радіо (NR) в архітектурі, залежить від факторів, пов'язаних із сценаріями розгортання радіомережі, обмеженнями та запланованими підтримуваними службами.

Передній роз'єм нижнього рівня з'єднує радіоблок (RU) з DU та характеризується:

- низька затримка порядку 100 мс;
- можливість DU обслуговувати декілька RU;
- RU-DU відстань, яка може бути 20 км або більше;
- вимоги до пропускної здатності залежать від смуги пропускання, конфігурації MIMO та точки розділення між DU та RU.

Коли eCPRI впроваджується в передній мережі 5G, він розбивається на кілька шляхів, де бімформування досягається за допомогою контролю фази кожного шляху. Це дозволяє налаштувати один промінь для кожного шляху передачі даних, тому в теорії може бути обслужений лише один користувач за один раз.

Розширений інтерфейс загального відкритого радіо (eCPRI) – це стандартизований інтерфейс, який використовується в передній мережі 5G для підключення центральної одиниці (CU) та розподіленої одиниці (DU) базової станції 5G. eCPRI відіграє важливу роль у забезпеченні ефективної передачі високошвидкісних даних між цими мережевими елементами.

Хоча eCPRI дозволяє розбивати передній шлях на кілька шляхів і забезпечує бімформування за допомогою контролю фази кожного шляху, це не обов'язково обмежує систему обслуговування лише одного користувача в один момент часу. Бімформування, яке є технікою для фокусування радіосигналів у певному напрямку, використовується для покращення ефективності та надійності бездротового зв'язку.

У типовій мережі 5G бімформування може використовуватися для обслуговування декількох користувачів одночасно, спрямовуючи промені на різних користувачів або пристрої. Змінюючи динамічно фази сигналів на кожному шляху, базова станція може створювати та направляти декілька променів, дозволяючи одночасно передавати та отримувати дані від різних користувачів в межах одного зони покриття.

Отже, eCPRI і бімформування, коли вони використовуються у поєднанні, сприяють загальній ємності, продуктивності та гнучкості мереж 5G, дозволяючи їм обслуговувати декількох користувачів одночасно з високими швидкостями передачі даних і низькою затримкою.

Аналогове бімформування є найпростішою архітектурою, але обмежене за продуктивністю через відсутність підтримки багатьох променів та MIMO. Гібридне бімформування пропонує компроміс. Це архітектура бімформування з набагато меншою кількістю цифрових радіопередавачів, ніж загальна кількість антенних елементів. Гібридне бімформування фактично поєднує цифрове попереднє кодування і аналогове бімформування для створення кількох променів одночасно в просторі, тобто можливість обслуговувати більше одного користувача в одному часовому інтервалі та підтримку MIMO для одного користувача.

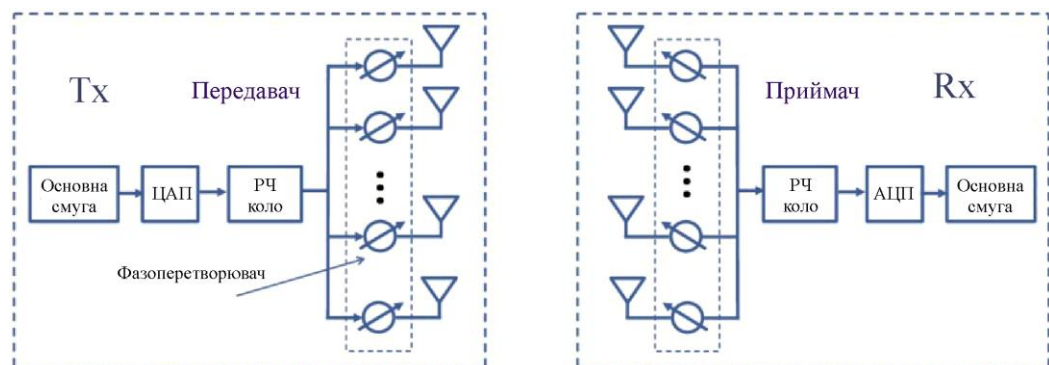


Рисунок 1.9 – Діаграма аналогового формування променя

Проста схема гібридної архітектури формування променя показана на рисунку 1.10. Радіочастотне коло пов'язане з підмножиною антенних елементів і представляє кількість конфігурацій портів антени. Наприклад, система 2x2 підтримує два радіочастотні кола, а система 4x4 пов'язана з 4 радіочастотними колами. Зменшена кількість радіочастотних кіл, включаючи ЦАП, значно зменшує споживання енергії, забезпечуючи достатню кількість променів у різних напрямках до одного користувача для підтримки MIMO.

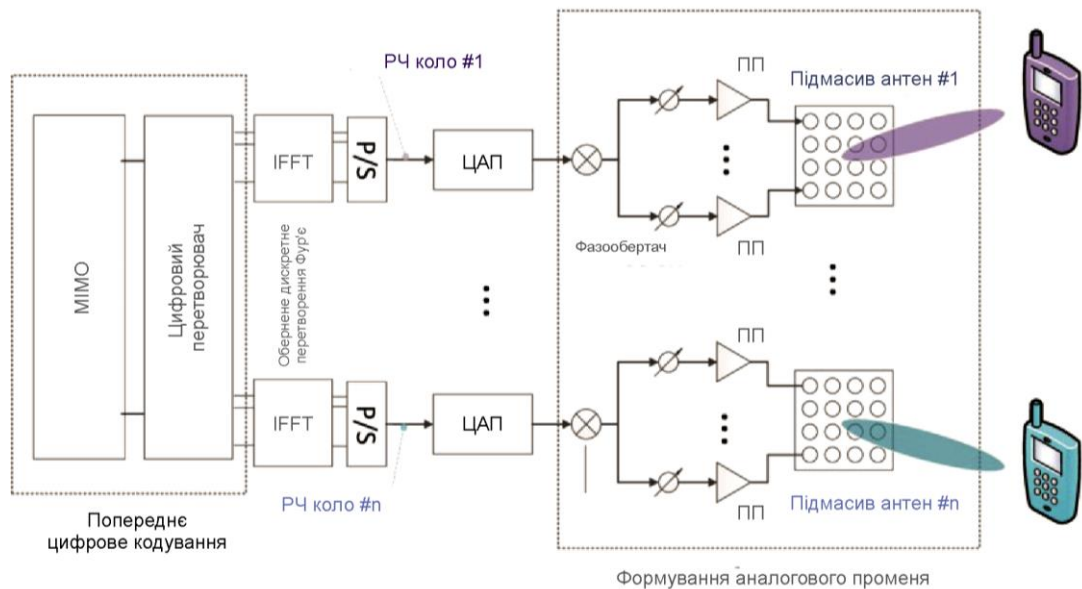


Рисунок 1.10 – Гібридна структура формування променя

## 1.4 Антени для мережі 5G

### 1.4.1 Базові станції макростільника

Антенa є безцінним сегментом будь-якої бездротової мережі. 5G Americas опублікувала кілька технічних документів про еволюцію антен для систем 4G і 5G [12]. Ранні системи 2G і 3G працювали з двома приймальними антенами, розташованими принаймні на лямбда-відстань, щоб оптимізувати продуктивність рознесеного прийому висхідної лінії зв'язку.

4G LTE представив концепцію множинного входу, множинного виходу (MIMO) і передачі з формуванням променя для підвищення спектральної ефективності та пропускної здатності. У своїй основній формі антенa для системи 2x2 MIMO схожа на антени, які використовуються в системах 2G. MIMO вищого порядку (4x4) або формування променя (8x8) вимагає більше антен. У системі 4x4 MIMO 4 антенні порти складаються з 2 перехресно поляризованих антенних колонок, розташованих принаймні на 1  $\lambda$ . У системі 8x8 MIMO/формування променя 8 антенних портів складаються з 4 перехресно поляризованих антенних колонок з відстанню 0,5 або 0,65  $\lambda$ . В

обох випадках кожен порт антени представлений одним стовпцем на поляризацію, що складається з 10-12 елементів. Усі антенні системи, розглянуті досі, називаються пасивними антенами, де антена та радіомодулі є окремими блоками, з'єднаними між собою коротким чи довгим коаксіальним кабелем. На рис. 1.11 наведено різні покоління антенних систем макробазових станцій для діапазону нижче 6 ГГц [13].

Активні антенні системи, в яких інтегровані антена та радіомодулі, є новою тенденцією для архітектури базових станцій у діапазоні 6 ГГц. Його вже використовують кілька операторів по всьому світу. Активні антенні системи зазвичай мають набагато більшу кількість антенних портів (32 або 64) і називаються масовими MIMO. У таких системах однокористувацька та багатокористувацька MIMO використовуються для подальшого використання покращеної спектральної ефективності.



Рисунок 1.11 – Еволюція архітектури базової станції

Антенний модуль, який використовується в масивних системах MIMO, є фазованою антенною решіткою, яка також є дуже привабливим вибором для mmWave. Мала довжина хвилі на частотах mmWave означає, що елементи антени будуть близько розташовані, що призводить до використання великої кількості елементів у розумному розмірі. У mmWave кількість елементів антени на базовій станції може варіюватися від 64 до понад 1000. Рішення для розширення покриття є важливими в mmWave. Велика кількість антенних

елементів забезпечить ширше покриття від однієї радіостанції та антени через формування променя/керування.

На рисунку 1.12 показана типова антена, що складається з рядків і стовпців окремих подвійних поляризованих антенних елементів, кожен з яких підключений до радіоланцюгів. У діапазоні нижче 6 ГГц кілька елементів антени з'єднані між собою, щоб утворити підматрицю, з'єднану з радіоколами.

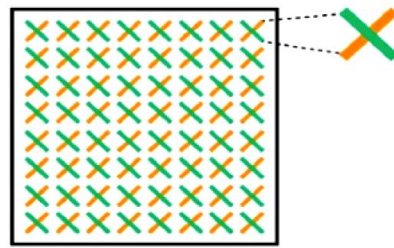


Рисунок 1.12 – Типова фазована антенна решітка (8x8)

Спрямованість – це вимірювання того, наскільки сконцентровано підсилення антени в заданому напрямку відносно ізотропного випромінювача. Вона слідує відношенню  $10 \cdot \log(N)$ , де  $N$  – кількість елементів у масиві. Проте коефіцієнт підсилення враховує спрямованість, а також втрати через опір та сканування [14]. Загалом, коефіцієнт підсилення масиву дорівнює  $10 \log(N)$ , плюс вбудований коефіцієнт підсилення елемента ( $G_e$ ), мінус втрати через опір та сканування.

$$K = 10 \cdot \log(N) + G_e - L_{\text{втрати } R} - L_{\text{скан}}, \quad (1.1)$$

де  $G_e$  – це вбудований коефіцієнт підсилення елемента, який представляє собою коефіцієнт підсилення окремого випромінювача, вбудованого в масив. Якщо радіоелементи розташовані на відстані  $\lambda/2$  один від одного як в азимутному, так і в зенітному напрямках, то площа кожного елемента становить  $\lambda^2/4$ . Оскільки коефіцієнт підсилення антени дорівнює  $4\pi/\lambda^2 \cdot A_e$ , де  $A_e$  – ефективна площа антени, то  $G_e$  дорівнює  $\pi$  або 5 dBi.

### 1.4.2 Антени для смартфонів

Невеликий фізичний розмір антен на хвильових частотах робить використання масивів, інтегрованих у мікросхеми, які часто містять 4-8 елементів, цілком можливим варіантом. Ці антени мають високий коефіцієнт підсилення та підтримують кілька променів, таким чином вирішуючи цілі дизайну щодо забезпечення високоякісного каналу передачі даних у всіх напрямках навколо телефону. Досягнення високої ефективності ізотропно випромінювання потужності для користувацького обладнання (EIRP UE) з прийнятним енергоспоживанням вимагає високого коефіцієнта підсилення антени та здатності спрямовувати промінь у бажаному напрямку для підтримки зв'язку [15]:

- фізика диктує розмір антени та відстань;
- кількість антенних елементів у решітці визначає підсилення та EIRP;
- формування променя забезпечує більший підсилення антени.

Щоб досягти цього, групу з 4-8 антенних елементів розташовують у вигляді решітки та розподіляють по фазі, щоб сконцентрувати випромінювання у відносно вузькому промені ( $K = 10 \cdot \log(N) + G_e$ , де  $N$  – кількість елементів, а  $G_e$  – коефіцієнт посилення елемента). Це виграш застосовується як для висхідної, так і для низхідної лінії зв'язку. На рис. 1.13 показана типова схема для таких антен.

Існують проблеми, пов'язані з інтеграцією антени в пристрій за кришкою, яка на хвильових частотах має значний вплив на характеристики випромінювання антени. Антени можна ефективно інтегрувати за пластикові або скляні кришки, сконструювавши геометрію кришки, щоб вона діяла локально як лінза або навіть за металевими кришками, включивши електромагнітні вікна, можливо, на основі принципів дизайну частотно-селективних поверхонь (FSS – Frequency Selective Surfaces). Інший варіант, який

став можливим завдяки малому фізичному розміру антен на хвильових частотах, це інтеграція слотових конструкцій у металевий обідок телефону [16].

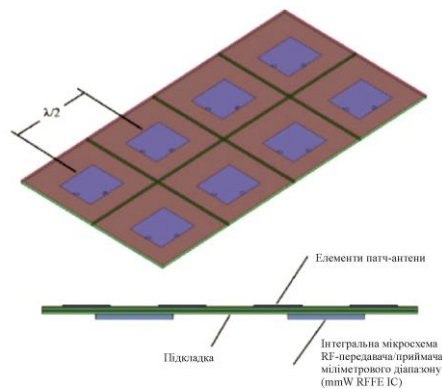


Рисунок 1.13 – Типова конструкція антени для смартфона mmWave

### 1.5 Висновок до першого розділу

У даному розділі розглянуто еволюцію мобільного зв'язку, що привела до народження 5G технологій, які стали найновішим етапом у розвитку бездротового зв'язку. Описано сутність антен MIMO в 5G і майбутніх поколіннях бездротового зв'язку, які відіграють важливу роль у забезпеченні високої пропускної спроможності, якості зв'язку та покриття. Також були проаналізовані важливі релізи 3GPP, які визначили параметри та характеристики мереж 5G.

Ключова технологія 5G, яку розглянто, виявилася вражаючою у порівнянні зі звичайним бездротовим зв'язком попередніх поколінь. 5G привносить багато новаторських можливостей, таких як величезна швидкість передачі даних, низька затримка та підвищена ємність мережі. Ці можливості дозволяють реалізувати нові сценарії використання, такі як розумні міста, автономні автомобілі та безліч пристроїв Інтернету речей. У нас також є можливість використовувати віртуалізацію, розподілене обчислення, машинне навчання та інші передові технології для підтримки вимог мережі 5G. Разом ці характеристики роблять 5G надзвичайно важливою і обіцяючою технологією для майбутнього бездротового зв'язку.

## 2 МАТЕМАТИЧНІ ПАРАМЕТРИ МІМО У НАУКОВОМУ ДОСЛІДЖЕННІ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G

Параметри різноманітності МІМО, включаючи коефіцієнт кореляції обвідної (ECC), загальний активний коефіцієнт відбиття (TARC), пропускну здатність каналу, середній ефективний приріст (MEG) та спектральну ефективність, відіграють важливу роль у продуктивності та ефективності антен МІМО. Ці параметри разом сприяють продуктивності, надійності та ефективності антен МІМО. Оптимізуючи ці параметри, системи МІМО можуть досягти вищих швидкостей передачі даних, покращеної якості сигналу, підвищеної ємності системи та кращого використання доступних бездротових ресурсів, що врешті-решт дозволяє реалізувати передові бездротові комунікаційні застосування.

### 2.1 Коефіцієнт кореляції обвідної

В системах МІМО, оцінка взаємозв'язку між випромінювальними елементами має велике значення, і коефіцієнт кореляції обвідної (ECC) є ключовим параметром для досягнення цієї мети. ECC відрізняється від інших параметрів ізоляції тим, що враховує коефіцієнт відбиття всіх портів і взаємодію між різними портами для комплексної характеристики взаємного зв'язку антени.

Міжнародний телекомунікаційний союз (ITU – International Telecommunication Union) рекомендує, щоб значення ECC було менше або рівним 0,5 для мобільних комунікаційних систем. Кращий показник продуктивності в системах МІМО вказує на низьке значення ECC, що означає зменшення зв'язку між випромінюючими елементами. Навпаки, вище значення ECC може мати негативний вплив. ECC для вищої ефективності випромінювання більше 90% може бути отримано безпосередньо з параметра S і подається наступним чином [17,18]:

$$|\rho_{ECC}(k, l, P)| = \frac{\sum_{m=1}^P S_{k,m}^* S_{m,s}}{\sqrt{\prod_{s(=k,l)} \left\{ \sum_{m=1}^P S_{k,m}^* S_{m,s} \right\}}}, \quad (2.1)$$

де  $k =$  від 1 до  $m$ ;  $l =$  від 1 до  $m$ ;  $m = m$ -й порт;  $s = s$ -й порт і  $P =$  кількість антен.

Для розрахунку ECC для антени з ефективністю випромінювання нижче 90% використовуються параметри дальнього поля випромінюючої антени [19].

$$\rho_{ECC} = \frac{\iint [(\bar{F}_1(\theta, \phi)) \cdot (\bar{F}_2(\theta, \phi))]^2 d\Omega}{\iint (\bar{F}_1(\theta, \phi))^2 d\Omega \iint (\bar{F}_2(\theta, \phi))^2 d\Omega}. \quad (2.2)$$

## 2.2 Загальний коефіцієнт активного відбиття

Загальний активний коефіцієнт відбиття (TARC) – це параметр, який використовується для оцінки ефективності антенної системи, особливо в конфігураціях MIMO (багатоканальний вхід, багатоканальний вихід). Він кількісно визначає обсяг радіочастотної (RF) потужності, яка відбивається назад до передавача від антенної системи.

Низьке значення TARC свідчить про те, що антенна система ефективно випромінює більшу частину отримуваної RF потужності, тоді як високе значення TARC вказує на те, що значна частина потужності відбивається назад. Ефективні антени мають на меті досягнути низького значення TARC, щоб забезпечити те, що більша частина переданої потужності випромінюється назовні, що сприяє поліпшенню якості сигналу та покращенню продуктивності системи.

У системах MIMO TARC відіграє роль у визначенні того, наскільки ефективно елементи антени випромінюють потужність і мінімізують відбиття,

що може впливати на силу і якість сигналу. Оптимізація TARC є важливою для досягнення надійного бездротового зв'язку з високими швидкостями передачі даних і мінімальними перешкодами.

TARC – це параметр антени MIMO, який використовується для перевірки розсіювальних параметрів (S-параметрів) щодо їхньої різноманітності. TARC використовує як випадкові сигнали, так і фазові кути для діагональних і сусідніх портів антени для визначення поведінки S-параметрів, таких як  $S_{11}$ ,  $S_{12}$  і  $S_{13}$ , для конкретних комбінацій фаз між портами. TARC обчислюється за допомогою інцидентного вектора  $ai$  та відображеного вектора  $bi$ , які є незалежними та однаково розподіленими гауссівськими випадковими величинами. TARC може бути розрахований за допомогою [20,21]:

$$\Gamma_x^t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^P |y_i|^2}{\sum_{i=1}^P |x_i|^2}}. \quad (2.3)$$

де  $x_i$  – сигнал падаючого сигналу на  $i$ -му порту,  $y_i$  – відбитий сигнал на  $i$ -му порту, а  $P$  – загальна кількість портів. Для  $p$ -порту матриця розсіювання задана [22]:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & S_{2n} \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_p \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Розв'язавши надану матрицю розсіювання для параметра розсіювання/відображення, TARC можна отримати наступним чином [23]:

$$\Gamma_x^t = \frac{\sqrt{\left| (s_{ii} + s_{ij} \cdot e^{j\theta}) \right|^2 + \left| (s_{ji} + s_{jj} \cdot e^{j\theta}) \right|^2}}{\sqrt{P}}, \quad (2.5)$$

де  $\theta$  — це фазовий кут між діагональними та прилеглими портами в конфігурації MIMO. Значення  $\theta$  варіюються для різних портів, щоб побачити фактичний вплив на порти.

### 2.3 Пропускна здатність каналу в системах MIMO

У порівнянні з антенними системами SISO, антени MIMO виявляють вищу пропускну здатність, яка є важливим параметром продуктивності, як показано в [24,25]. Блок схема передавача/приймача ( $T_x/R_x$ ) MIMO з каналом MIMO наведена на рисунку 2.1.

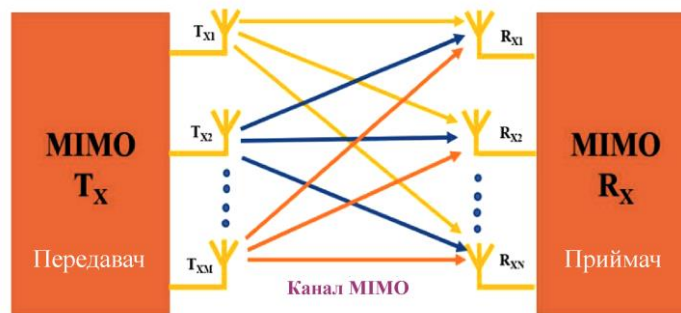


Рисунок 2.1 – Передавач, приймач і канал MIMO

Згідно з теоремою ємності Шеннона, ємність для системи SISO визначається так:

$$C = B_t \log_2(1 + SNR), \quad (2.6)$$

де  $B_t$  – доступна загальна ширина смуги, а  $C$  – ємність каналу Шеннона. Матриця каналу "H" в системі MIMO виражена на основі кількості антен передавача та приймача, позначених як " $m_t$ " і " $m_r$ " відповідно [26].

$$H = m_t \cdot m_r, \quad (2.7)$$

Допустимо, що  $E_s$  – середній символний енергетичний показник. Сигнал, отриманий на приймачі, задається наступним чином [26]:

$$y(t) = \sqrt{\frac{E_s}{m_t}} H_s(t) + n(t), \quad (2.8)$$

де  $y(t)$  – отриманий вектор сигналу розмірністю  $m_r \cdot 1$ ,  $s(t)$  – вектор сигналу передавача розмірністю  $m_t \cdot 1$ ,  $n(t)$  – просторово-часовий білий шум з нульовим середнім значенням та дисперсією  $N_0$ . Середню потужність в термінах матриці коваріації  $s(k)$  можна записати як:  $R_{ss} = ss^H$  (без індексу часу).

Випадок 1: Нехай бездротовий канал є визначеним і відомим приймачу, тоді пропускна здатність системи МІМО визначається як [26]:

$$C = B \log_2 \text{Det} \left( I_{m_r} + \frac{E_s}{m_t N_0} H R_{ss} H^H \right) \text{ біт/с}, \quad (2.9)$$

де  $E_s$  – середній символний енергетичний показник,  $N_0$  – спектральна щільність шуму Гауссівського білого шуму,  $I_{m_r}$  – одинична матриця розмірності  $m_r \cdot m_r$ , а  $\frac{E_s}{m_t N_0}$  – співвідношення сигнал-шум (SNR).

Випадок 2: якщо для передавача канал невідомий, то вектор  $s$  може бути обраний як  $R_{ss} = I_{m_t}$ , де  $I_{m_t}$  – це одинична матриця, то тоді ємність системи МІМО дорівнює [26]:

$$C = B \sum_{i=1}^r \log_2 \left( 1 + \frac{E_s}{m_t N_0} \lambda_i \right) \text{ біт/с}, \quad (2.10)$$

де матриця каналу має ранг  $r$ , і ємність – це сума ' $r$ ' SISO каналів з коефіцієнтом потужності  $\lambda_i$ , де  $i = 1, 2, \dots, r$ . Припустимо, що  $m_t = m_r = m$ , тоді ранг  $r = m$ , і в цьому випадку максимальна ємність досягається, коли матриця каналу  $H$  є ортогональною матрицею, тобто  $H^H H = H H^H$  [26]:

$$C = BM \log_2 \left( 1 + \frac{E_s}{N_0} \right) \text{ біт/с}. \quad (2.11)$$

## 2.4 Середнє ефективне підсилення в системах MIMO

Середнє ефективне підсилення (MEG) вказує на комбіноване підсилення всіх елементів у системі MIMO і зазвичай виражається у децибелах (дБ). Середнє ефективне підсилення є показником ефективного підсилення антени в бездротовій комунікаційній мережі з багатьма вхідними та вихідними сигналами. MEG враховує ефективність антени, потужнісні характеристики антен та просторову кореляцію між багатьма антенами, що використовуються в системі MIMO [27].

$$MEG = \iint_{\substack{\phi=0, \theta=0 \\ \phi=2\pi, \theta=\pi}} \left[ \frac{XPR}{1+XPR} G_\phi(\theta, \phi) P_\phi(\theta, \phi) + \frac{1}{1+XPR} G_\theta(\theta, \phi) P_\theta(\theta, \phi) \right] d\Omega. \quad (2.12)$$

де  $d\Omega(\text{solid angle}) = \sin \theta d\theta d\phi$ ,  $XPR$  – співвідношення потужностей між крос-поляризацією,  $G_\phi(\theta, \phi), G_\theta(\theta, \phi)$  – коефіцієнт підсилення потужності антен, а  $P_\phi(\theta, \phi), P_\theta(\theta, \phi)$  є функціями кутової щільності для надходження радіохвиль.

Формула (2.12) враховує фазовий кут  $\theta$  між діагональними та сусідніми портами в конфігурації MIMO. Значення  $\theta$  можуть різнитися для різних портів, щоб врахувати реальний вплив на порти.

Вищезазначене рівняння потребує тривимірного радіаційного креслення обладнання користувача, але обчислення MEG з використанням 3D радіаційного креслення складне. Тому використання 2D радіаційного креслення для обчислення MEG є прийнятним і подається в наступному рівнянні [27]:

$$MEG = \int_0^{2\pi} \left[ \frac{XPR}{1+XPR} G_{\theta} \left( \frac{\pi}{2}, \phi \right) P_{\theta} \left( \frac{\pi}{2}, \phi \right) + \frac{1}{1+XPR} G_{\phi} \left( \frac{\pi}{2}, \phi \right) P_{\phi} \left( \frac{\pi}{2}, \phi \right) \right] d\phi. \quad (2.13)$$

Формула (2.13) представляє спрощений підхід для обчислення MEG за допомогою 2D радіаційного креслення, оскільки використання 3D радіаційного креслення може бути складним. Цей спрощений метод забезпечує прийнятні результати без значних обчислювальних зусиль.

Інші рівняння для MEG з використанням S-параметра можуть бути наступними [28,29]:

$$MEG_{ith\ port} = 0.5 \left\{ 1 - \sum_{j=1}^N |S_{ij}|^2 \right\}, \quad (2.14)$$

де  $N$  – номер антени,  $j = j$  th порт.

$$MEG = \iint_{\phi=0, \theta=0}^{\phi=2\pi, \theta=\pi} \left[ \frac{XPR}{1+XPR} G_{\phi}(\theta, \phi) P_{\phi}(\theta, \phi) + \frac{1}{1+XPR} G_{\theta}(\theta, \phi) P_{\theta}(\theta, \phi) \right] d\Omega. \quad (2.12)$$

де  $d\Omega$  (solid angle) =  $\sin \theta d\theta d\phi$ ,  $XPR$  – співвідношення потужностей між крос-поляризацією,  $G_{\theta}(\theta, \phi)$ ,  $G_{\phi}(\theta, \phi)$  – коефіцієнт підсилення потужності антен, а  $P_{\theta}(\theta, \phi)$ ,  $P_{\phi}(\theta, \phi)$  є функціями кутової щільності для надходження радіохвиль.

Вищезазначене рівняння потребує тривимірного радіаційного креслення обладнання користувача, але обчислення MEG з використанням 3D радіаційного креслення складне. Тому використання 2D радіаційного креслення для обчислення MEG є прийнятним і подається в наступному рівнянні [28]:

$$MEG = \int_0^{2\pi} \left[ \frac{XPR}{1+XPR} G_{\theta} \left( \frac{\pi}{2}, \phi \right) P_{\theta} \left( \frac{\pi}{2}, \phi \right) + \frac{1}{1+XPR} G_{\phi} \left( \frac{\pi}{2}, \phi \right) P_{\phi} \left( \frac{\pi}{2}, \phi \right) \right] d\phi. \quad (2.13)$$

Інші формули для обчислення MEG з використанням S-параметра наведені у формулі (2.14):

$$MEG_{i-\ddot{u}} \text{ норм} = 0.5 \left\{ 1 - \sum_{j=1}^N |S_{ij}|^2 \right\}, \quad (2.14)$$

де  $N$  – номер антени, і "j" позначає j-ий порт.

Ці формули надають додаткові методи обчислення MEG з огляду на параметри антени і спростовують обчислення для конкретних сценаріїв систем MIMO.

## 2.5 Спектральна ефективність в системах MIMO

Спектральна ефективність вимірює кількість даних, яку можна передавати через радіоспектр. Зазвичай вона виражається в бітах на секунду на герц (біт/с/Гц). Спектральна ефективність (біти/с/Гц) обчислюється за формулою  $\eta = R/B_t$ , де  $\eta$  – спектральна ефективність,  $R$  – швидкість передачі даних, і  $B$  - доступна загальна ширина смуги.

У випадку використання технології SISO (одноканальний вхід - одноканальний вихід – single input single output), спектральна ефективність 4G-LTE становить 4,08 біт/с/Гц, що означає, що можна передавати 4,08 біт

даних за секунду на герц смуги. Однак, при використанні технології  $4 \times 4$  MIMO спектральна ефективність збільшується до 16,32 біт/с/Гц, що в чотири рази вище, ніж у випадку SISO. Це свідчить про те, що використання технології MIMO дозволяє значно підвищити ефективність використання радіоспектру і передавати більше даних при тій самій ширині смуги.

## 2.6 Переваги систем MIMO в бездротовому зв'язку

За ростом асортименту мобільних застосунків з'явилася потреба в гігабітних швидкостях передачі даних, щоб задовольнити користувачів з різними рівнями рухливості, включаючи як сценарії з низькою, так і високою рухливістю. Для вирішення цієї потреби традиційні одноканальні антени в мобільних пристроях замінюються антенами MIMO. За допомогою технології MIMO мобільні пристрої можуть надавати покращену якість обслуговування, пропонуючи безперервний сигнал, високі швидкості передачі даних, збільшену потужність та покращену спектральну ефективність. Деякі з переваг перераховані нижче.

*Збільшення швидкості передачі даних.* Технологія MIMO дозволяє досягти вищих швидкостей передачі даних порівняно з традиційними системами з одним входом і одним виходом, оскільки кілька потоків даних можуть передаватися одночасно в одному і тому ж частотному діапазоні. Зі збільшенням кількості MIMO-шарів також зростає загальна пропускна здатність системи.

*Покращення якості сигналу.* Технологія MIMO допомагає покращити якість сигналу, зменшуючи вплив сплесків, перешкод та шуму. У традиційних системах SISO (одноканальний вхід - одноканальний вихід) між передавачем та приймачем передається лише один потік даних, що призводить до більшого впливу перешкод та сплесків на межі зони покриття через велику ширину променя антен базової станції, як показано на рисунку 2.2. У той час як технологія MIMO або massive MIMO на gNodeB (антена базової станції в 5G)

створює більш напрямний промінь, що покращує зону покриття та зменшує вплив перешкод на межі зони покриття, як показано на рисунку 2.3.

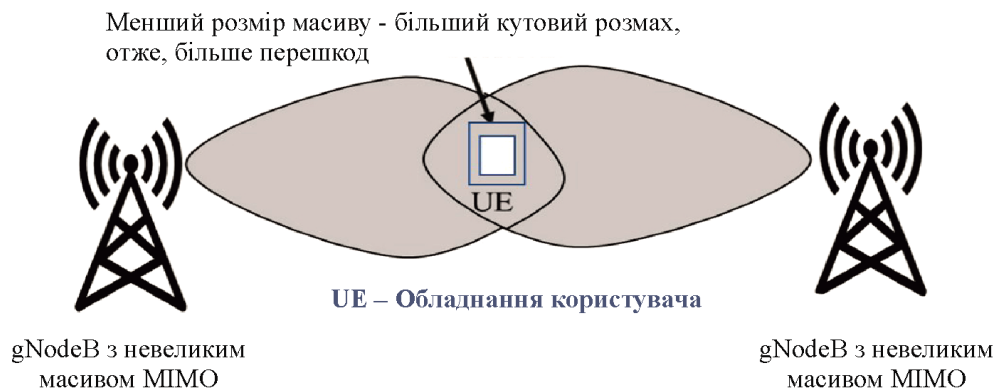


Рисунок 2.2 – Чим менший розмір масиву та більша ширина променя, тим більше перешкод на межі покриття

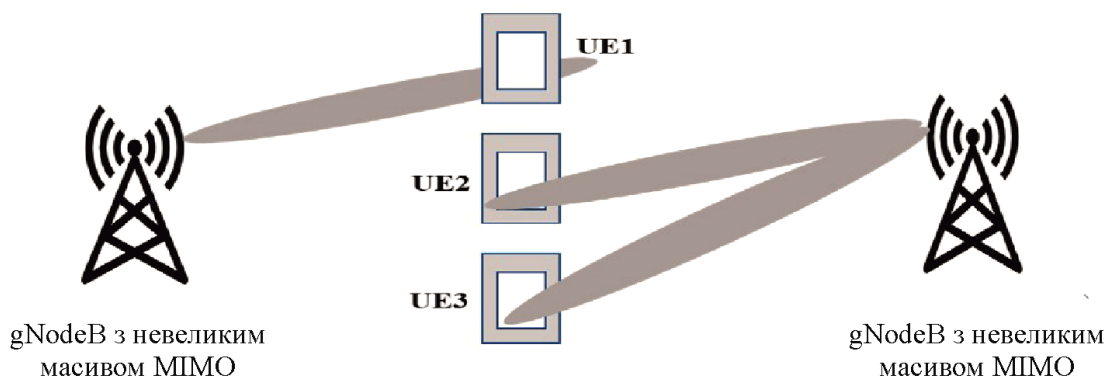


Рисунок 2.3 – Більший розмір масиву, гостріший промінь, низькі перешкоди

*Збільшений діапазон та покриття.* Технологія MIMO може розширити діапазон і покриття бездротових мереж, покращуючи якість зв'язку та зменшуючи ймовірність втрати сигналу. На рисунку 2.4 видно, що більший масив MIMO або massive MIMO генерує більш напрямний промінь, що може поліпшити зону покриття порівняно з традиційною системою SISO

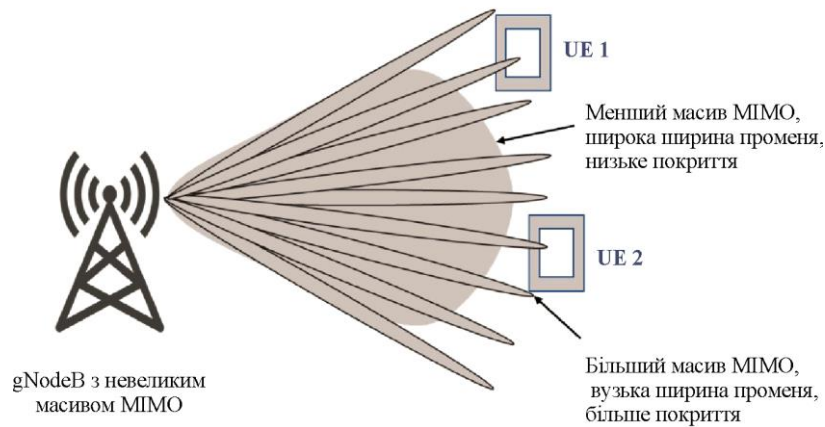


Рисунок 2.4 – Спрямовані промені мають більшу зону покриття та покращене співвідношення сигнал/шум.

*Покращена спектральна ефективність.* Технологія MIMO дозволяє досягти покращеної спектральної ефективності, що дозволяє ефективніше використовувати наявний радіоспектр. Це досягається завдяки одночасному передаванню або отриманню кількох потоків даних.

*Сумісність з існуючими стандартами.* Технологія MIMO є сумісною з існуючими бездротовими стандартами, що означає, що її можна легко інтегрувати в існуючі бездротові мережі без основних змін в інфраструктурі.

## 2.7 Формування променя

Мала довжина хвилі частот mmWave дозволяє розмістити багато антен на невеликій площі. Передача сигналу через багато антен із певним зсувом фази забезпечує підсилення формування променя шляхом когерентного поєднання електромагнітного сигналу, що випромінюється від кожної антени передавача. Подібним чином когерентна комбінація синфазних сигналів, отриманих від кількох антен, дає посилення відношення сигнал/шум (SNR), коли приймальні антени мають некорельований шум. Реалізований коефіцієнт підсилення формування променя як на передавачі, так і на приймачі робить канал зв'язку спрямованим, що зменшує перешкоди між та всередині комірки,

як показано на рисунку 2.5. Підсилення потужності формування променя при передачі та прийомі в поєднанні зі зменшенням перешкод підвищує співвідношення сигнал/перешкода плюс шум (SINR), забезпечуючи вищу швидкість передачі даних, більшу ємність стільникового зв'язку та розширене покриття стільникового зв'язку. Реалізований приріст SINR особливо корисний для систем зв'язку mmWave, враховуючи високі втрати проникнення та поширення на частотах mmWave. Крім того, кілька променів на передавачі можна використовувати для мультиплексування паралельних потоків даних для зв'язку з просторово розділеними кількома користувачами (MU-MIMO). Кілька променів на приймачі можуть забезпечити рознесеність, підвищивши надійність завдяки надлишковим потокам даних.

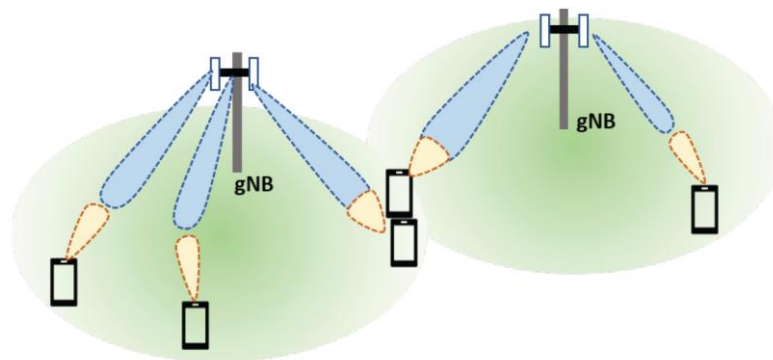


Рисунок 2.5 – Формування променя mmWave  
зі зниженою інтерференцією між комірками та всередині комірок

Для реалізації ефективного формування променя кожна антена потребує контролера амплітуди, фазовращателя або елемента затримки часу. Конкретна конфігурація цих елементів у поєднанні з геометрією антенної решітки визначає діаграму спрямованості випромінювання. Для формування променя можна використовувати як розімкнуту, так і замкнуту оцінку формування променя. Технології замкнутого циклу враховують, що оцінений канал між антеною передавача та приймача відомий, що дозволяє отримати найкращу конфігурацію формування променя з оціненої матриці каналу. Технології

відкритого циклу використовують попередньо встановлену кодову книгу для формування променя як на передавачі, так і на приймачі. Найкраща конфігурація формування променя з кодової книги вибирається відповідно до потужності отриманого сигналу без явної оцінки каналу.

Залежно від вибору типів фазовращателя в аналоговій або цифровій областях було розглянуто кілька архітектур формування променя. Три поширені архітектури формування променя для зв'язку mmWave:

- аналогова фазова решітка (АФР);
- гібридна фазова решітка (ГФР);
- повністю цифрова архітектура (ПЦА).

Незважаючи на те, що цифрова архітектура є популярним вибором для масивних комунікацій МІМО нижче 6 ГГц, він менш підходить для mmWave через розрідженість каналів, високі втрати при розповсюдженні тощо. Аналогова фазова решітка та гібридна фазова решітка є кращими архітектурами для частот mmWave, коли розглядаються компроміси щодо продуктивності та вартості. Цифрова архітектура розглядається як наступне покоління архітектури для mmWave, з незавершеними досягненнями в схемних технологіях [31].

## 2.8 Отримання та відстеження променя

Високі втрати на шляху мм-хвильових діапазонів вимагають високого підсилення формування променя, щоб мати прийнятне SNR і гідну взаємодію з користувачем. Ці промені необхідно постійно вирівнювати між стільниковим вузлом і UE, щоб підтримувати зв'язок, як показано на рис. 2.6. Таке вирівнювання променя є проблемою в мінливих мобільних середовищах, де блокування завжди можливе. Тіло людини, цегляні стіни та скло – все це перешкоди, які можуть спричинити блокування під час руху користувача в просторі. Цю серйозну втрату неможливо компенсувати збільшенням потужності передачі або посиленням формування променя. Замість цього

передавач mmWave повинен знайти альтернативні шляхи або просторові канали.

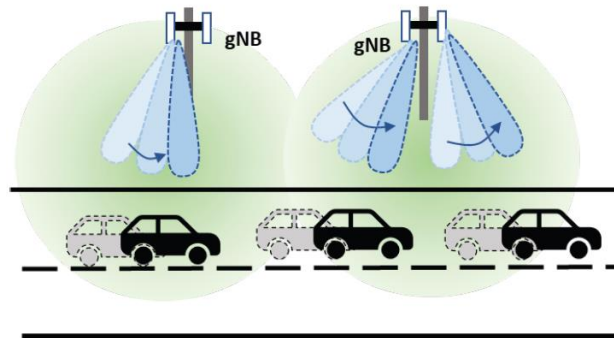


Рисунок 2.6 – Відстеження променя на базовій станції для підтримки зв'язку між базовою станцією та автомобілем

У рішеннях АФР та ГФР для формування променя напрямком променів регулюється шляхом періодичного згортання каналу відповідно до руху та обертання мобільної станції. Однак часте розгортання променя збільшує накладні витрати та зменшує пропускну здатність. Рішення ПЦА можуть передавати і приймати сигнали в усіх напрямках одночасно, оскільки елементи антени є всеспрямованими, і ПЦА може віртуально формувати спрямовані вузькі промені, що охоплюють весь простір одночасно. Передавачі та приймачі ПЦА можуть динамічно визначати новий напрямок променя та знаходити найкращий вектор формування променя без збільшення затримки. У приймачі ПЦА може використовувати сліпе відстеження променя, яке постійно контролює найкращі напрямки променя від символів даних, не вимагаючи пілотів, поки шлях даних зв'язується з поточним потоком даних.

Одним із завдань систем mmWave є отримання променя для взаємного виявлення променя як на базовій станції, так і на користувачеві. Стандарт 5G NR підтримує періодичну передачу сигналів синхронізації з наведеною передачею та спрямованим розгортанням променя приймача. Припускаючи, що і вузли передачі, і вузли приймання спрямовані з променями і відповідно, вичерпний пошук можливих комбінацій променів залишає нам повні

можливості. Таким чином, затримка початкового доступу становить секунди для АФР/ГФР, де є період розгортки променя. Однак для ПЦА з широкою діаграмою спрямованості антени приймальний пристрій може знайти найкращий напрямок променя за один знімок. Перевіряються всі можливі напрямки прийому, і найкращий промінь може бути фактично визначений за нульовий час (не враховуючи затримку обробки) під час обробки цифрово збереженого сигналу. Таким чином, затримка початкового доступу системи ПЦА скорочується лише до секунди.

## 2.9 Стандартизація базових технологій для mmWave

### 2.9.1 3GPP NR FR2

Стандартизація 5G NR для mmWave почалася з «раннього зниження» 3GPP Версія-15 у грудні 2017 року. Основні версії 3GPP (партнерство третього покоління) для еволюції 5G від вдосконаленої LTE наведено наступним чином [5] та показано на рисунку 2.7:

- 3GPP Версія 15: Це було перше випуск стандарту 5G, опублікований у грудні 2017 року. В ньому була введена технологія 5G New Radio (NR) та визначені початкові технічні характеристики для мереж 5G.

- 3GPP Версія 16: Це другий важливий випуск стандарту 5G, опублікований у вересні 2020 року. В ньому були введені покращення, нові функції для 5G NR та 5G ядра мережі, а також технічні характеристики для нових варіантів використання та застосувань.

- 3GPP Версія 17: Це наступний важливий випуск стандарту 5G, який наразі перебуває у розробці та очікується, опублікований у 2022 році. Він продовжує розвивати можливості та функції, введені в попередніх випусках, а також вводить нові покращення та сценарії використання.

- 3GPP Версія 18: Це наступний важливий випуск стандарту 5G, який наразі перебуває у розробці і очікується, що буде опублікований у 2023 році.

Він подальше розширить можливості та потенційні сценарії використання технології 5G, дозволяючи нові послуги та застосування та покращуючи продуктивність, безпеку та надійність мереж 5G.

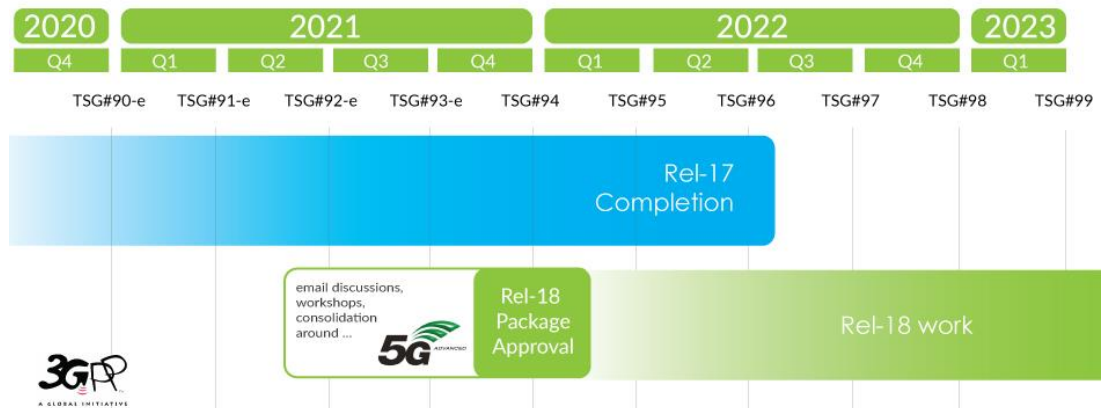


Рисунок 2.7 – Розширені 3GPP версії для 5G

Як і всюди, глобальна криза COVID-19, яка почалася на початку 2020 року, призвела до необхідності переведення робочих груп і пленарних засідань 3GPP з 4-6 особистих зустрічей на рік лише на онлайн-зустрічі. Це дещо сповільнило розвиток Rel-16 і Rel-17.

У 3GPP Версія-15 3GPP NR представив базові процедури керування променем, включаючи процедуру уточнення променя та відновлення збою променя PCell (BFR). Процедуру уточнення променя можна класифікувати як на основі DL і UL. Уточнення променя на основі DL показано на рис. 2.8 і може бути розділене на три ієрархічні фази: процедури P1, P2 і P3. У процедурі P1 приймальний промінь UE P1 вимірює кілька потенційних променів передачі gNodeB P1, і UE повідомляє про справний промінь(і) передачі gNodeB P1 до gNodeB. Тут промінь UE P1 може бути псевдовсенаправленим променем, а промінь передачі gNodeB P1 може бути грубим широким променем, наприклад. SSB промінь. У процедурі P2 gNodeB вибирає один зареєстрований промінь передачі P1 і передає кілька вузьких променів кандидатів P2 у межах вибраного променя передачі P1. Приймальний промінь UE P1 вимірює кілька переданих потенційних променів передачі gNodeB P2, і

UE повідомляє про хороші промені передачі gNodeB P2 до gNodeB. У процедурі P3 gNodeB вибирає один зареєстрований промінь передачі P2 і повторює його кілька разів, на основі чого UE виконує розгортку приймального променя через вузькі потенційні приймальні промені P3 та визначає найкращий приймальний промінь P3. Після ієрархічної процедури P1/P2/P3 зв'язок пари променів уточнюється за допомогою найкраще узгоджених променів gNodeB/UE.

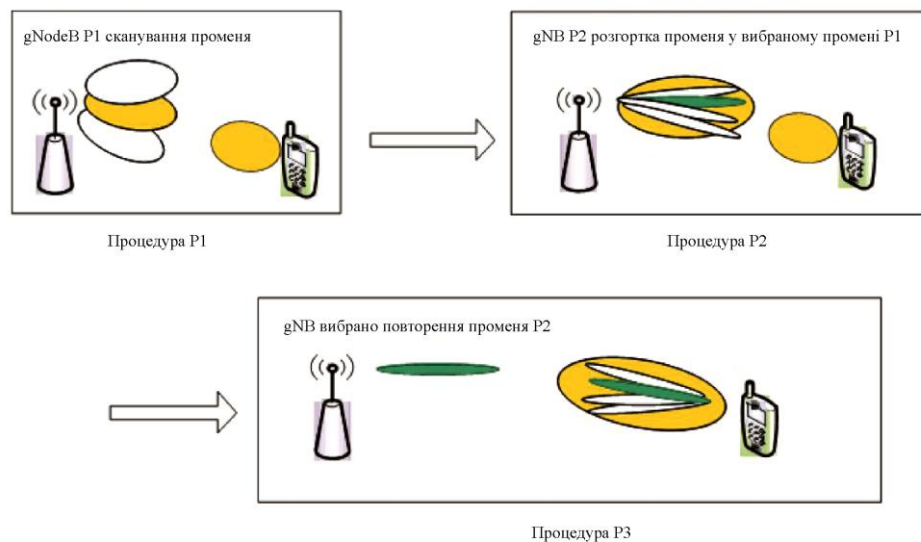


Рисунок 2.8 – Процедура уточнення променя на основі DL

У Версії-15 ще однією основоположною функцією FR2 є PCell BFR, де UE безперервно відстежує опорні сигнали виявлення відмови променя (BFD), які пов'язані з променями керування DL PCell. Якщо якість усіх BFD RSs нижча за порогове значення, це означає, що всі контрольовані промені DL вийшли з ладу, і UE може ініціювати PCell BFR за допомогою процедури довільного доступу без конкуренції (CFRA). Після надсилання преамбули CFRA UE відстежуватиме відповідь BFR від PCell у просторі пошуку, присвяченому BFR. Відповідь BFR і наступні повідомлення будуть надіслані через новий промінь, визначений у CFRA, для подальшого вдосконалення зв'язку нової пари променів.

У Версії-16 у FR2 були додатково введені додаткові вдосконалення, включаючи SCell BFR, уточнення променя на основі L1-SINR, а також покращення накладних витрат/зменшення затримки керування променями. Одним із основних випадків використання SCell BFR є відновлення несправної SCell на FR2, тоді як PCell знаходиться на FR1. Приклад показано на рис. 2.9 у випадку агрегації несучих (CA) FR1+FR2 з основними кроками, переліченими нижче.

Крок 1: UE виявляє, що всі промені керування DL вийшли з ладу для SCell на FR2.

Крок 2: UE надсилає запит на відновлення зв'язку (LRR) на PCell на FR1 через відповідний ресурс PUCCH.

Крок 3: PCell виділяє грант UL для UE, щоб повідомити про помилку індексу SCell.

Крок 4: UE надсилає SCell BFR MAC CE, щоб повідомити про невдалий індекс SCell + потенційно ідентифікований новий промінь-кандидат.

Крок 5: PCell відповідає відповіддю BFR, підтверджуючи отримання BFR MAC CE.

Базуючись на повідомленому невдалому індексі SCell, PCell може додатково провести більш детальне навчання променя, щоб визначити найкращий новий промінь на SCell.

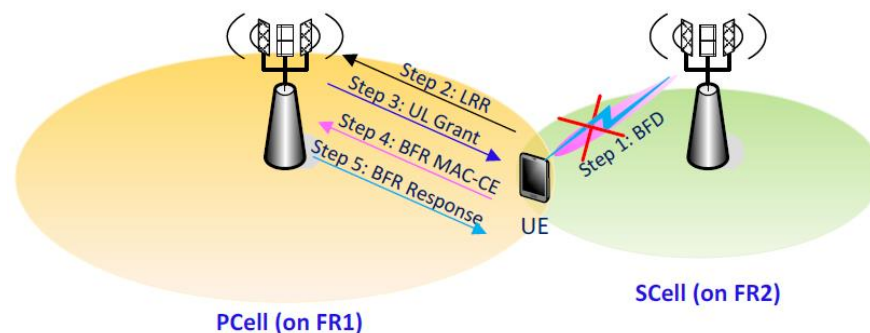


Рисунок 2.9 – Процедура SCell BFR

У Версії-15 вибір променя базується на L1-RSRP, який не враховує перешкоди. Щоб включити вплив перешкод у вибір променя, L1-SINR вводить як метрика звіту про промінь у Версії-16. Для кожного звіту про промінь можна повідомити до 4 променів, і абсолютне значення SINR повідомляється для 1-го зареєстрованого променя, який має найвищий SINR. Диференціальне значення SINR повідомляється для кожного променя, що залишився, і обчислюється відносно найвищого SINR. Версія-16 визначає п'ять загальних комбінацій ресурсу вимірювання каналу (CMR) і ресурсу вимірювання перешкод (IMR) для конфігурації ресурсу вимірювання L1-SINR.

Щоб ще більше зменшити накладні витрати та затримку керування променем, оновлення опорного сигналу втрат на шляху (PL) на основі MAC CE було введено у Версії-16, де PL RS для PUSCH і аперіодичні (AP)/напівпостійні (SP) SRS можуть бути активовано/оновлено через MAC CE. За допомогою цієї функції як промінь UL, так і відповідний PL RS можуть динамічно оновлюватися MAC CE, щоб уникнути затримки через оновлення PL RS на основі RRC.

З іншого боку, у FR2 багатоконпонентні несучі (CC) зазвичай використовують один аналоговий формувач променя, особливо у випадку внутрішньосмугового SA. Накладні витрати та затримку сигналізації індикації променя можна зменшити, використовуючи властивість, що загальний аналоговий промінь спільно використовується кількома CC. Таким чином, Версією-16 введено функцію одночасного оновлення променя DL/UL через CC, де один MAC CE може активувати той самий набір ідентифікаторів променя для кількох CC, як показано на рис. 2.10. Одночасне оновлення променів через CC додатково включає наступні три підфункції:

- Для оновлення променя PDSCN набір ідентифікаторів стану PDSCN TCI, активованих MAC CE, можна застосувати до всіх BWP у CC у відповідному списку CC.

- Для оновлення променя PDCCH ідентифікатор стану TCI, активований MAC CE, може бути застосований до всіх CORESET(s) з однаковим ID CORESET для всіх BWP у CC у відповідному списку CC.

- Для оновлення променя SRS інформація про просторове співвідношення SP/AP SRS, активована MAC CE, може бути застосована до ресурсів SP/AP SRS з однаковим ідентифікатором ресурсу для всіх BWP у CC у відповідному списку CC.

У кожній із вищезазначених підфункцій можна налаштувати до двох списків CC за допомогою RRC на UE, і застосований список визначається вказаним CC у MAC CE.



Рисунок 2.10 – Одночасне оновлення променя DL/UL через CC

Для подальшого зменшення затримки перемикання променя UL і накладних витрат у Версії-16 введено концепцію променя UL за замовчуванням, щоб дозволити променю UL автоматично слідувати за променем DL без додаткової сигналізації. Для PUCCH/SRS/PUSCH без налаштованого просторового відношення просторове відношення за замовчуванням і PL RS визначаються в наступних двох випадках: Якщо CORESET(и) налаштовано на CC, квазіколокований тип D (QCL Type-D) RS стану TCI/QCL припущення CORESET із найнижчим ідентифікатором у активному BWP служить просторовим відношенням за замовчуванням і PL RS; В іншому випадку QCL Type-D RS активованого стану PDSCH TCI з найнижчим ідентифікатором в активному DL BWP служить просторовим відношенням за замовчуванням і PL RS.

## 2.10 Висновки до другого розділу

В даному розділі було представлено важливі параметри та показники, які відіграють ключову роль у функціонуванні та ефективності антен МІМО (багатовхідних, багатороз'ємних вхідних/вихідних систем). Ми розглянули параметри рознесення, такі як коефіцієнт кореляції обвідної (ЕСС) та загальний активний коефіцієнт відбиття (ТАРС), які вказують на взаємодію між різними антенними портами та ефективність антенної системи. Також була досліджена пропускна здатність каналу, яка визначає максимальну кількість інформації, яку можна передати через канал, а також середнє ефективне підсилення (МЕГ) та спектральна ефективність, які впливають на продуктивність та якість сигналу в системі МІМО. Ці параметри відіграють важливу роль у досягненні високої швидкості передачі даних, покращенні якості сигналу та оптимальному використанні доступних бездротових ресурсів у системах МІМО, що, в свою чергу, дозволяє реалізувати передові бездротові комунікаційні застосування.

Також у даному розділі були обговорені переваги антен МІМО в порівнянні зі звичайними антенними системами SISO (Single Input, Single Output), MISO (Multiple Input, Single Output) та SIMO (Single Input, Multiple Output). Ці переваги роблять технологію МІМО важливою для покращення бездротового зв'язку та забезпечення якісних послуг у сучасних мобільних мережах.

### 3 МЕТОДИ ТА СТРАТЕГІЇ РОЗРОБКИ АНТЕН МІМО ДЛЯ РАДІОДІАПАЗОНІВ FR-1 ТА FR-2: АНАЛІЗ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Розглянуто різні конфігурації антен МІМО, такі як широкосмугові, багатосмугові та антени з круговою поляризацією для радіодіапазонів FR-1 та FR-2. Ці конструкції спрямовані на досягнення широкого покриття частот, підтримку декількох діапазонів частот та забезпечення ефективної кругової поляризації для задоволення різноманітних вимог бездротових систем зв'язку в цих діапазонах частот, як показано на рисунку 3.1.

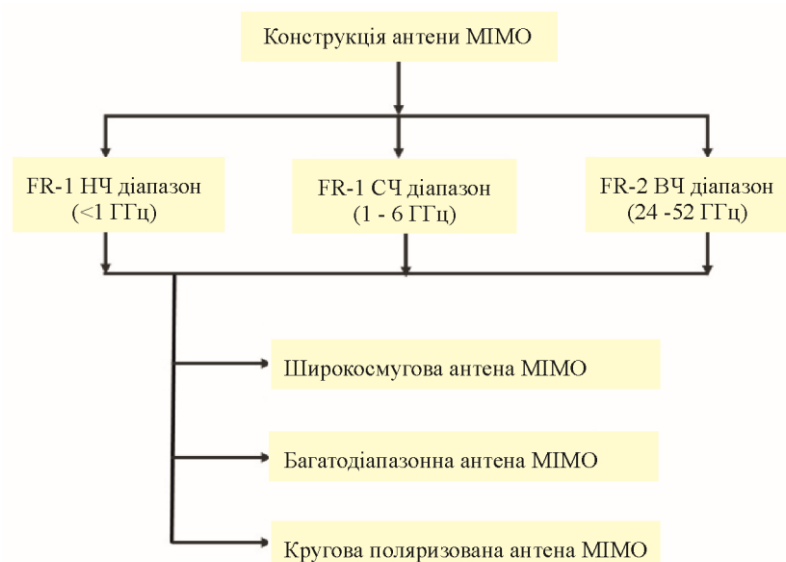


Рисунок 3.1 – Конструкція антени МІМО на основі діапазону FR-1 і FR-2 відповідно до ІТУ

#### 3.1 Підходи до розробки широкосмугових/надширокосмугових антен МІМО із структурою розв'язки

Широкосмугові антени МІМО розроблені для роботи в широкому діапазоні частот, зазвичай охоплюючи кілька діапазонів частот у межах FR-1 і FR-2. Ці антени використовують різні методи для досягнення широкого

охоплення частот, такі як широкосмугові живильні мережі та випромінювальні елементи. Широкосмугові антени МІМО здатні підтримувати кілька діапазонів частот одночасно, забезпечуючи підвищену спектральну ефективність і сумісність з різними стандартами бездротового зв'язку. Категоризація широкосмугової антени МІМО для діапазону нижче 6 ГГц і мм хвиль показана на рисунку 3.2.

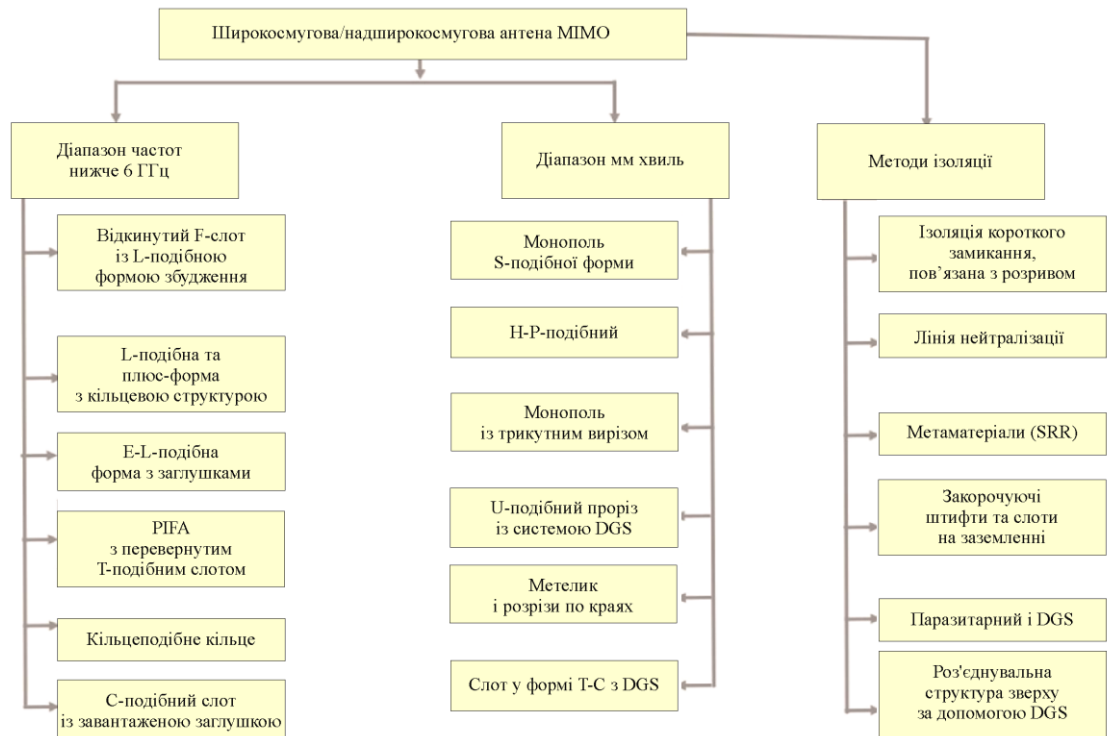


Рисунок 3.2 – Підходи до проектування антени WB/UWB-МІМО з різними методами ізоляції

Міліметрова антена МІМО є важливим компонентом для систем МІМО для досягнення повного пакету високого потоку даних, багатофункціональних додатків і системи зв'язку майбутнього покоління з електрично компактним компонуванням [1].

Основним недоліком багатопортової широкосмугової компактною антенної системи МІМО є високий взаємний зв'язок між елементами антени, який впливає на індивідуальну функціональність кожної антени. Взаємний зв'язок був збільшений завдяки високій щільності поверхневого струму,

індукованого для сусідніх елементів антени, які розміщені поблизу збудженого порту. Різні механізми взаємної розв'язки обговорювалися в різній літературі для мікрохвильових частот, щоб зменшити взаємний зв'язок, наприклад, включення комплементарного прямокутного спірального резонатора та шлейфової структури в заземлену площину паразитну мікросмужкову лінію, структура DGS і кілька літературних джерел досліджували методи зменшення взаємного зв'язку для частот міліметрового діапазону як впровадження метаматеріальної поляризаційно-обертальної стінки, масиву метаповерхні, що включає кругову розділену кільцеподібну комірку та включає розділений кільцевий резонатор [28].

У статті [29] МІМО-антена використовує структуру дефектної землі (DGS) і дефектну мікросмужкову структуру (DMS) для зменшення взаємного зв'язку та крос-поляризації в діапазоні міліметрових хвиль, діапазон n258 від 24,25 до 27,5 ГГц із завантаженим шлейфом конструкції CPW з еліптичними радіаторами (рис. 3.3). Використання металевої площини з дефектами як відбивача на задній стороні підкладки покращує ізоляцію від співполяризації до крос-поляризації та характеристики випромінювання, також досягаючи ізоляції 35 дБ і ізоляції від співполяризації до крос-поляризації більше 20 дБ. Були отримані параметри продуктивності МІМО, такі як коефіцієнт кореляції огиначаючої ( $0,1 \times 10^{-6}$ ), посилення рознесеності 10 дБ і CCL 0,005 біт/с/Гц.

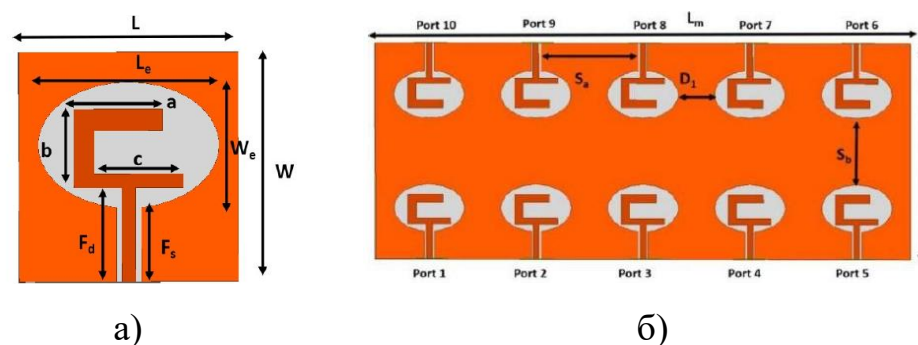


Рисунок 3.3 – Схематична діаграма а) – одиночної антени,  
б) – 10-елементного розташування МІМО

Ще одну систему антени МІМО [30] представлено у вигляді S-подібної ширококугової мм-хвильової антени з чотирма портами і множинними входами і виходами (МІМО) із смугою пропускання від 25 ГГц до 39 ГГц яка охоплює діапазон NR FR-II n258, n257, n261 і n260 (рис. 3.4). Антена розроблена на основі ультратонкого RO5880 0,254 мм з діелектричною проникністю 2,3. Розміри запропонованої S-подібної антени становлять  $10 \times 12$  мм для одноелементної та  $24 \times 24$  мм для чотирьопортової конфігурації МІМО. Мережа роз'єднання введена для подальшого стиснення взаємного зв'язку між елементами МІМО. Досягнуте пікове посилення становить 7,1 дБі, а збірка МІМО забезпечує схему рознесення. Пропонована антена МІМО виготовлена, і виявлено, що результати моделювання чудово узгоджуються з моделюванням. Завдяки отриманим результатам запропоновану систему антен МІМО можна розглядати як потенційного кандидата для майбутніх пристроїв mmWave.

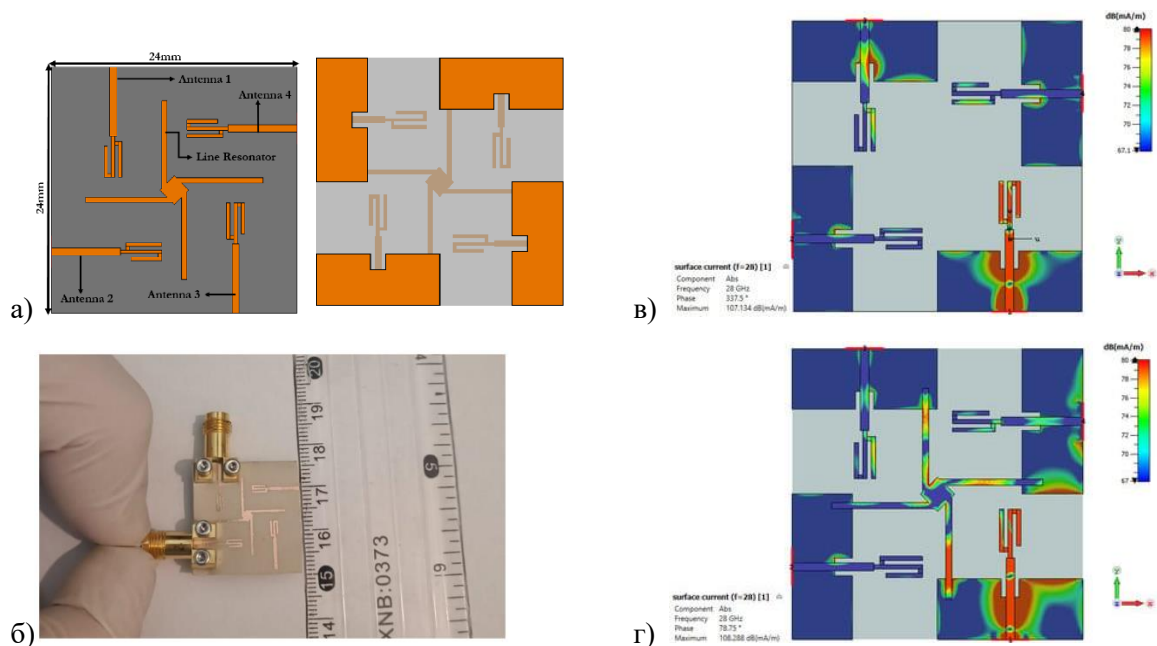


Рисунок 3.4 – S-подібна ширококутова мм-хвильової антена з чотирма портами і МІМО: а) – Конфігурація антени МІМО; б) – Прототип антени МІМО; Розподіл поверхневого струму в) – без ізолювальної конструкції г) – з ізолювальною структурою

Антенa в [31] має ефективність від 40% до 75%, яка охоплює повний спектр 5G NR (n77/n78/n79) і діапазон LTE. Антенa має ізоляції між портами вище  $-10$  дБ і ЕСС менше 0,07. У цьому дослідженні описується L-подібний проріз зі структурою у формі плюса на ділянці, укладеній у коло [32], тоді як нижній шар частково покритий заземленою площиною. Розробку було розширено до 8-портового MIMO для додатків 5G MIMO з ефективною смугою пропускання від 3,05 до 3,74 ГГц. Досягнуто такі параметри продуктивності MIMO, як ізоляція понад  $-15$  дБ і ЕСС менше 0,1 відповідно. Чотирипортовий широкосмуговий випромінюваний патч із щілинними випромінюваннями [33] з двома шлейфами, розширеними до конфігурації MIMO, був розроблений для 5G NR у діапазонах WLAN під 6 ГГц і 5 ГГц. Ця конфігурація використовує часткове заземлення для досягнення широкосмугової роботи з ефективним діапазоном смуги від 3,20 до 5,85 ГГц. Включення нової структури розв'язки UPMS між випромінювальними плямами призвело до значного покращення посилення ізоляції на 17,5 дБ і високої ефективності 85% у бажаних діапазонах частот.

Запропонована антенна система у [34] з декількома входами та декількома виходами (MIMO) для послуг бездротового зв'язку 5G міліметрового діапазону, де конфігурація MIMO складається з чотирьох антенних елементів, кожна антенa має HP-подібну конфігурацію, яка відрізняється простою конфігурацією та відмінною продуктивністю. Наведена на рисунку 3.5 конструкція MIMO може працювати в дуже широкій смузі 36,83–40,0 ГГц (виміряно). Крім того, запропонована антенa MIMO досягає пікового посилення 6,5 дБ з максимальною ізоляцією елементів  $-45$  дБ. Крім цього, аналізуються показники продуктивності MIMO, такі як коефіцієнт кореляції обвідної (ЕСС), підсилення рознесення та пропускна здатність каналу (CCL), які демонструють хороші характеристики в робочому діапазоні. Запропонована антенa ефективно випромінює з ефективністю випромінювання понад 80% у бажаному діапазоні частот, що робить її

потенційним претендентом на майбутні комунікаційні програми. Запропоноване проектне моделювання було виконано в програмному забезпеченні технології комп'ютерного моделювання (CST), і вимірні результати показують хорошу узгодженість із змодельованим.

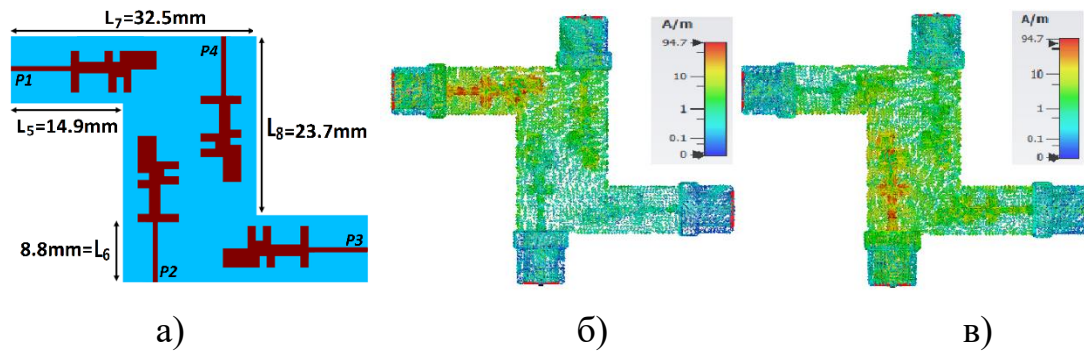


Рисунок 3.5 – Антена МІМО з НР-подібною конфігурацією:

а) – Геометричне розташування антенної системи МІМО. Розподіл поверхневого струму антенної системи МІМО для: б) – порту-1; в) – порту-2

Обговорювалась інша подібна конфігурація  $8 \times 8$  МІМО для мобільних телефонів з антеною на передній і задній сторонах панелі мобільного телефону, яка покривала діапазон нижче 6 ГГц від 3,3 до 7,2 ГГц [35]. Обговорювалась 4-портова МІМО-антена на основі кільцевого кільця (AR) [36] для додатків точки доступу з ефективною смугою пропускання 3,3–5,0 ГГц, ефективністю 84% і досягнутим ЕСС менше 0,05. Смушка GCS, яка використовується як роз'єднувальна мережа між портами та розміщена під кутом 90 градусів один від одного під кутом  $\phi = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ , забезпечує коротке замикання між патчем і площиною заземлення, так що суміжні порти розділені одним GCS смушка.

С-подібна прозора гнучка 4-портова МІМО антена [37] була представлена з круглими шлейфами. Для оптичної прозорості використовували підкладки AgNT-4 та Melinex. L-подібна часткова площина заземлення з С-подібним випромінювачем призвела до широкої смуги пропускання. Антена пропонує смугу пропускання нижче 6 ГГц від 2,21 до 6

ГГц і ізоляцію понад 15 дБ на всіх портах. Антена також забезпечує пікове посилення 0,53 дБі з мінімальною ефективністю 41%, що підходить для гнучкої структури.

У [38] представлена конструкція антени UWB із смугою пропускання опору (IBW) від 2 до 18 ГГц. Модифікований патч має подвійний U-подібний паз, звужені краї та трикутний отвір, а також прямокутну смугу на частковій поверхні землі. Було досягнуто ефективного посилення від 2 до 6,5 дБ і ефективності понад 70%. П'ять елементарних комірок на основі резонатора з розділеним кільцем (SRR), розташованих лінійно між випромінювальними ділянками, що використовуються як розв'язуюча структура, забезпечують посилення ізоляції -20 дБ.

У статті [39] представлена широкосмугова антена МІМО на основі метаматеріалів, розроблена для діапазону 5-го покоління нижче 6 ГГц і охоплює діапазон частот 3,27–3,82 ГГц. Продуктивність антени було покращено за допомогою елементарної комірки  $4 \times 4$  метаповерхні, що призвело до значного збільшення смуги пропускання імпедансу з 2,3% до 13,2%, а також підвищення ефективності з 83% до 92% і пікового підсилення 8,1 дБі. Нижня частина квадратної накладки звужена круглою кривою, затиснутою між площиною землі та металевією поверхнею. Структура розв'язки складається з прорізів у землі та замикаючих штирів, які забезпечують стабільне посилення в бажаному діапазоні частот із досягненням ізоляції понад 32 дБ. Крім того, параметри продуктивності МІМО демонструють ефективність рознесення з ЕСС менше 0,001 і DG 9,99 дБ.

Антенa МІМО на основі метаматеріалу [40] складається з елементарних комірок CMSPR (комбінована метаматеріальна структура та паразитне кільце) і потрійних ліній. Метаматеріал використовується як суперстрат на ділянці в площині x-y, тоді як інші конфігурації метаматеріалу використовуються як стінка CMSPR у напрямку y-z (рисунок 3.6). Структура метаматеріалу діє як ізолююча структура або просторовий фільтр, який підвищує продуктивність і зменшує взаємний зв'язок електромагнітної енергії між кількома антенами в

системі МІМО. Підхід із трьома лініями використовувався для збільшення смуги пропускання, що призвело до загальної ефективної смуги частот від 28 до 32 ГГц у мм-діапазоні. Значне збільшення посилення з 11,8 дБ (без метаматеріалу) до 17,1 дБ на резонансній частоті 30 ГГц було досягнуто за допомогою структури метаматеріалу. Крім того, була отримана ізоляція менше 36,7 дБ на 30 ГГц.

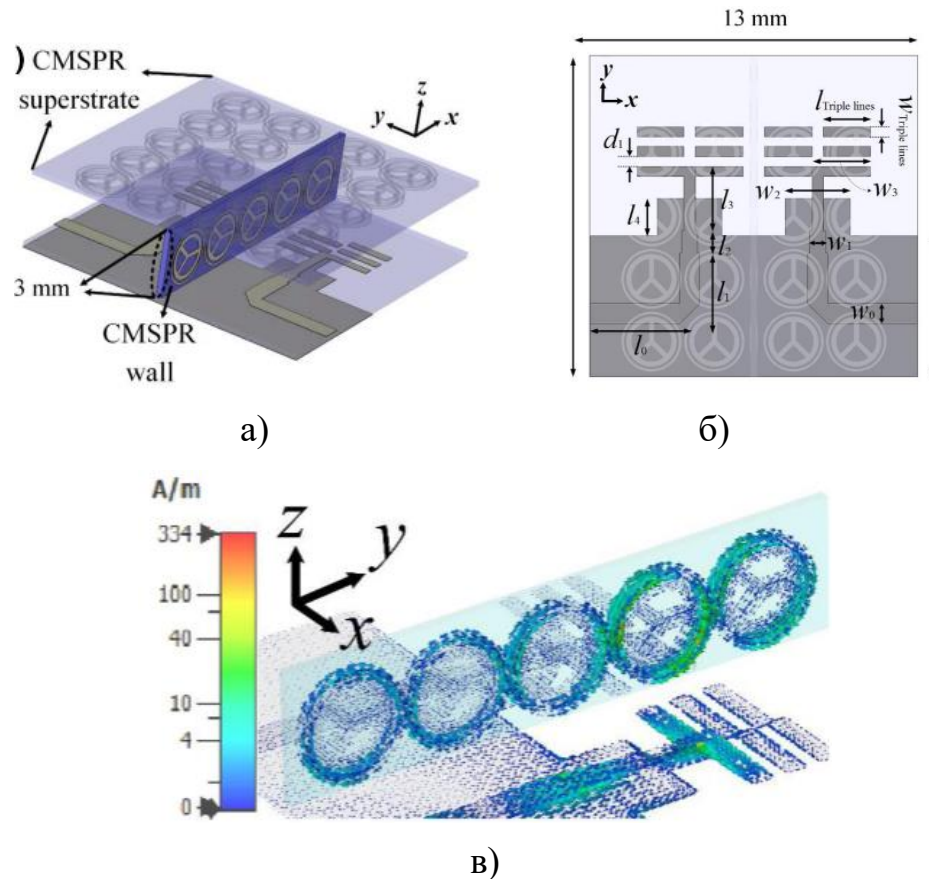


Рисунок 3.6 – Геометрія запропонованої антени з декількома входами та декількома виходами: а) – вид збоку та б) – вид зверху; в) – Поверхневий струм

### 3.2 Підходи до проектування реконфігурованої/багатодіапазонної антени МІМО

Реконфігуровані/багатодіапазонні антени МІМО розроблені для підтримки певних діапазонів частот. Ці антени включають випромінювальні

елементи або структури, оптимізовані для кожного бажаного діапазону частот. Завдяки використанню частотно-селективних елементів, таких як смугові фільтри або резонансні структури, багатосмугові антени МІМО можуть ефективно передавати та приймати сигнали в кожному конкретному діапазоні. Цей підхід до проектування забезпечує гнучкість і сумісність з різними мережевими розгортаннями та обладнанням користувача, яке може працювати в різних частотних діапазонах, як показано на рисунку 3.7.



Рисунок 3.7 – Підходи до проектування реконфігурованої та багатодіапазонної антен МІМО

У дослідженні [41] була представлена реконфігурована рівностороння трикутна патч-антена на основі PIN-діода для трьохдіапазонного МІМО, яка підходить для додатків L і S-діапазону. Структура EBG, інтегрована між двома елементами антени на підкладці, забезпечила ізоляцію понад 15 дБ. Антена резонувала в діапазонах частот для різних операцій перемикачів на частотах 1,06/1,24 ГГц, 1,52/2,13 ГГц і 2,19/2,63 ГГц. Крім того, антена мала ефективний коефіцієнт посилення понад 3,8 дБі, а також було досягнуто ко-поляризацію та крос-поляризацію понад 14 дБ з ЕСС нижче 0,5 і коефіцієнт посилення рознесення (DG) 9,5 дБ.

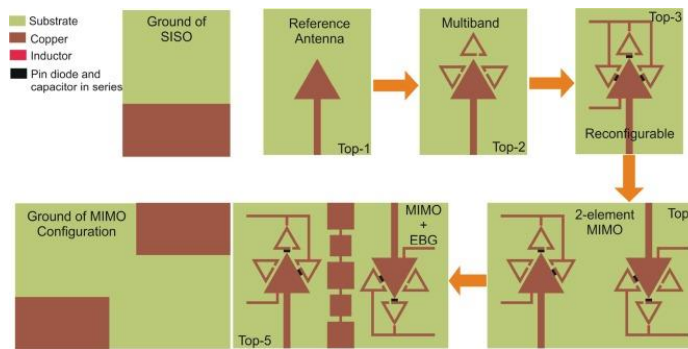


Рисунок 3.7 – Рівностороння трикутна патч-антена на основі PIN-діода для трьохдіапазонного MIMO

У дослідженні [42] описано аналіз тридіапазонної (2,4–2,5 ГГц, 3,3–3,6 ГГц та 4,8–5 ГГц) MIMO-антени з використанням теорії характеристичного режиму. Базовий прямокутний MSA було покращено шляхом додавання прямокутного спіралеподібного патрубка та L-подібного слота для досягнення тридіапазонної роботи. Лінія нейтралізації та чотирикутний проміжок у центрі землі були включені для покращення ізоляції більш ніж на  $-27$  дБ. Параметр продуктивності MIMO ECC становить 0,35, пікове посилення понад 1,26 дБі та загальна ефективність вище 76% на всіх діапазонах.

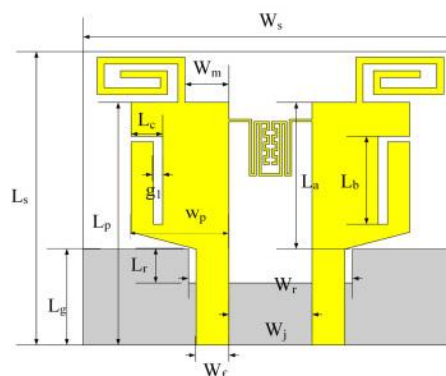


Рисунок 3.8 – Тридіапазонна антена MIMO

У цьому дослідженні [43] описується реконфігурований подвійний діапазон MIMO MSA для діапазону нижче 6 ГГц на резонансній частоті 3,5 ГГц і діапазону ISM 5,2 ГГц (рисунок 3.9). Використання PGP-DGS (структура часткового заземлення та дефектного заземлення) і штифтового діода

забезпечили дводіапазонну роботу, тоді як структура електромагнітної забороненої зони (EBG) допомогла зменшити взаємний зв'язок більш ніж на 25 дБ і покращити ізоляцію, де ефективне посилення становило 2,5 дБі повідомлено.

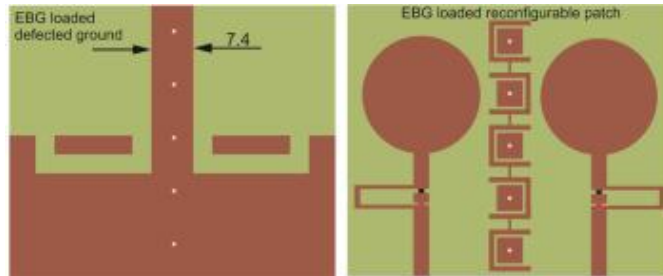


Рисунок 3.9 – Антена MIMO MSA для діапазону нижче 6 ГГц

Було досліджено компактний чотирпортовий MIMO MSA на основі резонатора з роздільним кільцем (CSRR) у [44] для програм бездротової локальної мережі, що резонують на частотах 2,4 ГГц, 2,9 ГГц і 5,8 ГГц. Структура CSRR дозволила збільшити пропускну здатність антени, компактність та ізоляцію в конфігурації MIMO. Крім того, було досягнуто пікове посилення 4,32 дБі з низьким значенням ECC 0,01, директивне посилення 9,98 дБ для всіх робочих діапазонів. 4-елементна MIMO-антена [45] працювала в двох діапазонах, придатна для додатків WiMAX і Wireless-LAN. Антена покривала смуги частот із смугою опору 400 МГц (3,35–3,75 ГГц) і 450 МГц (5,6–6,05 ГГц). Ізоляція між елементами антени була посилена шляхом включення паразитної розв'язувальної структури, що містить тонкі L- і T-подібні смужки. Антена мала підсилення 4,18 дБі в нижньому діапазоні та 3,62 дБі у високому діапазоні частот. Антена продемонструвала відмінні характеристики рознесення з ECC 0,01, DG понад 9,93 дБ, низьким CCL 0,4 б/с/Гц і TARC –10 дБ.

У статті [46] описано чотирпортовий подвійний діапазон (27,50–28,35 ГГц і 37–37,6 ГГц) MIMO MSA, що працює на частотах 28 ГГц і 38 ГГц. Антена використовувала модифіковані круглі та напівкруглі прорізи на

випромінювальних ділянках і DGS (дефектна структура землі) для покращення підсилення, IBW та узгодження імпедансу. Пікове посилення антени в 7,9 дБ і 13,7 дБ було досягнуто на частотах 28 ГГц і 38,7 ГГц відповідно. Дослідження в [47] запропонувало чотирьохпортовий стековий модуль MIMO MSA з методом зондової подачі. Багатосмугова конструкція MPA дає змогу охоплювати три різні частоти: 2,9, 5 і 5,9 ГГц, завдяки чому досягається багатодіапазонна продуктивність. MIMO MSA використовував структуру ізолятора між патчем, що призвело до низького зв'язку менше ніж  $-23$  дБ. Антена продемонструвала такі параметри рознесення, як EIS менше 0,01, посилення спрямованості 9,99 дБ, ефективність випромінювання більше 70% і посилення 6,4 дБі. У статті [48] представлена мініатюрна чотирьохдіапазонна двопортова антена MIMO нової форми, яка добре працює на чотирьох різних частотах у конфігурації нижче 6 ГГц, а саме 900 МГц, 1800 МГц, 3,5 ГГц і 5,5 ГГц. Його С-подібний випромінювач із круглим отвором у базовій структурі забезпечив широку смугу пропускання на деяких діапазонах. Спостережувані результати підтвердили смугу пропускання імпедансу 10 дБ (0,72–1,1 ГГц) 380 МГц, (1,57–1,90 ГГц) 330 МГц, (2,19–4,90 ГГц) 2,71 ГГц і (5,30–6,70 ГГц) 1,4 ГГц, відповідно.

### 3.3 Кругова поляризована широкосмугова, багатосмугова та реконфігурована MIMO антена для діапазону нижче 6 ГГц і mmWave

Антени з лінійною поляризацією, які використовуються для зв'язку прямої видимості, можуть приймати сигнали з різними рівнями потужності. Антена, яка приймає найслабший сигнал, встановлює верхню межу посилення рознесеності та згодом впливає на відношення сигнал/шум (SNR). Крім того, невідповідність поляризації може призвести до недостатнього підсилення сигналу для сильно ізольованих антен як у приміщенні, так і на вулиці. Однак за останні роки відбулися значні дослідження та промисловий прогрес, що підкреслює важливість антен з круговою поляризацією (CP) у бездротових

додатках. CP-антени можуть рівномірно розподіляти потужність сигналу між приймальними антенами, ефективно вирішуючи проблему невідповідності поляризації. Антени CP-MIMO (з кількома входами та декількома виходами) покращують швидкість передачі даних, пропускну здатність і посилення різноманітності. Деякі антени MIMO з круговою поляризацією з різними техніками перераховані нижче на рисунку 3.10.



Рисунок 3.10 – Підходи до проектування широкосмугової, багатодіапазонної, реконфігурованої антени MIMO з круговою поляризацією

Дослідження в [48] представило двоелементну антену на основі щілини MIMO з круговою поляризацією (CP) для застосувань UWB (рисунок 3.10). Для забезпечення широкосмугової кругової поляризації MSA використовував спіральні, прямокутні та L-подібні прорізи на землі. Два окремі слоти були вбудовані між дзеркальними компонентами квадратної щілинної антени CP для реалізації ізоляції. MIMO мав ширину смуги пропускання 3 дБ (ARBW) приблизно 58% з ефективним широкосмуговим опором від 3,17 до 17,39 ГГц і ізоляцією 16 дБ у всій робочій смугі пропускання. MSA забезпечив ефективну передачу з піковим посиленням 4,41 дБі та ефективністю 70%.

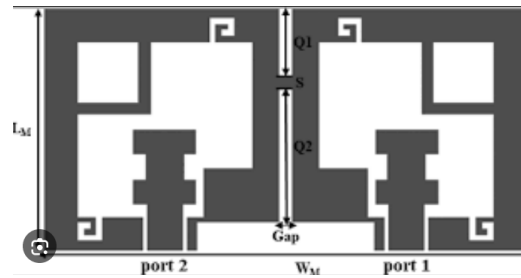


Рисунок 3.10 – Двоелементна антена на основі щілини МІМО з круговою поляризацією

У цьому документі [49] представлена восьмипортова МІМО-антена, яка використовувала CSSR і заглушку в землі для подвійної смуги з елементами на куті для створення СР. МSA мав робочу IBW від 5,75 до 5,95 ГГц і від 3,4 до 3,8 ГГц і демонстрував високу ізоляцію між своїми елементами понад 13,8 дБ і низький ECC 0,025. У дослідженні була представлена двосмугова антена МІМО з круговою поляризацією на частоті mmWave 28/38 ГГц, яка досягла лівої кругової поляризації в обох діапазонах частот (рис. 3.11).

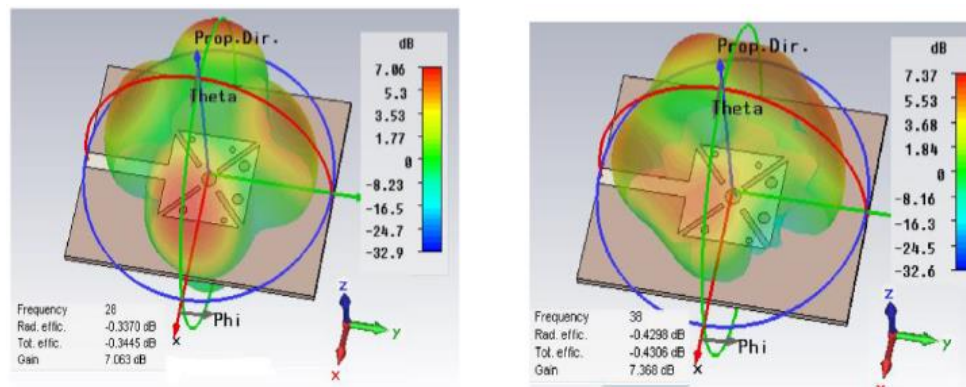


Рисунок 3.11 –Тривимірний графік підсилення на 28 ГГц і 38 ГГц

Конструкція включала чотири щілини в кутах, круглий отвір у середині випромінюючої накладки з замикаючими штифтами на краях накладки для досягнення бажаного резонансу та кругової поляризації. Конструкція показала FBW 2,5% на 28 ГГц і 32,4% на 38 ГГц. Крім того, дизайн було перетворено на чотирьохпортовий МІМО зі зв'язком між портами, зменшеним до 36 дБ.

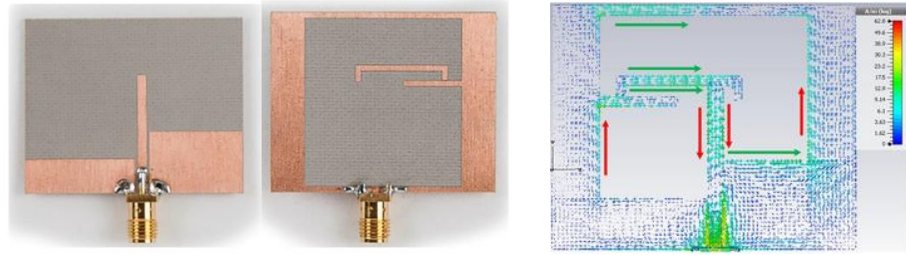


Рисунок 3.12 – Чотирьохпортова антена МІМО

Дослідження в [49] представило конфігурацію з круговою поляризацією (СР) зі слотом, вбудованим у землю, і копланарні хвильоводні методи живлення, що використовуються для FR-I NR (New Radio). Асиметрична копланарна структура заземлення створювала кругову поляризацію з ефективним імпедансом від 2,45 ГГц до 8 ГГц і осьовим відношенням (AR) приблизно 82% від загальної смуги частот, яка охоплює частотний діапазон від 2,5 ГГц до 6 ГГц. Антена досягла посилення 4 дБі, працюючи в обох напрямках і була стабільною в усьому робочому діапазоні. У документі представлено малогабаритну WB (широкосмугову), СР двопортову МІМО-антену для FR-I NR.

### 3.4 Проблеми проектування антен 5G МІМО

Для антен МІМО існує кілька проблем, які потрібно створити та інтегрувати в реальне середовище. Основною проблемою в МІМО є взаємний зв'язок, який знижує продуктивність антени. Близько розташовані антени викликають електромагнітний зв'язок між різними портами антени, що призводить до погіршення продуктивності. Окрім взаємного з'єднання, розмір антени МІМО з точки зору портативних пристроїв також є проблемою, про яку слід ретельно подбати. Кілька антен потребують більше радіочастотних ланцюгів разом із кожним елементом антени, тому розмір і вартість антени збільшуються. Таким чином, такі методи, як поляризаційне рознесення, можуть бути ефективними в таких ситуаціях, які можуть певною мірою

зменшити розмір і вартість системи. Таким чином, для досягнення оптимальної продуктивності дослідник повинен ретельно розглядати різне різноманіття в одній системі МІМО. Нижче наведено деякі проблеми проектування.

#### 3.4.1 Зчеплення

В антенах МІМО кілька антен на стороні передавача та приймача щільно упаковані, що призводить до взаємного з'єднання елементів антени. Коли кілька антен розташовано поруч, вони, як правило, поєднують електромагнітну енергію одна з одною, що може вплинути на роботу антени МІМО. Зв'язок може впливати на діаграми спрямованості та погіршувати ізоляцію між елементами антени. У літературі пропонуються різні методи зменшення взаємного зв'язку та посилення ізоляції між різними портами. Паразитні елементи, лінії нейтралізації, слоти/заглушки, роз'єднувальні структури, дефектні ґрунтові структури, травлення щілин, метаматеріали, елементарні комірки тощо є найбільш широко використовуваними методами ізоляції. Підхід із паразитним елементом полягає в тому, що ізолюючий елемент розміщується між елементами антени, щоб зменшити вплив зв'язку. У [49] автори описують, що ефекти кореляції між портами зменшуються шляхом вставки паразитної структури. Паразитна структура розроблена таким чином, щоб зменшити ефект зв'язку в усіх смугах пропускання. Нейтралізація, щілини та заглушки – це методи, які використовуються на площині заземлення або між випромінювальними ділянками, які зменшують ефект з'єднання з іншою антеною.

Як показує література, лінія нейтралізації, слоти та заглушки легко інтегруються в структуру та забезпечують значне покращення ізоляції між різними портами. Крім того, для практичних застосувань необхідна загальна площина заземлення, через яку струм у площині заземлення збуджує інший елемент антени та погіршує характеристики антени з точки зору діаграми

спрямованості та ефективності. Таким чином, дефектні структури заземлення або прорізи на заземленій площині значно зменшують поверхневий струм для збудження іншої антени, що, у свою чергу, забезпечує більший ступінь ізоляції між портами. Структури з метаматеріалів, розроблені на випромінювальному елементі, заземленій поверхні або між елементами антени, значно покращують ізоляцію. Такі структури, як SRR (резонатор з розділеним кільцем), CSSR (комплементарний резонатор з розділеним кільцем) і елементарні комірки, найбільш широко використовувані методи ізоляції в літературі. У

### 3.4.2 Компактність портативних пристроїв

Задовольнення зростаючої потреби у збільшенні обсягу мобільних даних вимагає збільшення пропускної здатності мобільних радіомереж. У той час як ущільнення мережі та інтеграція нових частот є потенційними рішеннями, включення можливостей MIMO вищого порядку в існуючі радіомережі дає можливість значно підвищити пікові швидкості передачі даних і збільшити загальну пропускну здатність мережі. У звичайних мережах MIMO  $2 \times 2$  зазвичай використовуються крос-поляризовані антени. Для введення в систему додаткових незалежних антен (наприклад,  $4 \times 4$  MIMO в смартфонах) можна використовувати другу крос-поляризовану антену. Щоб переконатися, що антени не корельовані, у портативному пристрої необхідно мати горизонтальну або вертикальну відстань між ними; розробити таку конфігурацію — завдання для дослідника. Наразі мобільні телефони, доступні на ринку, більшість смартфонів середнього класу підтримують антену MIMO  $2 \times 2$  або максимум  $4 \times 4$  MIMO у сегменті прем'єр-класу смартфонів. Для інтеграції в портативні пристрої антени MIMO мають бути компактними. Однак мініатюризація антен може погіршити їх продуктивність. Розробники повинні знайти компроміс між розміром, ефективністю та пропускну здатністю.

### 3.4.3 Різноманітність поляризації

На практиці для досягнення значного мультиплексування або посилення рознесення часто потрібні великі відстані між антенами. Використання подвійних поляризованих антен (поляризаційне рознесення) є багатообіцяючою економічно ефективною альтернативою, де дві просторово розділені однополяризовані антени замінюються однією структурою антени, що використовує ортогональні поляризації. Цього можна досягти, використовуючи антени з різною орієнтацією поляризації або використовуючи антени з подвійною поляризацією. Розробники повинні ретельно вибирати типи та орієнтації антен, щоб досягти оптимальної продуктивності.

### 3.4.4 Покриття діапазону частот

Бездротова мережа 5G працює в діапазонах частот нижче 6 ГГц і mmWave для зв'язку 5G. Діапазон частоти нижче 6 ГГц, і mmWave діапазон мають свої плюси та мінуси. Технологія mmWave забезпечує більш високу швидкість передачі даних через доступність великої смуги пропускання, але низьку зону покриття через більше затухання на високих частотах. Діапазон нижче 6 ГГц має низькі втрати на ослаблення з більшою зоною покриття та нижчою швидкістю передачі даних через обмежену доступність смуги пропускання. Таким чином, вкрай необхідно розробити антену MIMO, яка підтримує багатодіапазонну роботу для FR-1 і FR-2. Таким чином, необхідно забезпечити узгодження смуги пропускання антени та характеристик випромінювання з діапазонами частот, які цікавлять.

### 3.5 Висновки до третього розділу

У даному розділі розглянуто різні підходи до проектування антен MIMO для систем 5G. Зокрема, були описані методи ізоляції та проведено порівняння

на основі різних характеристик антен. Результати огляду ґрунтуються на останніх тенденціях у галузі проектування антен МІМО, обмеженнях, перевагах і майбутніх аспектах.

Загальний висновок з даного розділу полягає в тому, що проектування антен МІМО для систем 5G є складним завданням, яке вимагає уваги до багатьох аспектів. Підходи до дизайну можуть різнитися в залежності від вимог до системи, і важливо розглядати різні методи ізоляції та аналізувати характеристики антен для вибору оптимального рішення.

Крім того, огляд показав, що існують перспективи для розвитку антен МІМО, зокрема для широкосмугових (WB/UWB), реконфігурованих, багатодіапазонних і циркулярно поляризованих антен. Майбутні дослідження і розробки можуть вирішити деякі з проблем, визначених у цьому розділі, і вдосконалити характеристики антен МІМО для систем 5G.

Нарешті, була відзначена необхідність створення антен, які забезпечують покриття діапазону частот FR-1 і FR-2 для систем 5G. Оскільки ці діапазони мають відмінні характеристики, необхідно забезпечити узгодження смуги пропускання антен з характеристиками випромінювання для обох діапазонів.

Узагальнюючи, проектування та інтеграція антен МІМО для 5G є складним завданням, і розробники повинні ретельно розглядати всі ці проблеми для досягнення оптимальної продуктивності мережі 5G.

Отже, висновок з даного розділу вказує на значення вивчення різних аспектів проектування антен МІМО та на перспективи подальшого розвитку цієї технології в контексті сучасних вимог до мереж 5G і більш високих швидкостей передачі даних.

## 4 РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ДЛЯ ОДНОПЛОЩИННОЇ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ МІМО

Для зв'язку п'ятого покоління (5G) більшість мобільних операторів зосереджуються на отриманні високої пропускної здатності та високої швидкості передачі даних при низькій вартості. Передбачається, що системи 5G матимуть швидкість передачі даних у 1000 разів швидше порівняно з системами зв'язку четвертого покоління (4G). Такої високої швидкості передачі даних можна досягти за допомогою технології використання кількох передавальних та кількох приймальних антен МІМО. У МІМО швидкість передачі даних можна покращити шляхом зменшення багатопроменевого затухання або використання кількох незалежних каналів. Одним із основних ключових моментів до підвищення пропускної здатності каналу є розробка кількох антен для кожного каналу. Антена МІМО повинна мати низький взаємозв'язок, що є необхідною умовою для системи мобільного зв'язку 5G. Крім того, МІМО антени 5G можуть запропонувати краще рознесення та підсилення мультиплексування, що призводить до збільшення пропускної здатності каналу.

### 4.1 Аналіз результатів моделювання та їх порівняння з експериментальними даними

В контексті даної тематики, були розглянуті кілька антен МІМО на частоті нижче 6 ГГц. Так, в роботі [27] була розроблена восьмиелементна структура антени МІМО для спектру частоти 3,5 ГГц. Розроблено симетричну щільну антену з відкритою вилкою та L-подібну фідерну смугу. Ця конфігурація забезпечує ізоляцію  $>17,5$  дБ між елементами антени, але конструкція страждає через низьку ефективність антени. Така ж конфігурація з прямокутним слотом була представлена в статті [28]. Решітки антени МІМО склалися з двох видів антенних елементів для роботи на різних частотах. Два

елементи однакової конфігурації були розміщені у верхньому та нижньому кутах друкованої плати для зв'язку 2G/3G/4G, тоді як вісім елементів, що призначені для роботи на частоті 3,5 ГГц, були розміщені зліва та справа від панелі друкованої плати. В статті [29] розробили восьмипортову широкосмугову антену МІМО на частоті нижче 6 ГГц. Єдина антена системи МІМО складалася з лінії живлення потужністю 50 Вт з розімкнутим контуром налаштування, слотом на металевій рамі та U-подібним слотом на площині заземлення. Антена МІМО може забезпечувати широкосмугову характеристику в діапазоні частот 3,3–6 ГГц. У роботі [30] була представлена монопольна щілинна антена МІМО для діапазонів частоти 2,6/3,5 ГГц. Чотири металеві каркасні антени, що живляться за допомогою L-подібної лінії живлення, були розташовані в середині друкованої плати, тоді як інші елементи були розміщені на верхній і нижній сторонах друкованої плати.

Антенна решітка МІМО у роботі [31] була розроблена для додатків смартфонів 5G на частоті 3,5 ГГц. Масив складався з двох різних варіантів: один був L-подібним масивом із спільним живленням, а інший являв собою U-подібний масив петлі, які були встановлені на металевій рамі смартфона. Для покращення ізоляції автори створили інвертований I-слот і лінію нейтралізації між компонентами антени, що призводить до ізоляції 15 дБ у робочій смузі частот. У роботі [32] розроблено восьмипортову антену МІМО на основі I-подібного елемента для технологій IoT та 5G. Щоб забезпечити простір для додаткових компонентів, металевий каркас телефону було сконструйовано для розміщення компонентів антени. Виявилось, що антена ефективно резонує в діапазоні частот 3,5 ГГц. Антена МІМО забезпечує 13 дБ ізоляції між елементами решітки, з коефіцієнтом підсилення 4 дБі та ефективністю антени понад 40%.

Антенна решітка МІМО [31] була розроблена розроблена для додатків смартфонів 5G на частоті 3,5 ГГц. Масив складався з двох різних способів: один був L-подібним масивом з поєднаним живленням, а інший являв собою U-подібний масив петлі, які були встановлені на металевій рамі смартфона.

Для покращення ізоляції автори створили інвертований I-слот і лінію нейтралізації між компонентами антени, що призводить до ізоляції 15 дБ у робочій смузі частот.

Антенна МІМО з подвійною поляризацією на основі слотів для діамантового кільця [32] була розроблена для масивів МІМО мережі 5G. Чотири слоти з подвійним живленням були розміщені на кожному куті друкованої плати мобільного телефону. Для подачі слотних елементів використовувалася Г-подібна мікросмугова лінія живлення. Розроблений антенний елемент забезпечує стабільне підсилення 3 дБі для смуги >80% випромінювання та загальну ефективність. Крім того, в межах робочого діапазону спостерігалася ізоляція більше 20 дБ.

Така ж конфігурація була використана для розробки антенної решітки МІМО для додатків на частоті нижче 6 ГГц [33]. У представленій конфігурації круглий кільцевий резонатор був витравлений із заземленої площини та живився за допомогою ортогонально розміщених мікросмугових ліній живлення. Автори також розробили багатодіапазонну МІМО-антену, замінивши звичайну мікросмугову лінію живлення на вилкоподібну лінію живлення.

У роботі [34] розроблено восьмипортову антену МІМО на основі I-подібного елемента для технологій IoT та 5G. Щоб забезпечити простір для додаткових компонентів, металевий каркас телефону було сконструйовано для розміщення компонентів антени. Виявилось, що антена ефективно резонує в діапазоні частот 3,5 ГГц. Антенна МІМО забезпечує 13 дБ ізоляції між елементами решітки, з коефіцієнтом підсилення 4 дБі та ефективністю антени понад 40%.

Інтегрована антенна система МІМО [35] розроблена для LTE та міліметрового діапазону частот. Розроблена структура антени складалася з двох елементів для зв'язку LTE і чотирьох елементів для зв'язку 5G на міліметровому діапазоні. Для обох частотних діапазонів використовувався модифікований прямокутний випромінювач. Крім того, дефекти в заземленій

площині були введені за допомогою прямокутних і круглих форм. Розроблений антенний елемент забезпечує резонанс для діапазону частот 5,5 ГГц. Уніпланарна рамкова антенна решітка МІМО під частотою 6 ГГц була розроблена в [36]. Антени організовані таким чином, щоб вони могли запропонувати як поляризацію, так і рознесення діаграм спрямованості. Крім того, покращення ізоляції було досягнуто шляхом створення стрілоподібної смуги між елементами антени.

У роботах [17,18] автори розробили антенну решітку МІМО з копланарним хвилеводом (CPW) для додатків на частоті нижче 6 ГГц. Для конструкції були обрані Г-подібні та Т-подібні випромінювальні елементи. Використовуючи копланарну хвилеводну техніку, було досягнуто ізоляції >15 дБ у усмузі, що нас цікавить.

Вищезазначені антени МІМО мають деякі обмеження з точки зору неплоских конфігурацій, великих розмірів і складних структур. Крім того, ці антени страждають через низьку ефективність випромінювання, що в результаті призводить до поганого підсилення антени. Щоб усунути недоліки раніше опублікованих робіт, це дослідження представляє чотириелементну одноплощинну антенну систему МІМО для смартфонів 5G. Для одиночної антени вибирається елемент у формі петлі. Елементи випромінювання розташовані в кожному куті друкованої плати, що відповідає принципу різноманітності структур і звільняє місце для інших компонентів смартфона. Результати показують, що розроблена антена МІМО забезпечує широкосмугову характеристику у діапазоні частот 3,5 ГГц.

Запланована топологія МІМО має низький взаємозв'язок між антенами, що призводить до низького коефіцієнта кореляції обвідної і високого коефіцієнта підсилення. Крім того, запропонована антена МІМО забезпечує ефективність понад 90%.

## 4.2 Конструкція запропонованої одноплощинної антенної системи МІМО

Запропонована конструкція МІМО-антени на частоті нижче 6 ГГц показана на рисунку 4.1. Для конструкції антени МІМО використовується недорога підкладка FR-4. Товщина підкладки обрана рівною 1,6 мм і має відносну діелектричну проникність 4,4. Для економії місця на друкованій платі для конструкції антени була використана петлеподібна конструкція [39]. На частоті 3,5 ГГц електрична довжина випромінювача приблизно дорівнює  $1\lambda$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі. Таким чином, оптимізована електрична довжина елемента антени становить  $\approx 45,5$  мм, а ширина лінії дорівнює 1 мм. Варто відзначити, що один елемент антени може займати максимальну площу  $14,5 \times 12$  мм<sup>2</sup>.

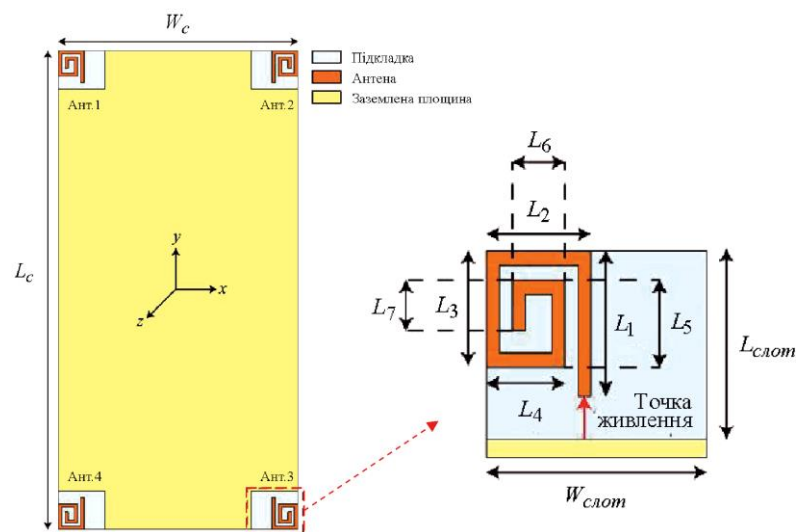


Рисунок 4.1 – Конструкція запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц

Антенна МІМО, показана на рисунку 4.1, складається з чотирьох випромінювачів у формі петлі, розташованих у кожному куті друкованої плати мобільного телефону. Площина заземлення розміщена на одній площині з елементами випромінювання. Параметри конструкції запропонованої антени МІМО показано на рисунку 4.1, а оптимізовані значення наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Оптимізовані параметри антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц (у мм)

L	W	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>
150	75	10	8	8	6
L <sub>5</sub>	L <sub>6</sub>	L <sub>7</sub>	L <sub>слот</sub>	W <sub>слот</sub>	–
6	4	3.5	12	14.5	–

### 4.3 Характеристики одноантенних елементів

Один елемент МІМО розроблено та змодельовано в електромагнітному програмному забезпеченні CST Microwave Studio. Для живлення антенного елемента використовується дискретний порт 50 Вт. На рисунку 4.2 наведено змодельований коефіцієнт відбиття ( $S_{11}$ ) одного елемента антени. Помічено, що елемент антени добре резонує в діапазоні частот 3,5 ГГц і забезпечує широкосмугову характеристику. Відзначено, що ширина смуги імпедансу – 6 дБ і –10 дБ становить 1,28 ГГц (3–4,28 ГГц) і 720 МГц (3,18–3,9 ГГц) відповідно.

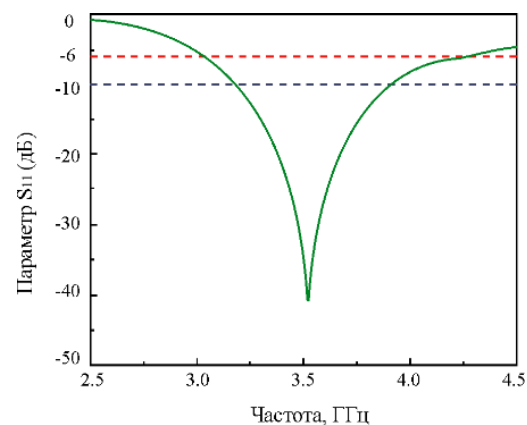


Рисунок 4.2 – Змодельовані характеристики  $S_{11}$  одноантенного елемента

Коефіцієнт відбиття  $S_{11}$  запропонованої антени можна регулювати, змінюючи деякі параметри антени. Для певної конструкції параметри  $W_{\text{слот}}$  і  $L_{\text{слот}}$  мають великий вплив на продуктивність.

Параметр  $W_{\text{слот}}$  відіграє важливу роль у досягненні узгодження імпедансу в діапазоні заданої частоти, тоді як параметр  $L_{\text{слот}}$  можна налаштувати для отримання резонансу для потрібного діапазону частот. Цей ефект чітко видно в результатах на рисунку 4.3, де наведено характеристики  $S_{11}$  розробленої антени для змінних  $W_{\text{слот}}$  і  $L_{\text{слот}}$ .

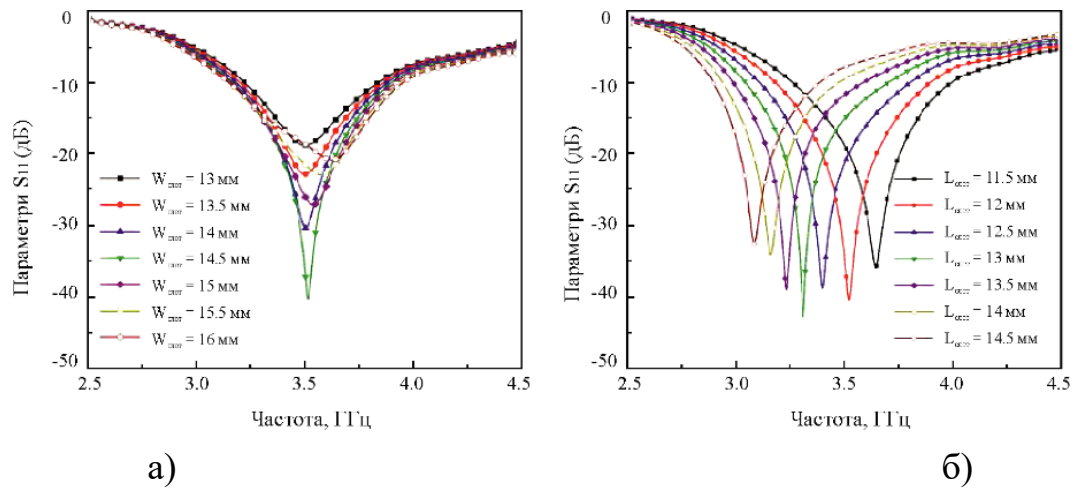


Рисунок 4.3 – Змодельовані характеристики  $S_{11}$  для різних значень: а) –  $W_{\text{слот}}$  і (б) –  $L_{\text{слот}}$

На рисунку 4.3а показані характеристики  $S_{11}$  запропонованої антени для змінних значень параметра  $W_{\text{слот}}$ . З рисунку видно, що параметр  $W_{\text{слот}}$  має значний вплив на узгодження імпедансу. Максимальне узгодження імпедансу спостерігається для  $W_{\text{слот}} = 14,5$  мм, як наведено на рисунку 4.3а. З іншого боку, при зміні значення параметра  $L_{\text{слот}}$  в діапазоні від 11,5 мм до 14,5 мм, спостерігається зсув резонансної частоти, як наведено на рисунку 4.3б. Важливо зазначити, що ці значення мають незначний вплив на характеристики ізоляції антен МІМО.

#### 4.4 Характеристики запропонованої антени МІМО

Змодельовані S-параметри запропонованої антени МІМО показані на рисунку 4.4. З рисунка 4.4 видно, що розроблена антена МІМО добре резонує

для діапазону частот 3,5 ГГц. Крім того, відзначається, що мінімальна ізоляція між сусідніми елементами антени становить понад 10 дБ.

У коефіцієнті відбиття  $S_{11}$  спостерігаються зміни, які в основному відбуваються через точки живлення та різне розташування елементів антени на друкованій платі смартфона, як наведено на рисунку 4.1. Крім того, материнська плата має прямокутну форму, що може спричинити певні розбіжності в частотній характеристикі та зв'язках, переважно між парними та непарними номерами портів. Однак можна налаштувати потрібний діапазон частот, змінюючи параметри конструкції, як це наведено на рисунку 4.3 [40].

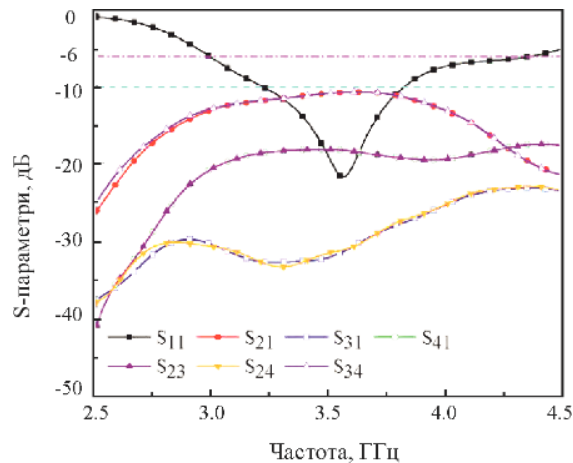


Рисунок 4.4 – Змодельовані S-параметри запропонованої антени MIMO на частоті нижче 6 ГГц

Змодельовані тривимірні (3D) діаграми підсилення розробленої антени представлені на рисунку 4.5. Антена генерує різні вертикальні та горизонтальні поляризовані діаграми спрямованості для вибраного діапазону частот, як показано на діаграмі. Крім того, як показано на рисунку 4.5, коефіцієнт підсилення антени становить  $\sim 3,6$  дБі. Отримані діаграми спрямованості ще більше підтверджують, що антена MIMO підтримує рознесеність діаграм, що є бажаною функцією для майбутніх додатків для смартфонів.

Одним із найважливіших аспектів у визначенні продуктивності антен MIMO є коефіцієнт кореляції. Для практичних застосувань коефіцієнт

кореляції має бути понад 0,5, а в ідеалі він становить  $\approx 0$ . Коефіцієнт кореляції (ЕСС) можна визначити, використовуючи S-параметри системи МІМО як [41]:

$$ECC = \frac{|S_{mm}^* S_{nm} + S_{mn}^* S_{nn}|^2}{(1 - |S_{mm}|^2 - |S_{nn}|^2)(1 - |S_{nm}|^2 - |S_{mn}|^2)}, \quad (4.1)$$

де  $s_{nn}$  та  $S_{mm}$  – коефіцієнти відбиття, а  $S_{mn}$  та  $S_{nm}$  – коефіцієнти передачі антени МІМО.

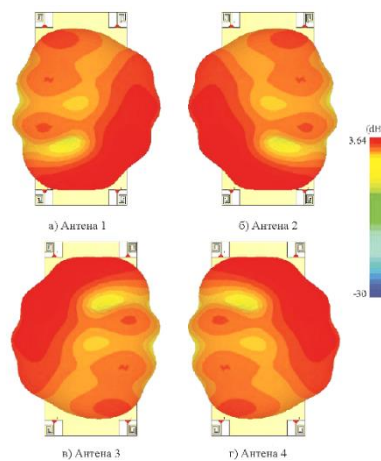


Рисунок 4.5 – Тривимірні діаграми підсилення запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц

Як показано на рисунку 4.6а, значення коефіцієнт кореляції обвідної для передбачуваного діапазону частот (3,5 ГГц) становить  $< 0,01$ . Результати також демонструють високу ізоляцію між елементами антени, що є вирішальним фактором для для одночасного функціонування. Підсилення від рознесеності (DG) запропонованої антени МІМО, з іншого боку, можна розрахувати наступним чином [42]:

$$DG = 10\left(\sqrt{1 - ECC^2}\right). \quad (4.2)$$

Для представленої антени МІМО значення DG становить понад 9,9 дБ, як показано на рисунку 4.6б.

Загальний коефіцієнт активного відбиття (TARC) є ще одним важливим показником, який слід враховувати при оцінці роботи антени МІМО, і його можна визначити наступним чином [43]:

$$TARC = \sqrt{\frac{(S_{mm} + S_{mn})^2 (S_{nm} + S_{nn})^2}{2}}. \quad (..3)$$

Результати демонструють, що запропонована антена МІМО забезпечує TARC понад 20 дБ для встановленого діапазону, як показано на рисунку 4.6в.

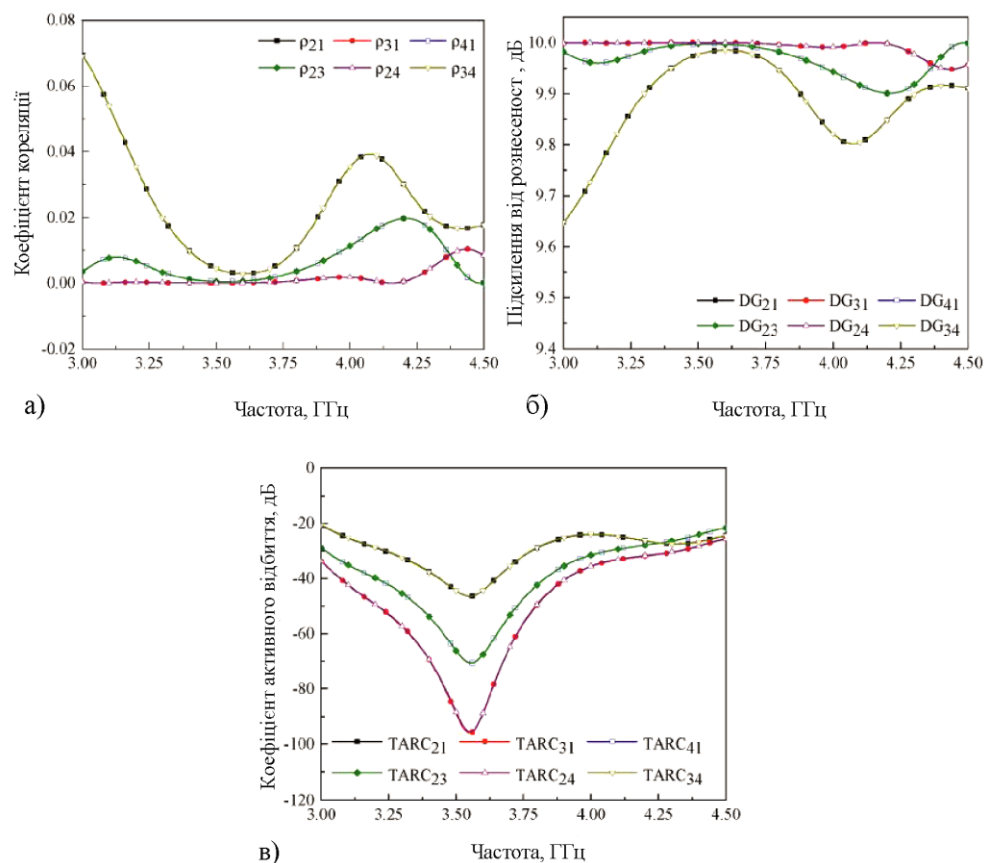


Рисунок 4.6 – Змодельовані результати для запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц: а) – коефіцієнт кореляції обвідної, б) – підсилення від рознесеності і в) – загальний коефіцієнт активного відбиття

#### 4.5 Вимірювання запропонованої антени МІМО

Для живлення використовується гнучкий напівжорсткий радіочастотний кабель. Один кінець кабелю підключається до антени, а другий – до коаксіального роз'єму. Через однакову продуктивність і розташування елементів антени вимірюються та порівнюються лише порти 1 і порти 2.

Змодельовані S-параметри наведено на рисунку 4.7. Змодельована смуга пропускання імпедансу  $-6$  дБ і  $-10$  дБ становить  $1,38$  ГГц ( $2,98$ – $4,36$  ГГц) і  $620$  МГц ( $3,2$ – $3,82$  ГГц) відповідно. Крім того, ізоляція між елементами антени становить  $>10$  дБ (рисунок 4.7) у обраному діапазоні частот.

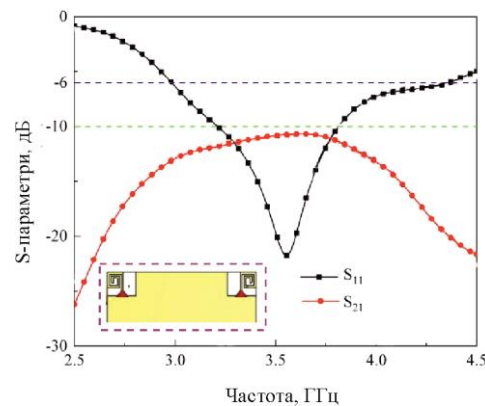


Рисунок 4.7 – S-параметри суміжних елементів антени

Змодельовані результати ECC і TARC наведено на рисунку 4.8. Видно, що змодельовані дані узгоджуються один з одним. Значення ECC для обраного діапазону частот становить  $<0,08$ , як показано на рисунку 4.8а. Окрім цього, значення TARC для робочого діапазону становить  $20$  дБ, як показано на рисунку 4.8б.

Змодельоване підсилення для порту-1 наведено на рис. 4.9а. Коефіцієнт підсилення вимірюється живленням порту-1, тоді як порт-2 за допомогою узгодженого навантаження  $50$  Вт. Середнє змодельоване підсилення на порту 1 становить  $4$  дБі (рис. 4.9а). Змодельоване підсилення коливається в діапазоні від  $2$  до  $4,75$  дБі. Результати випромінювання та загальної ефективності для порту-1 наведено на рис. 4.9б. Помічено, що розроблена антена має ефективність випромінювання понад  $90\%$ , при цьому загальний ККД

коливається в межах 70–95%. На рис. 4.9б слід звернути увагу на те, що розроблена антена забезпечує постійну ефективність випромінювання в обраному діапазоні частот.

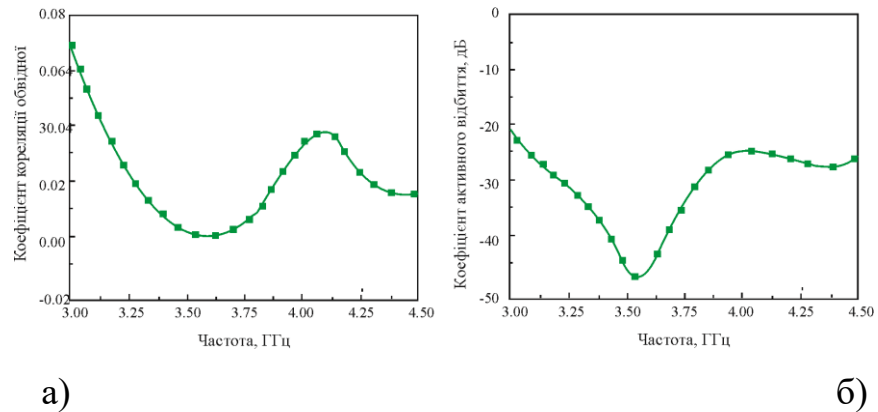


Рисунок 4.8 – Змодельований а) – коефіцієнт кореляції обвідної і

б) загальний коефіцієнт активного відбиття суміжних елементів антени

Змодельовані характеристики випромінювання порту-1 для частот 3,2 ГГц, 3,5 ГГц і 3,9 ГГц наведено на рис. 4.8. Розроблена антена МІМО забезпечує квазівсеспрямовані характеристики випромінювання як для площини  $yz$ , так і для площини  $xz$  на заданих частотах. Крім того, антена МІМО забезпечує рознесення діаграм спрямованості в площині  $xz$ , як показано на рисунках 4.10 і 4.11. Крім того, результати вимірювань добре узгоджуються з даними моделювання для обох площин

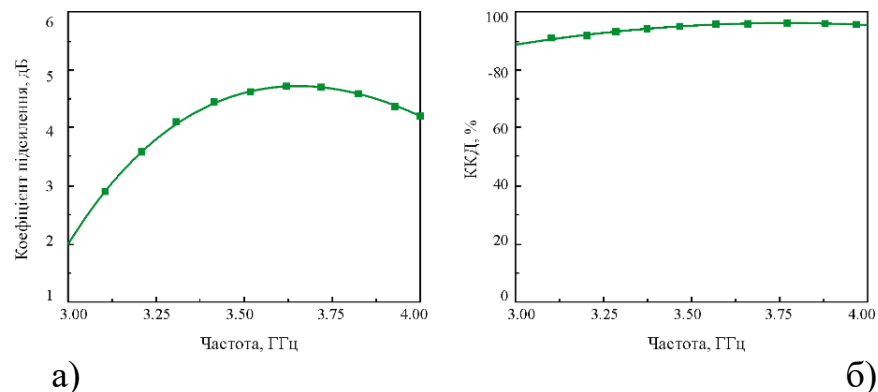


Рисунок 4.9 – Змодельовані: а) – коефіцієнт підсилення, і б) – загальна ефективність запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц, коли порт-1 активний

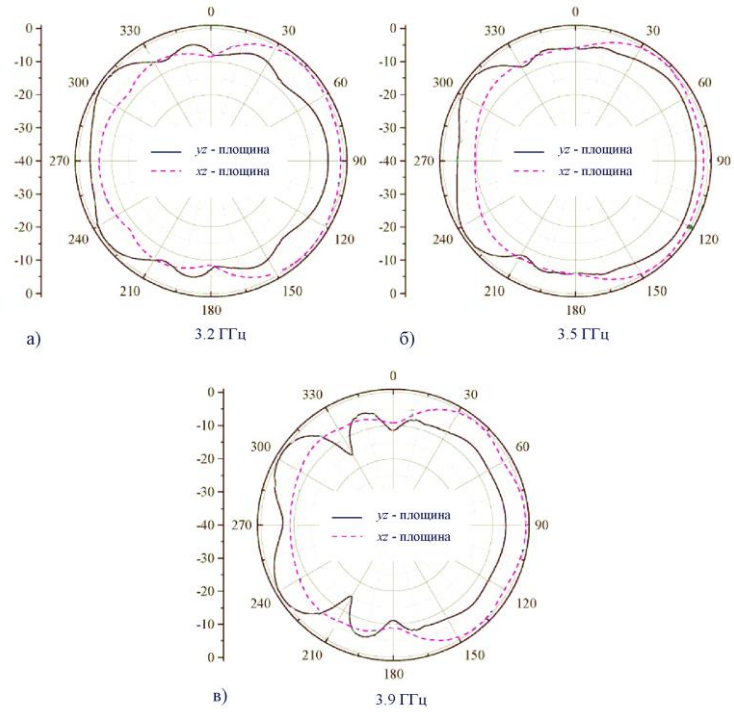


Рисунок 4.10 – Характеристики випромінювання запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц, коли порт 1 активний

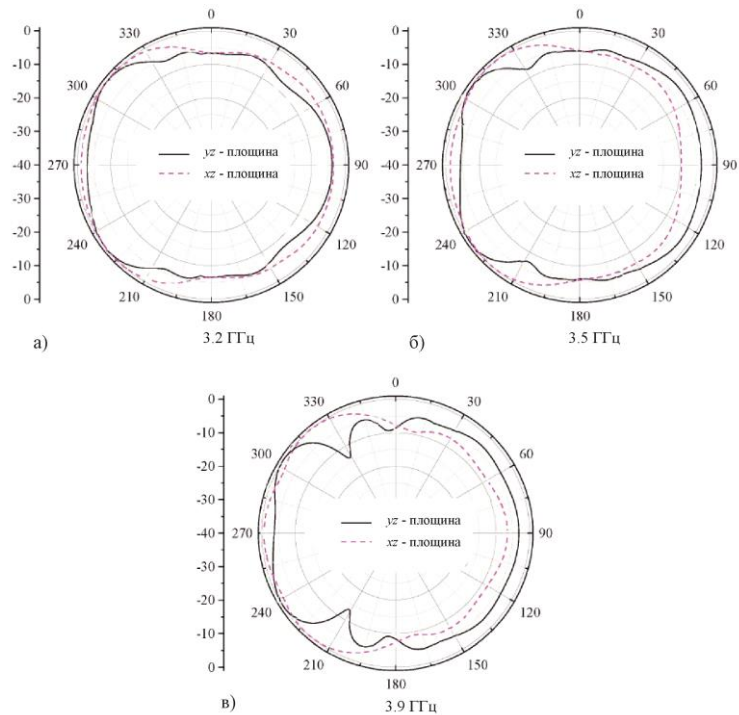


Рисунок 4.11 – Характеристики випромінювання запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц, коли порт 1 активний

#### 4.6 Вплив користувача на характеристики антени

Розглядається вплив користувача на роботу антени МІМО, яка оцінюється за допомогою S-параметрів та ефективності випромінювання. Ефективність антени МІМО оцінюється за наявності однієї та двох рук користувача, як показано на рисунку 4.12а,б.

Розроблена МІМО-антена має відповідні коефіцієнти відбиття в області рук людини, як показано на рисунку 4.13а,б. Для випадку з однією рукою між елементами антени спостерігається ізоляція  $>10$  дБ, як показано на рисунку 14а, тоді як для випадок двох рук, ізоляція  $>15$  дБ (див. рисунок 4.14б). Крім цього, на рисунку 4.15а,б, можна помітити, що ефективність елементів антени ККД погіршився. У випадку роботи однією рукою зниження ефективності випромінювання відзначається для Антени-1 і Антени-3, тоді як для випадку двох рук Антена-1 і Антена-3 забезпечують меншу ефективність випромінювання. Це пов'язано з особливостями тканин людського тіла (пальців біля антени), які можуть поглинати велику потужність випромінювання антени [44]. Загалом запропонована антена МІМО забезпечує ефективність випромінювання в діапазоні 39–68% для обох випадків для бажаного діапазону частот.

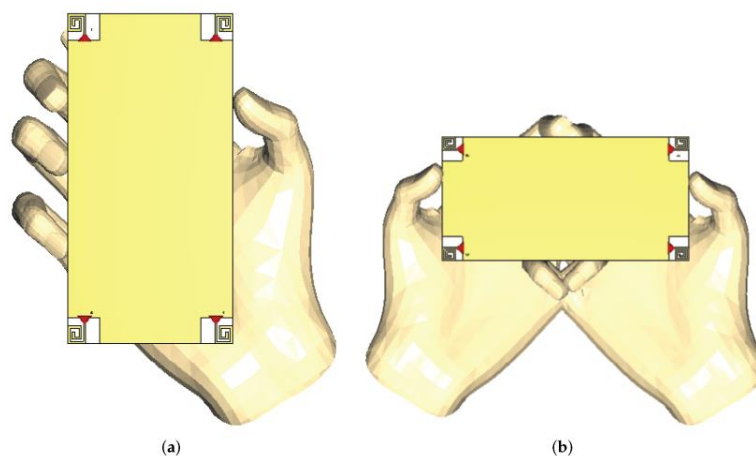


Рисунок 4.12 – Розміщення масиву МІМО для випадків: а) – однієї руки та б) – двох рук

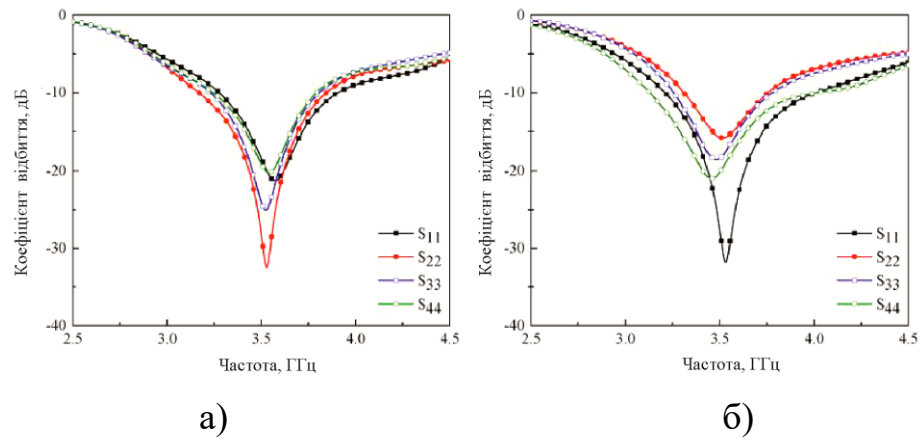


Рисунок 4.13 – Коефіцієнти відбиття запропонованої антени МІМО для випадків а) – однієї руки та б) – двох рук

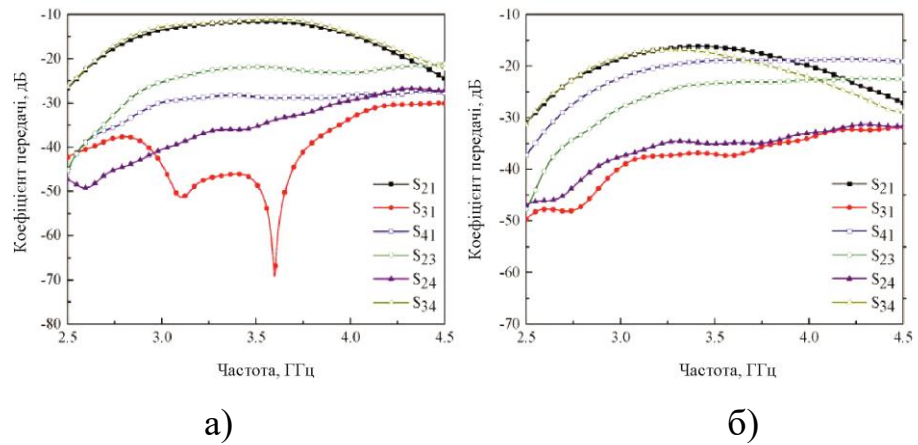


Рисунок 4.14 – Коефіцієнти передачі запропонованої антени МІМО для випадків: а) – однієї руки та б) – двох рук

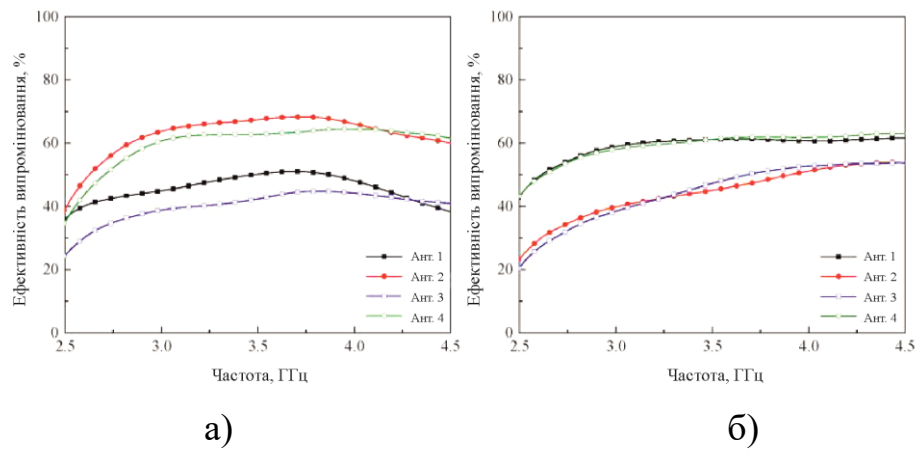
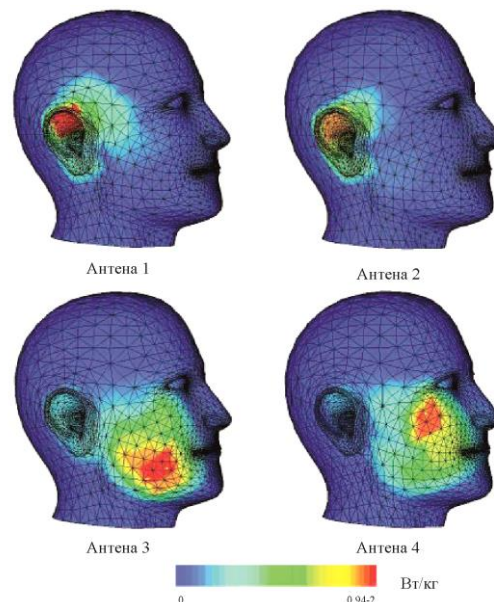


Рисунок 4.15 – Ефективність випромінювання запропонованої антени МІМО для випадків: а) – однієї руки та б) – двох рук

Для антен, що використовуються в смартфонах, одне з найважливіших питань є питомий коефіцієнт поглинання (SAR) [13,25]. Питомий коефіцієнт поглинання – це параметр, який вимірює кількість електромагнітних хвиль, які поглинає людський організм [46-50].

Характеристики SAR для голови користувача досліджуються та відображаються на рисунку 4.16. Мінімальний SAR становить 0,94 Вт/кг для Антени 2, тоді як максимальне значення SAR становить 2 Вт/кг для Антени 3. Зазначається, що чим ближче елементи до фантома голови, тим вище значення SAR, і навпаки.



Рисуно 4.16 – Аналіз коефіцієнта питомого поглинання під час використання антени МІМО у режимі розмови

#### 4.7 Висновки до четвертого розділу

У цьому розділі була представлена одноплщинна конструкція антени МІМО для мобільних телефонів із підтримкою 5G з частотою нижче 6 ГГц. Чотири випромінювачі у формі петлі були розроблені в кожному куті плати смартфона, і всі вони відповідали конструкції налаштування різноманітності шаблонів.

Оцінка антени MIMO включала аналіз різних функцій, включаючи S-параметри, діаграми підсилення, випромінювання та загальну ефективність. Були досліджені критичні показники, такі як коефіцієнт кореляції обвідної, загальний коефіцієнт активного відбиття та посилення рознесення.

Отримані результати свідчать про те, що представлена антенна система MIMO відповідає вимогам та критеріям мобільних телефонів з підтримкою 5G. Ця антенна конструкція має потенціал для високошвидкісного бездротового зв'язку та підвищеної продуктивності, що робить її обіцяючим рішенням для майбутніх мобільних технологій.

## ВИСНОВКИ

Еволюція мобільного зв'язку, що призвела до народження 5G технологій, є останнім кроком у розвитку бездротового зв'язку та відзначається вражаючими можливостями, такими як висока швидкість передачі даних, низька затримка та збільшена ємність мережі. Ці можливості відкривають двері для нових сценаріїв використання, таких як розумні міста, автономні автомобілі та Інтернет речей.

Розглянуті важливі параметри та показники, які визначають ефективність та функціонування антен MIMO (множинного введення, множинного виведення). Досліджено параметри рознесення, такі як коефіцієнт кореляції обвідної (ECC) та загальний активний коефіцієнт відбиття (TARC), що вказують на взаємодію між різними антенними портами, а також досліджена пропускна здатність каналу та інші параметри, що впливають на продуктивність та якість сигналу в системах MIMO. Обговорено переваги антен MIMO порівняно з традиційними антенними системами SISO, MISO та SIMO, що робить технологію MIMO важливою для поліпшення бездротового зв'язку та надання якісних послуг у сучасних мобільних мережах.

Розглянуто різні аспекти проектування антен MIMO для систем 5G. Розглянуто різні методи ізоляції та проведено порівняння їх характеристик. Визначено, що проектування таких антен вимагає уважності до різних аспектів та може варіюватися в залежності від вимог системи. Огляд також вказує на перспективи розвитку антен MIMO, зокрема для широкосмугових, реконфігурованих та багатодіапазонних антен. Наголошується на важливості покриття діапазону частот FR-1 і FR-2 для систем 5G, і відзначено, що дослідження та розробки в цій області можуть сприяти поліпшенню характеристик антен MIMO та продуктивності мережі 5G в майбутньому.

Представлено нову конструкцію антени MIMO з випромінювачами з ортогональною подвійною поляризацією для смартфонів 5G. Її конфігурація

використовує вісім портів/чотири випромінювачі модифікованих круглих кільцевих випромінювачів, розташованих на чотирьох краях материнської плати мобільного телефону. Частота роботи випромінювачів становить від 3,3 до 3,9 ГГц з резонансом 3,6 ГГц. Досліджуються фундаментальні властивості конструкції антени смартфона, включаючи S-параметр, ефективність, діаграми спрямованості, результати ECC і TARC. Зразок прототипу розробленої МІМО-антени було виготовлено та надано її вимірювання.

Крім того, в роботі наведені характеристики антени в присутності користувача. Конфігурація антени проста і легка для виготовлення за допомогою технології друкованих схем. Результати показали, що антена має достатні характеристики, що відповідають вимогам для використання в мобільних телефонах 5G.

Використовуючи нову техніку живлення, запропонована антенна решітка смартфона також може генерувати дво- або багатодіапазонну характеристику. Крім того, завдяки наявності вільного простору в конструкції антени смартфона, компактну мм-хвильову фазовану антену з широкою смугою пропускання та кінцевими пучками випромінювання можна легко опитувати на антені смартфона 5G.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Nadeem, Q.-U.-A., Kammoun, A., Debbah, M., et al.: ‘Design of 5G full dimension massive MIMO systems’, *IEEE Trans. Commun.*, 2018, 66, pp. 726–740
2. 5G Americas. Understanding Millimeter Wave Spectrum for 5G Networks. Available online: (accessed on 26 May 2023).
3. Ericsson. Mobile Subscriptions Forecast—Mobility Report. Available online: (accessed on 23 February 2023).
4. Kapoor, A.; Kumar, P.; Mishra, R. High gain modified Vivaldi vehicular antenna for IoV communications in 5G network. *Heliyon* 2022, 8, E09336
5. Ericsson, “Cellular networks for Massive IoT [Whitepaper],” January 2020. [Online]. Available: [https://www.ericsson.com/48ff1f/assets/local/reports-papers/white-papers/massive\\_iot\\_whitepaper.pdf](https://www.ericsson.com/48ff1f/assets/local/reports-papers/white-papers/massive_iot_whitepaper.pdf). [Accessed 10 September 2020].
6. D. Brin, “The Case for Wideband Transmission: Wideband Channels From Macroeconomics to Standardization (Whitepaper),” Ceragon, 2020.
7. Ceragon, “Can 5G hauling capacity requirements be satisfied only by a mmW solution?,” August 2020. [Online]. Available: <https://www.ceragon.com/blog/can-5g-hauling-capacity-requirements-be-satisfied-only-by-mmw-solution>.
8. NEC, “NEC develops millimeter-wave distributed antenna radio unit improving the channel quality for indoor 5G applications (Press Release),” January 2020. [Online]. Available: [https://www.nec.com/en/press/202001/global\\_20200124\\_01.html](https://www.nec.com/en/press/202001/global_20200124_01.html).
9. Ofcom, “An assessment of the effects of repeaters on mobile networks,” Nov. 2015. [Online]. Available: <https://www.ofcom.org.uk/research-and-data/technology/telecoms/effects-of-repeaters-on-mobile-networks>.
10. Pivotal Commware, “Reducing 5G Deployment Costs Using Holographic Beam,” [Online]. Available: <https://pivotalcommware.com/wp-content/uploads/2020/05/Reducing-5G-Deployment-Costs-Using-Holographic-Beam-Forming-Repeaters-from-Pivotal-Commware-May-2020-FINAL.pdf>.

11. Pivotal Commware, “What Is Holographic Beamforming?,” [Online]. Available: <https://pivotalcommware.com/technology/>. [Accessed 10 Sep. 2020].
12. Techplayon, “What is RRH (Remote Radio Head), How it is connected to BBU (Base Band Unit)?,” July 2017. [Online]. Available: <http://www.techplayon.com/rrh-remote-radio-head-connected-bbu-base-band-unit/>.
13. Keysight Technologies, “O-RAN for 5G: The Path Forward Webinar,” May 2020. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/us/en/events/america/webinars.html>.
14. “Researchgate: Analog Beamforming Archtiecture image,” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/figure/Analog-beamforming-architecture>.
15. I. Stepanets, G. Forkin and A. Müller, “Beamforming Techniques Performance,” March 2019.
16. 5G Americas, “Advanced Antenna Systems for 5G (Whitepaper),” 2019. [Online]. Available: [https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/08/5G-Americas\\_Advanced-Antenna-Systems-for-5G-White-Paper.pdf](https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/08/5G-Americas_Advanced-Antenna-Systems-for-5G-White-Paper.pdf).
17. ZTE, “BeamHop: A New Member of LTE Base Station Family,” November 2012.
18. “RF GlobalNet Guest Column by Dave Corman, Anokiwave: “A Comprehensive Guide To Active Antennas (Or, “Beamforming 101”),” July 2018.
19. IWPC, “5G Millimeter Wave Frequencies and Mobile Networks v2,” 2020. [Online]. Available: <https://www.iwpc.org/WhitePaper.aspx>.
20. M. Rutschlin, “The Simula Blog: 5G Antenna Design for Mobile Phones,” Mar. 2020.
21. O. Castañeda, S. Jacobsson, G. Durisi, T. Goldstein and C. Studer, “High-Bandwidth Spatial Equalization for mmWave Massive MU-MIMO With Processing-in-Memory,” 2020 May.
22. B. Murmann, “ADC Performance Survey 1997-2020 (ISSCC & VLSI Symposium),” Aug. 2020. [Online]. Available: <https://web.stanford.edu/~murmann/adcsurvey.html>.

23. J. Preez and S. Sinha, "Millimeter-Wave Power Amplifiers, 1st ed.," New York, Springer, 2017, p. 371.
24. I. Pyatin, J. Boiko, O. Eromenko and I. Parkhomey, "Implementation and analysis of 5G network identification operations at low signal-to-noise ratio," in TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control), vol. 21, no. 3, pp. 496-505, June 2023, <http://doi.org/10.12928/telkomnika.v21i3.22893>.
25. Y. Huang, S. Liu, C. Zhang, X. You and H. Wu, "True-data testbed for 5G/B5G intelligent network," in Intelligent and Converged Networks, vol. 2, no. 2, pp. 133-149, June 2021, <http://doi.org/10.23919/ICN.2021.0002>.
26. J. Boiko, I. Pyatin and O. Eromenko, "Analysis of Signal Synchronization Conditions in 5G Mobile Information Technologies," in 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2022, pp. 01-06, <https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9766899>.
27. Y. Jo, H. Kim, J. Lim and D. Hong, "Self-Optimization of Coverage and System Throughput in 5G Heterogeneous Ultra-Dense Networks," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 9, no. 3, pp. 285-288, March 2020, <http://doi.org/10.1109/LWC.2019.2952859>.
28. A. Kumar, "Detection in 5G Mobile Communication System Using Hybrid Technique," National Academy Science Letters, vol. 44, pp. 39-42, Feb. 2021, <https://doi.org/10.1007/s40009-020-00962-8>.
29. X. Zhang, X. Zhang and Z. Jin, "Big Data Technology Driven 5G Network Optimization Analysis," in Cyber Security Intelligence and Analytics. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 172, Springer, Cham, Apr. 2023, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-31860-3\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-31860-3_16).
30. J. Boiko, I. Pyatin and O. Eromenko, "Design and evaluation of the efficiency of channel coding LDPC codes for 5G information technology," in Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI), vol 9, no. 4, pp. 867-879, Dec. 2021, <http://doi.org/10.52549/ijeai.v9i4.3188>.

31. Y. Li, C. -Y. -D. Sim, Y. Luo and G. Yang, "High-Isolation 3.5 GHz Eight-Antenna MIMO Array Using Balanced Open-Slot Antenna Element for 5G Smartphones," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 6, pp. 3820-3830, June 2019, <http://doi.org/10.1109/TAP.2019.2902751>.
32. R. Ullah, S. Ullah, R. Ullah, F. Faisal, I. B. Mabrouk and M. J. A. Hasan, "A 10-Ports MIMO Antenna System for 5G Smart-Phone Applications," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 218477-218488, 2020.
33. X. Zhang, Y. Li, W. Wang and W. Shen, "Ultra-Wideband 8-Port MIMO Antenna Array for 5G Metal-Frame Smartphones," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 72273-72282, 2019, , <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919622>.
34. C. Deng and X. Lv, "Eight-element MIMO Antenna with Tightly-arranged Pairs for 5G Mobile Terminal," in *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, Atlanta, GA, USA, 2019, pp. 705-706.
35. W. Jiang, B. Liu, Y. Cui and W. Hu, "High-Isolation Eight-Element MIMO Array for 5G Smartphone Applications," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 34104-34112, 2019, <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2904647>.
36. M. Abdullah, S. H. Kiani and A. Iqbal, "Eight Element Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Antenna for 5G Mobile Applications," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 134488-134495, 2019, <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2941908>.
37. J. Boiko, O. Polikarovskiykh and V. Tkachuk, "Development and modeling of the antenna system the direction finder unmanned aerial vehicle," in *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, vol. 13, no. 1, pp. 26-32, March 2023, <https://doi.org/10.35784/iapgos.3239>.
38. U. Ahmad et al., "MIMO Antenna System With Pattern Diversity for Sub-6 GHz Mobile Phone Applications," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 149240-149249, 2021, <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3125097>.
39. S. A. Pogarsky and D. V. Mayboroda, "A Broadband Patch Antenna Based on a Planar Unclosed Annular Radiator," in *Radio Physics and Radio Astronomy*, vol 28, no. 2, pp. 158-165, Feb. 2023.

40. I. Kovtun, J. Boiko and S. Petrashchuk, "Nondestructive strength diagnostics of solder joints on printed circuit boards," in 2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, 2017, pp. 1-4.
41. J. Mazloun, S. A. Ghorashi, M. Ojaroudi, and N. Ojaroudi, "Compact Triple-Band S-Shaped Monopole Diversity Antenna for MIMO Applications", in *ACES Journal*, vol. 30, no. 09, pp. 975–980, Aug. 2021.
42. A. Kumar, A.Q. Ansari, B.K. Kanaujia and J. Kishor, "High isolation compact four-port MIMO antenna loaded with CSRR for multiband applications," in *Frequenz*, vol. 72, pp. 415–427, Apr. 2018.
43. S. I. Naqvi et.al., "Integrated LTE and Millimeter-Wave 5G MIMO Antenna System for 4G/5G Wireless Terminals," in *Sensors*, vol. 20, no. 14, pp. 3926, Jul. 2020, <https://doi.org/10.3390/s20143926>.
44. N. O. Parchin, H. J. Basherlou, Y.I.A. Al-Yasir and R.A. Abd-Alhameed, "A broadband multiple-input multiple-output loop antenna array for 5G cellular communications," in *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 127, pp. 153476, Dec. 2020.
45. N. O. Parchin, Y. I. A. Al-Yasir, A. M. Abdulkhaleq, H. J. Basherlou, A. Ullah and R. A. Abd-Alhameed, "A New Broadband MIMO Antenna System for Sub 6 GHz 5G Cellular Communications," in 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 2020, pp. 1-4, <https://doi.org/10.23919/EuCAP48036.2020.9135546>.
46. I. Parkhomey, J. Boiko, N. Tsopa, I. Zeniv and O. Eromenko, "Assessment of quality indicators of the automatic control system influence of accident interference," in *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 18, no. 4, pp. 2070-2079, Aug. 2020, <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v18i4.15601>.
47. M.S. Sharawi, "Printed multi-band MIMO antenna systems and their performance metrics [wireless corner]," in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 55, pp. 218-232, Oct. 2013.

48. J. Boiko, O. Polikarovskiykh, V. Tkachuk, H. Yehoshyna and L. Karpova, "Design Concepts for Mobile Computing Direction Finding Systems," in *Mobile Computing and Sustainable Informatics. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 166. Springer, Singapore, May 2023, [https://doi.org/10.1007/978-981-99-0835-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-99-0835-6_7)

49. I. Elfergani, A.S. Hussaini, J. Rodriguez and R.A. Abd-Alhameed, "Recent Advances in Antenna Design for 5G Heterogeneous Networks," in *Electronics*, vol.11, no.146, Jan. 2022, <https://doi.org/10.3390/electronics11010146>.

50. Бойко Ю.М., Карпова Л.В., Семенюк В.О. Високорівнева одноплосинна антена мімо для девайсів 5G //Вісник Хмельницького національного університету. – 2023. - №5, Том.1. – С. 40-46.

## **ДОДАТКИ**

# ДИПЛОМНА РОБОТА

## СИНТЕЗ АНТЕНИ ВИСОКОГО РІВНЯ МІМО ДЛЯ ДЕВАЙСІВ 5G З ОБМЕЖЕНИМ ПРОСТОРОМ

Виконав:  
здобувач 2 курсу, група ТРм-22-1  
**Віталій СЕМЕНЮК**

Науковий керівник:  
д-р техн. наук, професор  
**Юлій БОЙКО**

ФАКУЛЬТЕТ  
ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра  
телекомунікацій,  
медійних та  
інтелектуальних  
технологій



5G



## АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ:

полягає в необхідності розробки та оптимізації антенних систем MIMO для сучасних смартфонів з підтримкою технології 5G.

## МЕТА РОБОТИ:

аналіз та вдосконалення конструкції антенної системи MIMO для смартфонів з підтримкою технології 5G на частоті нижче 6 ГГц.

## ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ:

антенна система MIMO для смартфонів з підтримкою технології 5G на частоті нижче 6 ГГц.

## ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ:

конструкція та параметри одноплощинної антенної системи MIMO для смартфонів з підтримкою 5G на частоті нижче 6 ГГц, включаючи вивчення її характеристик, продуктивності та впливу взаємодії з руками та головою користувача.

## MIMO

**Multiple-Input Multiple-Output** - це ефективний спосіб підвищити ефективність використання спектру та збільшити пропускну здатність каналу

Для досягнення мети використані **методи** множинного доступу в бездротовому зв'язку для передачі даних від одного пристрою до іншого через радіоресурси.





MIMO

# НАУКОВА НОВИЗНА

отриманих результатів

- **представлено нову конструкцію одноплощинної антенної системи MIMO для смартфонів 5G, що базується на розташуванні чотирьох випромінювачів у формі петлі в кутах плати мобільного телефону.**
  - Вдалося досягнути оптимальних характеристик антенних елементів, зокрема пікового підсилення 3,64 дБі та ефективності антени понад 90% для одного антенного елемента.
  - Проведено дослідження впливу взаємодії антени MIMO з руками та головою користувача на її продуктивність, що розширює знання про фактори, що впливають на зв'язок.
  - Враховуючи особливості 5G мереж та потребу у багатонаправленому зв'язку, розроблена антенна система забезпечує відповідне покриття випромінюванням для підтримки різних сторін плати мобільного телефону.



# Аналіз досліджень та їх порівняння з експериментальними даними

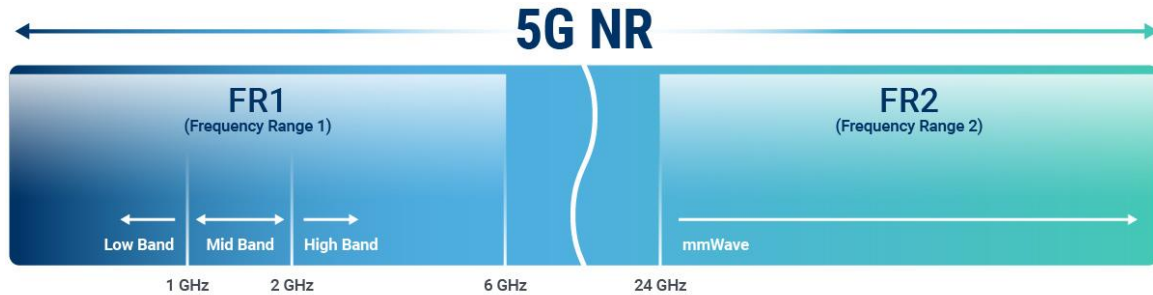


Рис. – Спектр частот 5G NR FR1 та FR2

Розглянуті антени **MIMO** для смартфонів 5G, які працюють на частотах нижче 6 ГГц, мають такі **ОБМЕЖЕННЯ**:

- великі і складні за конструкцією;
- мають проблеми з ефективністю випромінювання та підсиленням сигналу

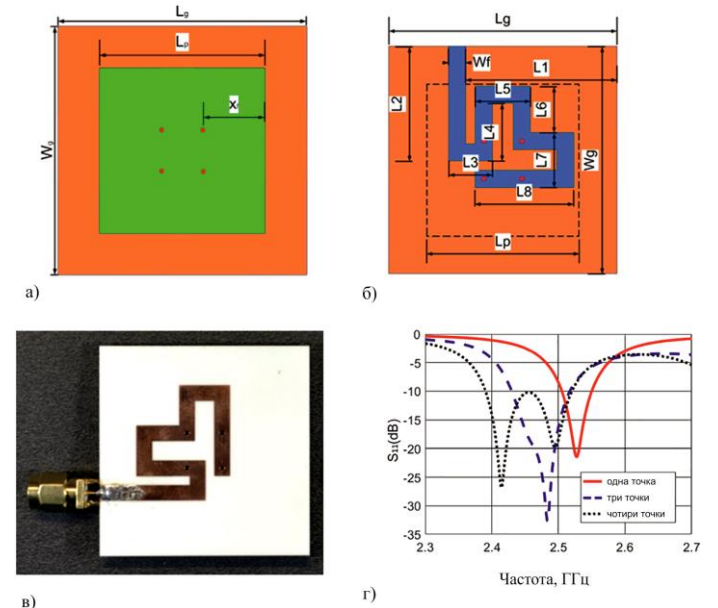
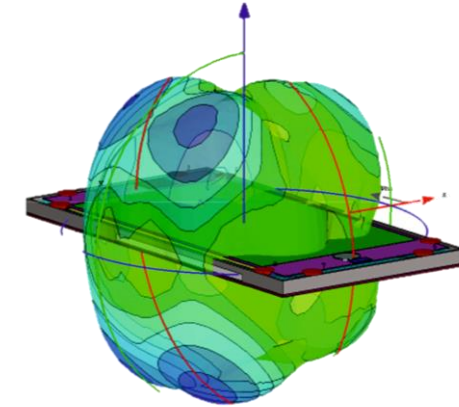
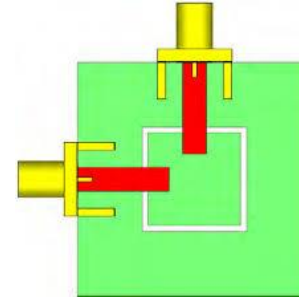
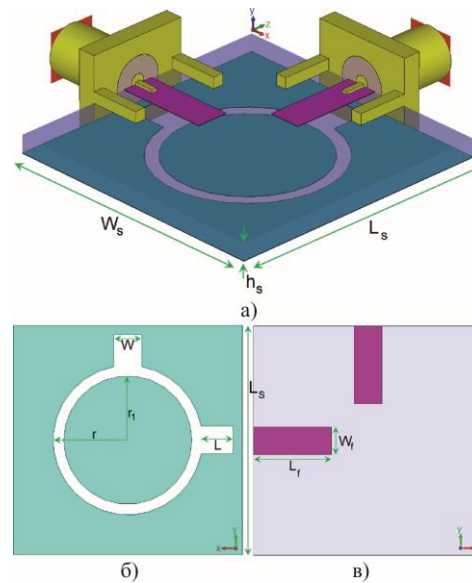


Рис. – Геометрія відомих одноелементної антени

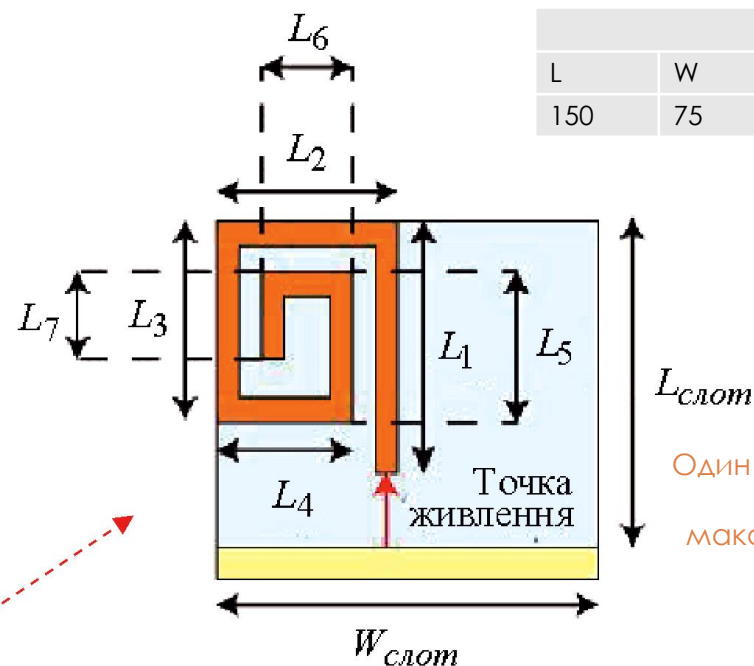
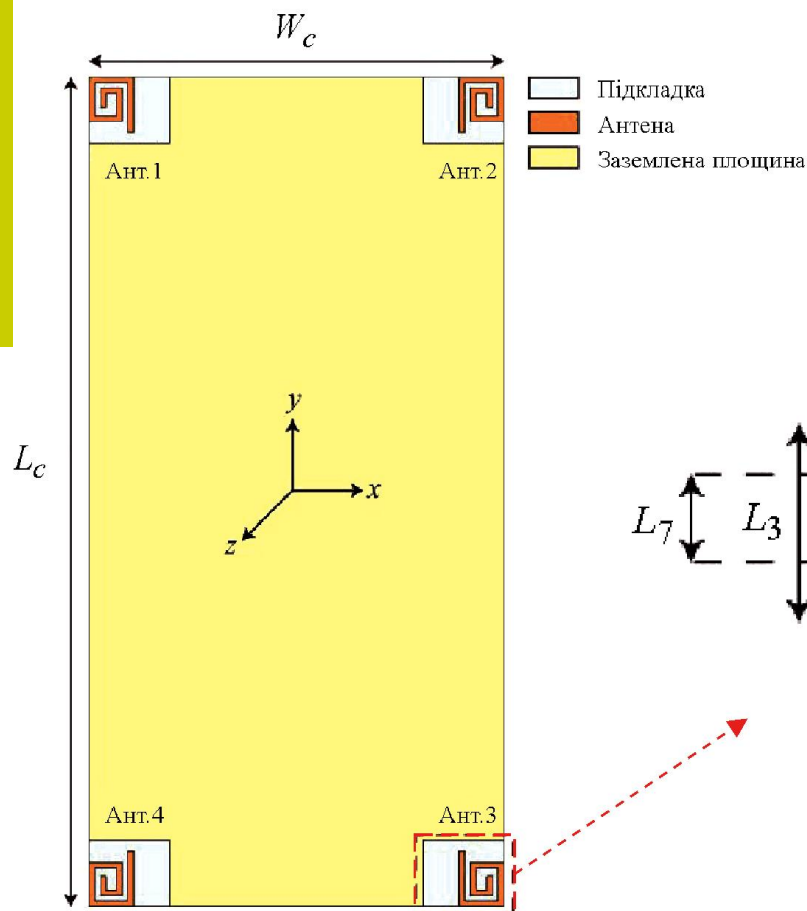
# КОНСТРУКЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ ОДНОПЛОЩИННОЇ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ МІМО



Конфігурація антени проста і легка для виготовлення за допомогою технології друкованих схем

Таблиця 1 – Оптимізовані параметри антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц

Оптимізовані параметри антени, мм										
L	W	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>	L <sub>6</sub>	L <sub>7</sub>	L <sub>слот</sub>	W <sub>слот</sub>
150	75	10	8	8	6	6	4	3.5	12	14.5



Один елемент антени може займати максимальну площу **14,5 x 12 мм<sup>2</sup>**

Антенна МІМО складається з чотирьох випромінювачів у формі петлі, які розташовані у кожному куті плати мобільного телефону, що дозволяє досягнути рознесення діаграм спрямованості

Рис. 1 – Конструкція запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц

Конструкція антени МІМО з випромінювачами з ортогональною подвійною поляризацією для смартфонів 5G

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОАНТЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ



Коефіцієнт відбиття  $S_{11}$  антени можна регулювати, змінюючи деякі параметри антени

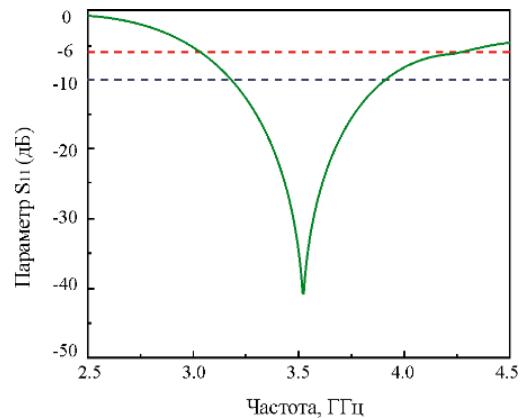


Рис. 2 – Змодельовані характеристики  $S_{11}$  одноантенного елемента

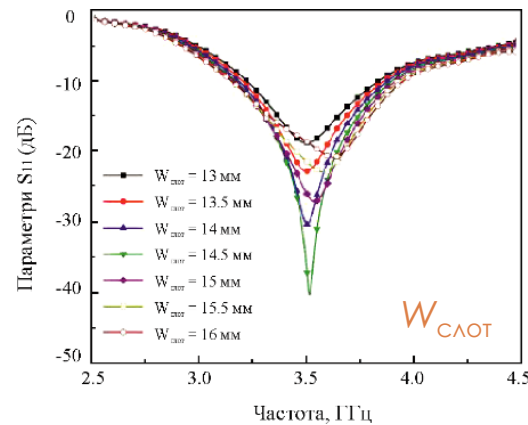


Рис. 3 – Змодельовані характеристики  $S_{11}$  для різних значень  $W_{\text{слот}}$  і  $L_{\text{слот}}$

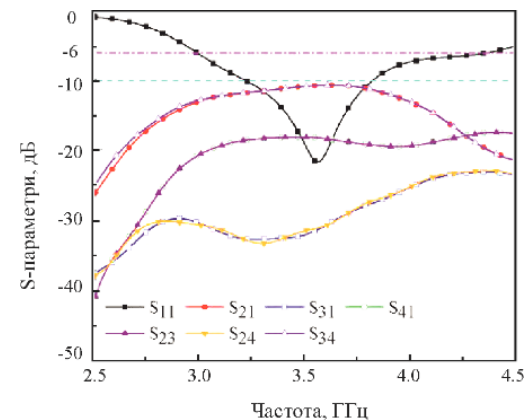
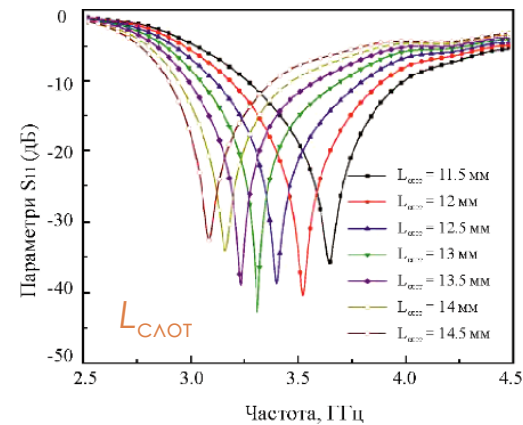


Рис. 4 – Змодельовані S-параметри запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц

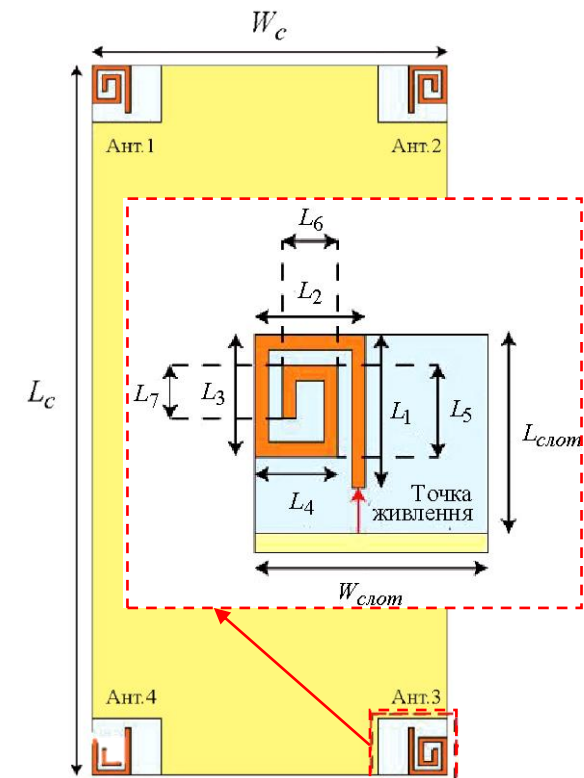


Рис. 1 – Конструкція запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц

Ширина смуги імпедансу:

- -6 дБ на частотах від 3 ГГц до 4,28 ГГц
- -10 дБ від 3,18 ГГц до 3,9 ГГц.

Для живлення антенного елемента використовується дискретний порт 50 Вт

Один елемент антени добре резонує в діапазоні частот 3,5 ГГц і забезпечує широкосмугову характеристику

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАПРОПОНОВАНОЇ АНТЕНИ МІМО НА ЧАСТОТІ НИЖЧЕ 6 ГГц

Коефіцієнт кореляції обвідної

$$ECC = \frac{|S_{mm}^* S_{nm} + S_{mn}^* S_{nn}|^2}{(1 - |S_{mm}|^2 - |S_{nn}|^2)(1 - |S_{nm}|^2 - |S_{mn}|^2)} \quad (1)$$

де  $S_{nn}$  та  $S_{mm}$  – коефіцієнти відбиття,  
а  $S_{mn}$  та  $S_{nm}$  – коефіцієнти передачі

Підсилення від рознесеності

$$DG = 10 \left( \sqrt{1 - ECC^2} \right) \quad (2)$$

Загальний коефіцієнт активного відбиття

$$TARC = \sqrt{\frac{(S_{mm} + S_{mn})^2 (S_{nn} + S_{nm})^2}{2}} \quad (3)$$

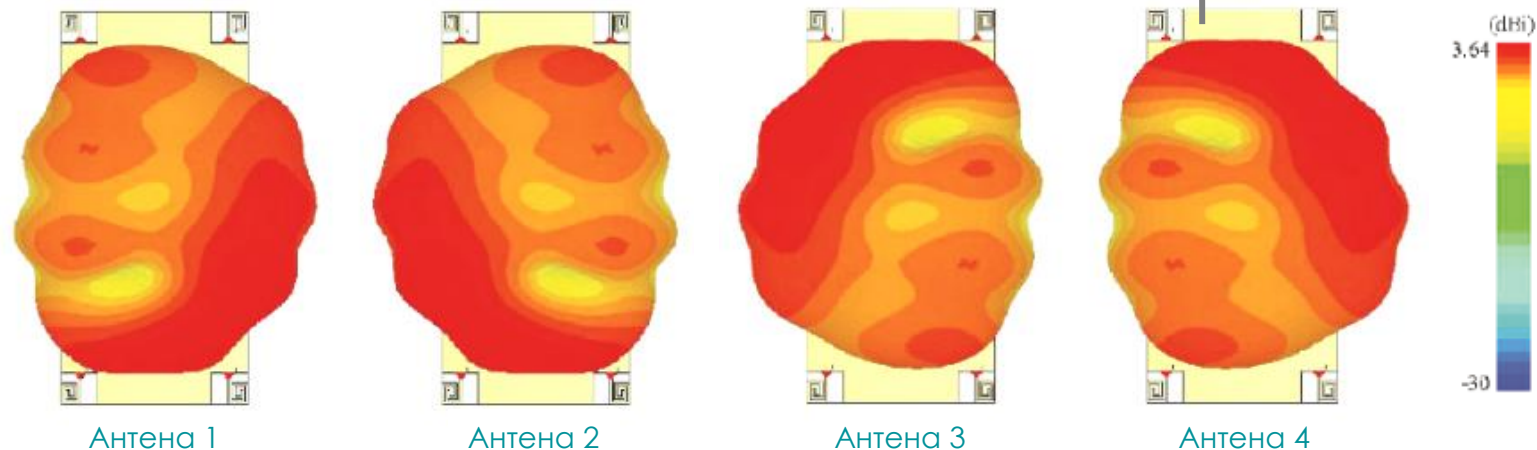


Рис. 5 – Тривимірні діаграми підсилення антени МІМО

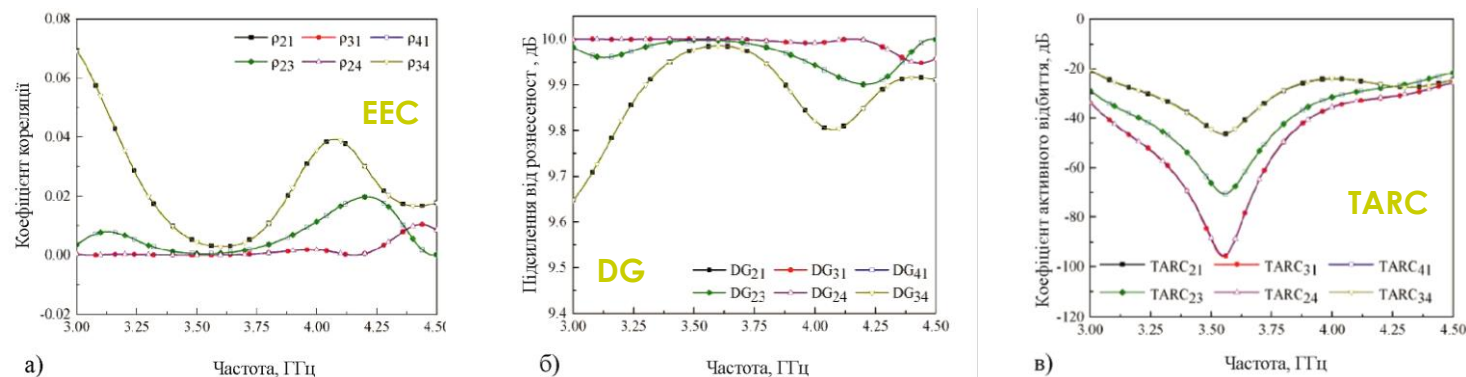


Рис. 6 – Змодельовані результати для запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц: а) – коефіцієнт кореляції обвідної, б) – підсилення від рознесеності і в) – загальний коефіцієнт активного відбиття

# ВИМІРЮВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ АНТЕНИ МІМО

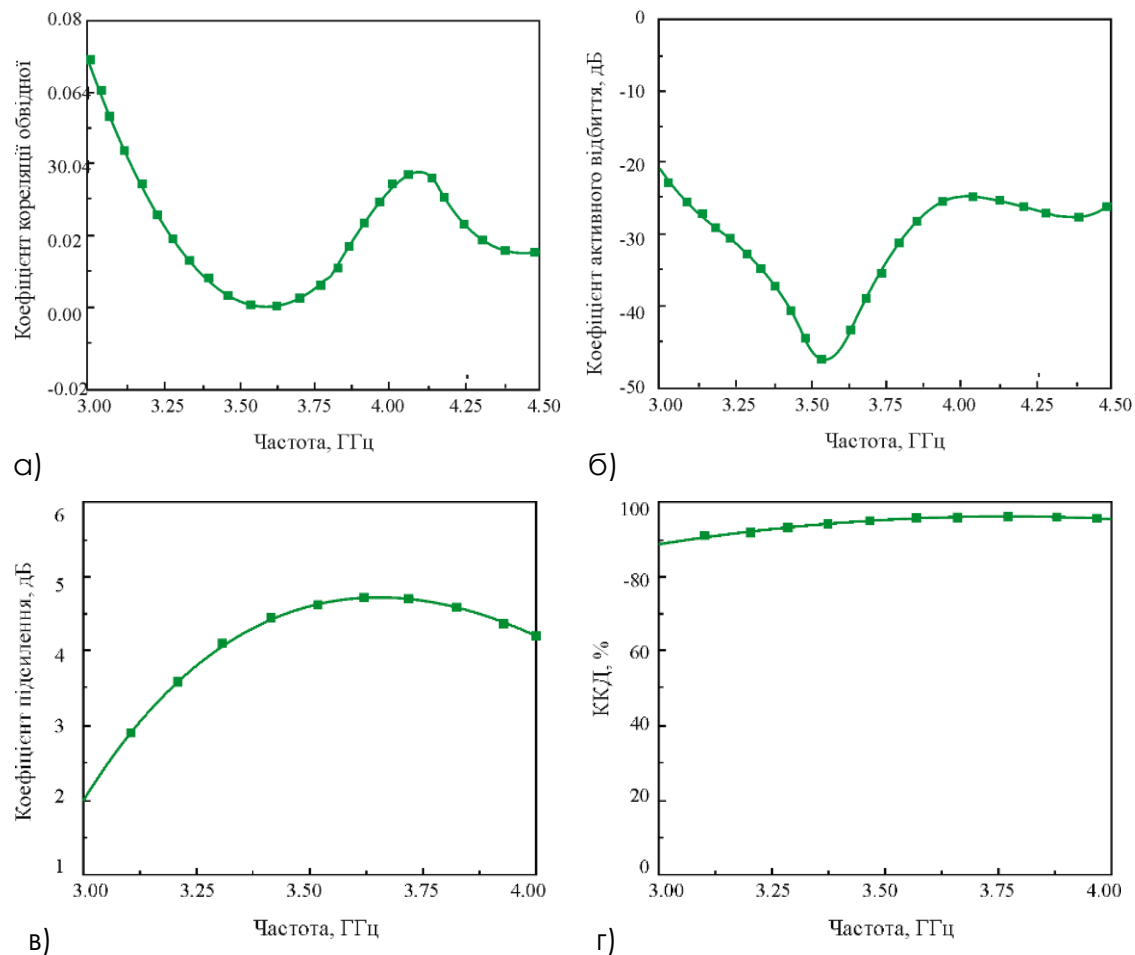
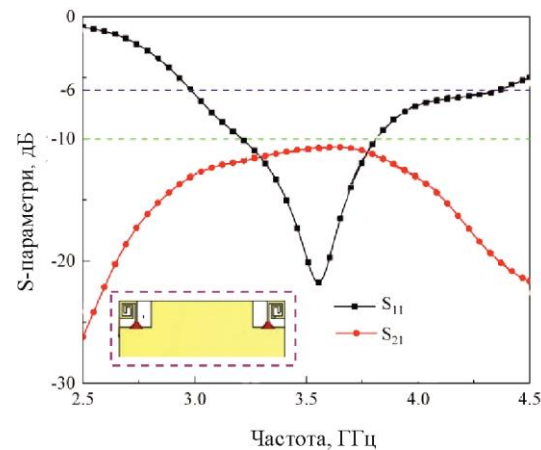


Рис. 8 – Змодельовані параметри запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц, коли порт-1 активний



Ширина смуги імпедансу:

- -6 дБ від 2,98 до 4,36 ГГц
- -10 дБ від 3,2 до 3,82 ГГц

Ізоляція між елементами антени становить більше 10 дБ в обраному діапазоні частот

Результати дослідження показують, що одноантенний елемент досягає пікового підсилення 3,64 дБі з ефективністю антени понад 90%.

Конфігурація антени МІМО дозволяє досягти ізоляції більше 10 дБ між її елементами, що сприяє покращенню продуктивності.

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ АНТЕНИ МІМО

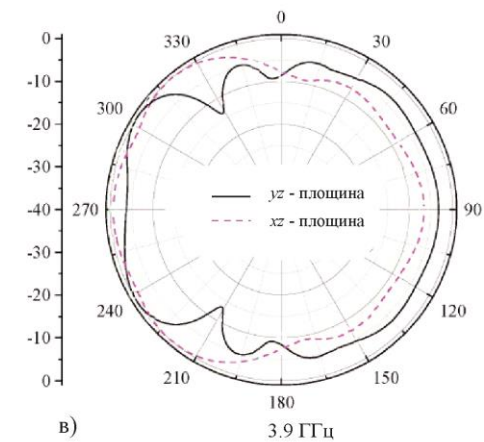
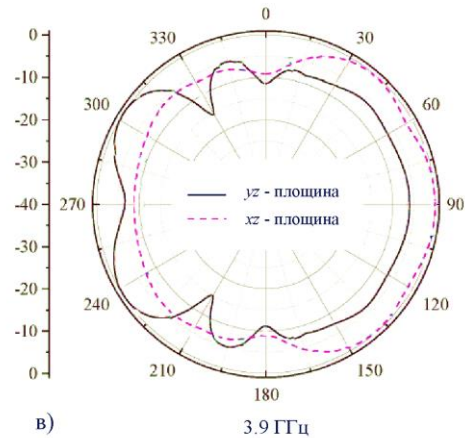
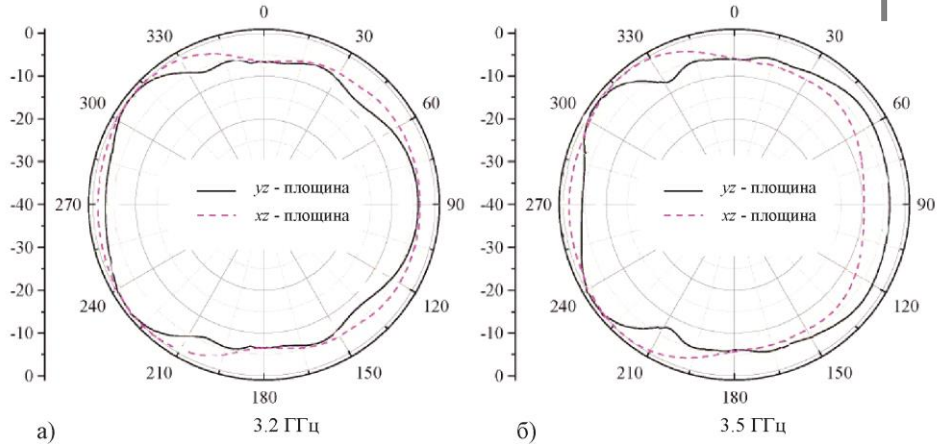
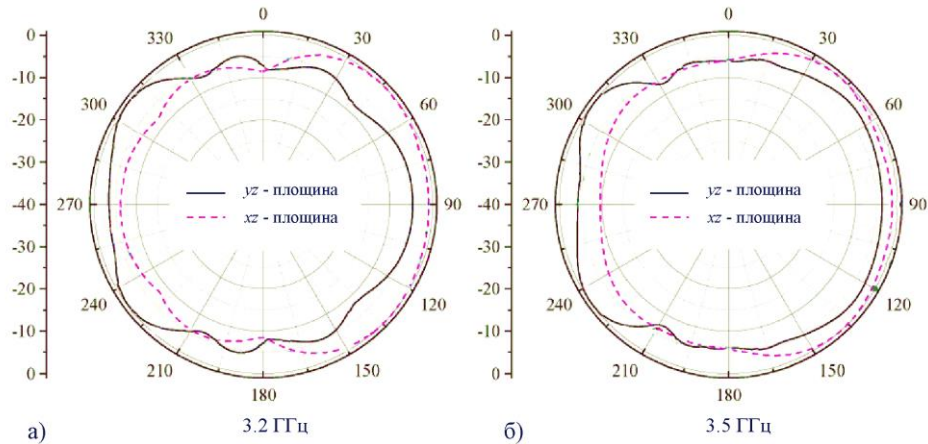


Рис.9 – Характеристики випромінювання запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц, **коли порт 1 активний**

Рис. 10 – Характеристики випромінювання запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц, **коли порт 2 активний**

# ВПЛИВ КОРИСТУВАЧА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНИ



Вплив взаємодії антени MIMO з руками користувача на продуктивність антенної системи в умовах передачі даних та розмови

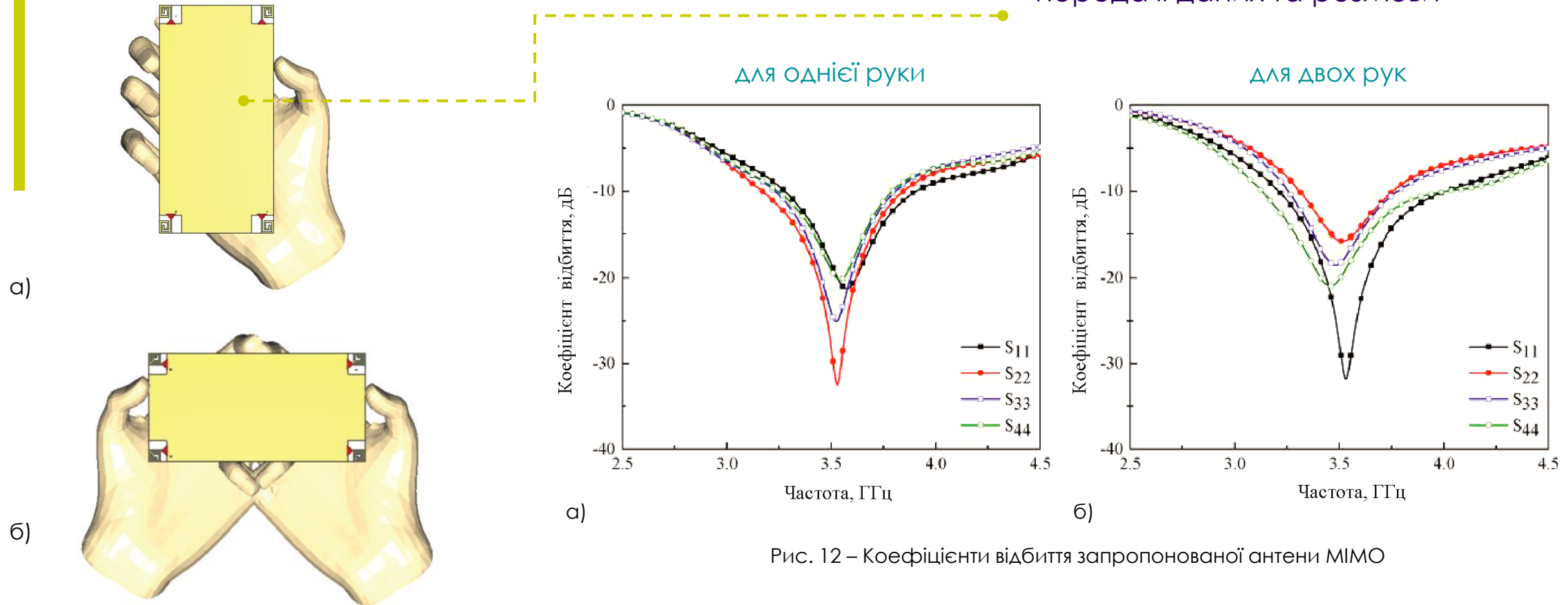


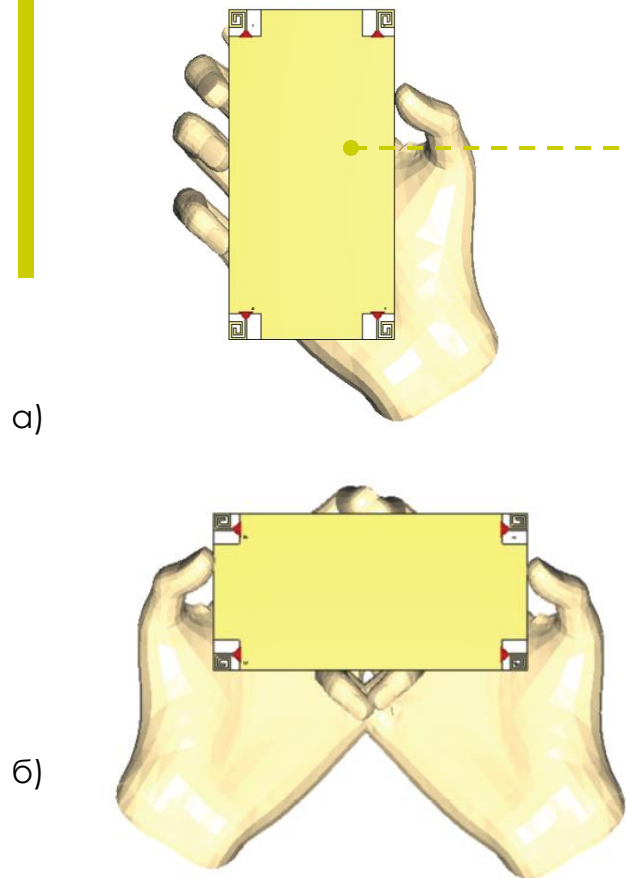
Рис. 12 – Коефіцієнти відбиття запропонованої антени MIMO

Рис. 11 – Розміщення масиву MIMO для випадків:   
 а) – однієї руки та б) – двох рук

# ВПЛИВ КОРИСТУВАЧА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНИ



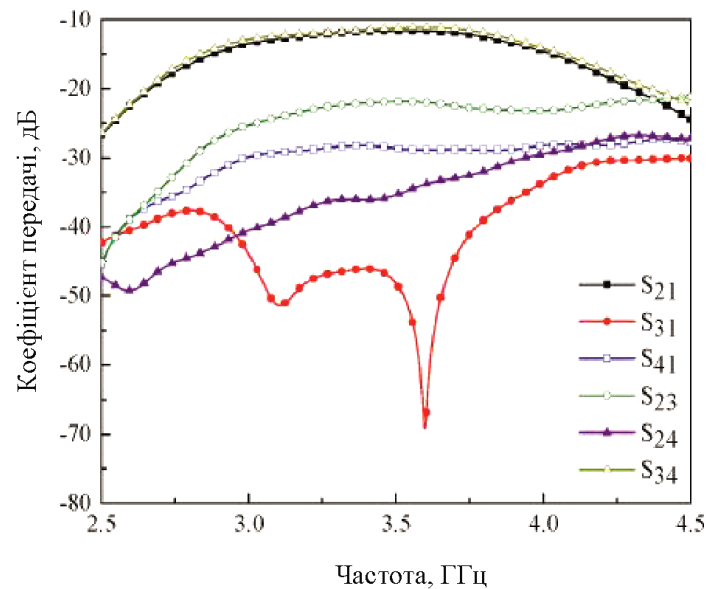
Вплив взаємодії антени MIMO з руками користувача на продуктивність антенної системи в умовах передачі даних та розмови



а)

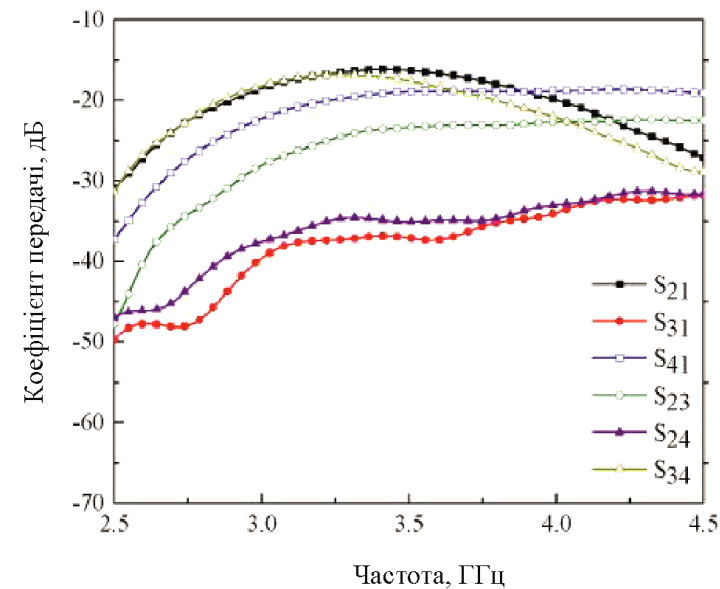
б)

для однієї руки



а)

для двох рук



б)

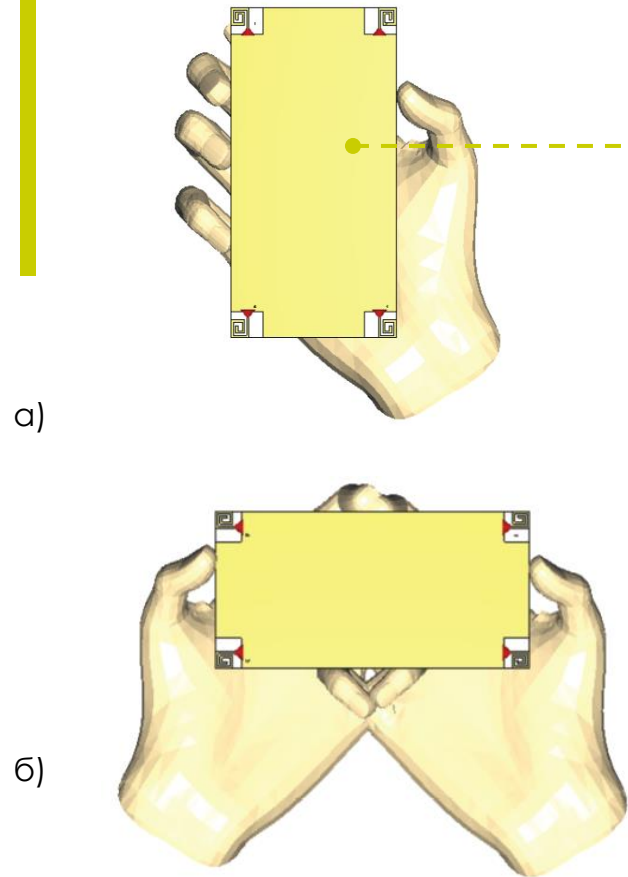
Рис. 13 – Коефіцієнти передачі запропонованої антени MIMO

Рис. 11 – Розміщення масиву MIMO для випадків:  
а) – однієї руки та б) – двох рук

# ВПЛИВ КОРИСТУВАЧА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНИ



Вплив взаємодії антени MIMO з руками користувача на продуктивність антенної системи в умовах передачі даних та розмови

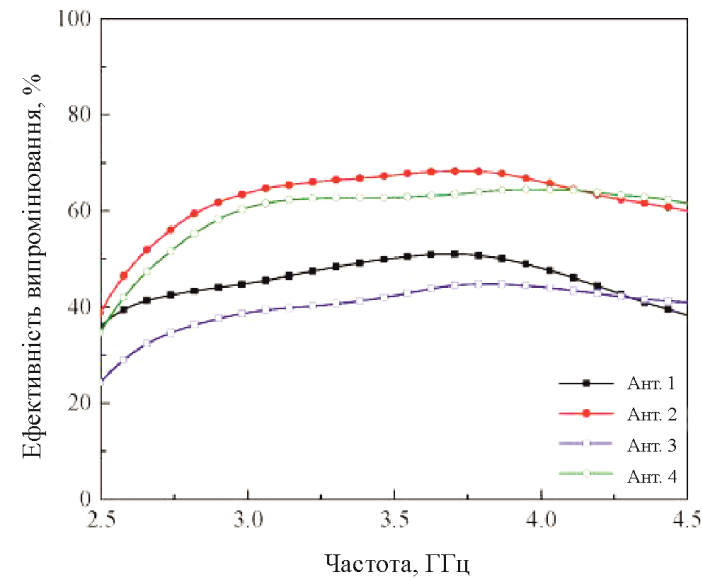


а)

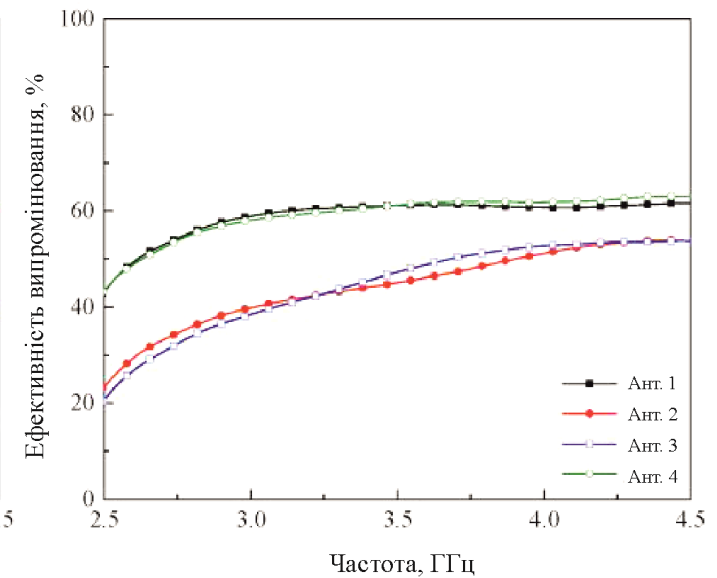
б)

для однієї руки

для двох рук



а)

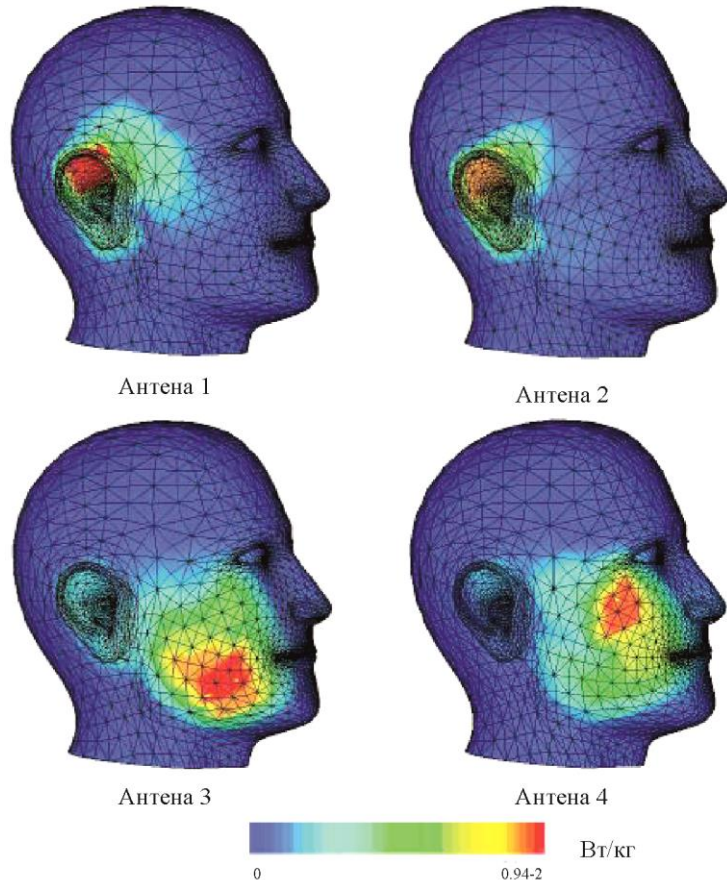


б)

Рис. 14 – Ефективність випромінювання запропонованої антени MIMO

Рис. 11 – Розміщення масиву MIMO для випадків:  
а) – однієї руки та б) – двох рук

# Аналіз коефіцієнта питомого поглинання антени MIMO у режимі розмови



**SAR**  
Specific absorption rate

**Питомий коефіцієнт поглинання (SAR)** – це параметр, який вимірює кількість електромагнітних хвиль, які поглинає людський організм.

$SAR_{\min} \rightarrow 0,94$  Вт/кг для Антени 2

$SAR_{\max} \rightarrow 2$  Вт/кг для Антени 3

**Чим ближче елементи до макета голови, тим вище значення SAR, і навпаки**

## Вплив людських рук та голови на продуктивність антени MIMO

Оцінка продуктивності у режимах передачі даних та розмови дозволила з'ясувати прийнятну функціональність антени у реальних умовах використання.

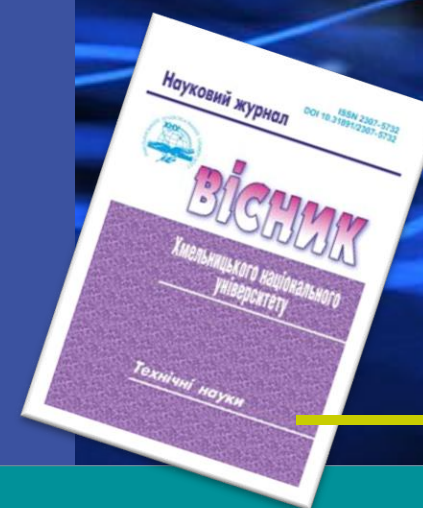
Рис. 15 – Аналіз коефіцієнта питомого поглинання під час використання антени MIMO у режимі розмови



MIMO

## ВИСНОВКИ

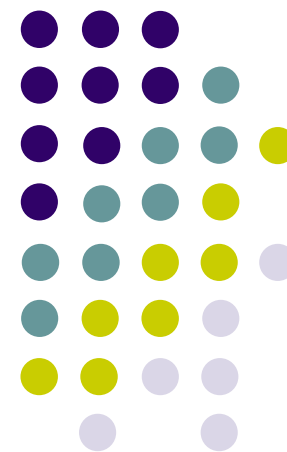
- досліджено антени MIMO (множинного введення, множинного виведення) для систем 5G та їх вплив на продуктивність мережі;
- розглянуто важливі параметри, такі як коефіцієнт кореляції обвідної (ECC) та загальний активний коефіцієнт відбиття (TARC), які вказують на взаємодію між різними антенними портами;
- досліджено пропускну здатність каналу та інші параметри, що впливають на продуктивність систем MIMO;
- показано переваги антен MIMO порівняно з традиційними антенами, що робить їх важливими для покращення зв'язку в мережах 5G;
- представлено нову конструкцію антени MIMO для смартфонів 5G, яка використовує вісім портів і чотири випромінювачі з ортогональною подвійною поляризацією. Цей дизайн є ефективним і відповідає вимогам для сучасних мобільних телефонів 5G.



Апробація

**ДЯКУЮ  
ЗА УВАГУ!**

Доповідь завершено



**БОЙКО ЮЛІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>e-mail: [boiko\\_julius@ukr.net](mailto:boiko_julius@ukr.net)**КАРПОВА ЛЕСЯ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5015-2107>[rtlesya@gmail.com](mailto:rtlesya@gmail.com)**СЕМЕНЮК ВІТАЛІЙ**

Хмельницький національний університет

[vitalik06714@gmail.com](mailto:vitalik06714@gmail.com)

## ВИСОКОРІВНЕВА ОДНОПЛОЩИННА АНТЕНА МІМО ДЛЯ ДЕВАЙСІВ 5G

В даній роботі представлено конструкцію одноплосинної антенної системи МІМО для смартфонів із підтримкою 5G на частоті нижче 6 ГГц. Розроблена антена МІМО складається з чотирьох випромінювачів у формі петлі, які розташовані у кожному куті плати мобільного телефону, що відповідає принципу рознесення діаграм спрямованості. Елемент з однією антеною резонує на частоті 3,5 ГГц, його смуга пропускання імпедансу становить 1,28 ГГц (3–4,28 ГГц) для  $S_{11} \leq -6$  дБ, і дорівнює 720 МГц (3,18–3,9 ГГц) для  $S_{11} \leq -10$  дБ. Для одноантенного елемента спостерігається пікове підсилення 3,64 дБі з ефективністю антени понад 90%. Для конфігурації антени МІМО між її елементами досягається ізоляція понад 10 дБ. Крім того, розроблена антена МІМО забезпечує достатнє покриття випромінюванням для підтримки різних сторін плати мобільного телефону, що є важливою особливістю для усіх телефонів з підтримкою 5G.

Ключові слова: антена МІМО, діаграма спрямованості, смуга пропускання, петлеподібна конструкція, коефіцієнт активного відбиття, ефективність, коефіцієнт підсилення, 5G смартфони.

BOIKO JULIY, KARPOVA LESYA, SEMENYUK VITALIY

Khmelnyskyi National University

### SINGLE PLANE MIMO ANTENNA FOR 5G DEVICES

This work presents the design of a single-plane multiple-input/multiple-output MIMO antenna system for smartphones with 5G support at a frequency below 6 GHz. The developed MIMO antenna consists of four loop-shaped emitters located at each corner of the mobile phone board, which conforms to the principle of pattern diversity. The single-antenna element resonates at 3.5 GHz, has an impedance bandwidth of 1.28 GHz (3–4.28 GHz) for  $S_{11} \leq -6$  dB, and is 720 MHz (3.18–3.9 GHz) for  $S_{11} \leq -10$  dB. For a single-antenna element, a peak gain of 3.64 dBi is observed with an antenna efficiency of >90%. For the MIMO antenna configuration, isolation >10 dB is achieved between its elements. In addition, the designed MIMO antenna provides sufficient radiation coverage to support different sides of the mobile phone board, which is an important feature for all 5G-enabled phones. A planar multiple-input/multiple-output MIMO antenna design is presented for sub-6 GHz 5G-enabled mobile phone applications. Four loop-shaped radiators are designed at each corner of a smartphone board, and they all follow the design configuration of pattern diversity. Several MIMO antenna features are evaluated, such as S-parameters, gain patterns, radiation and total efficiency, envelope correlation coefficient, total active reflection coefficient, and diversity gain. From the reported results, it may be concluded that the presented MIMO antenna system successfully meets the criteria of 5G-enabled mobile phones. In addition, the impacts of human hands and heads on MIMO antenna performance are investigated, and acceptable performance in the data and conversation modes is observed.

Keywords: MIMO antenna, pattern, bandwidth, loop design, active reflection coefficient, efficiency, gain factor, 5G smartphone.

### Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Для зв'язку п'ятого покоління (5G) більшість мобільних операторів зосереджуються на отриманні високої пропускної здатності та високої швидкості передачі даних при низькій вартості. Системи 5G мають швидкість передачі даних у 1000 разів більшу порівняно з системами зв'язку четвертого покоління (4G). Такої високої швидкості передачі даних можна досягти за допомогою технології використання кількох передавальних та кількох приймальних антен МІМО (Multiple Input Multiple Output). У антенах МІМО швидкість передачі даних можна покращити шляхом зменшення багатопроменевого затухання або використання кількох незалежних каналів. Одним із основних ключових моментів до підвищення пропускної здатності каналу є розробка кількох антен для кожного каналу. Антена МІМО повинна мати низький взаємозв'язок, що є необхідною умовою для системи мобільного зв'язку 5G. Крім того, антени МІМО можуть запропонувати краще рознесення та підсилення мультиплексування, що призводить до збільшення пропускної здатності каналу.

### Аналіз досліджень та публікацій

В контексті даної тематики, були розглянуті кілька антен МІМО на частоті нижче 6 ГГц. Так, в роботі [1] була розроблена восьмиелементна структура антени МІМО для спектру частоти 3,5 ГГц. Розроблено симетричну щільну антену з відкритою вилкою та L-подібну фідерну смугу. Ця конфігурація забезпечує ізоляцію >17,5 дБ між елементами антени, але конструкція страждає через низьку ефективність антени. Така ж конфігурація з прямокутним слотом була представлена в статті [2]. Решітки антени МІМО

складалися з двох видів антенних елементів для роботи на різних частотах. Два елементи однакової конфігурації були розміщені у верхньому та нижньому кутах друкованої плати для зв'язку 2G/3G/4G, тоді як вісім елементів, що призначені для роботи на частоті 3,5 ГГц, були розміщені зліва та справа від панелі друкованої плати. В статті [3] розробили восьмипортову широкопasmову антену МІМО на частоті нижче 6 ГГц. Єдина антена системи МІМО складалася з лінії живлення потужністю 50 Вт з розімкнутим контуром налаштування, слотом на металевій рамі та U-подібним слотом на площині заземлення. Антена МІМО може забезпечувати широкопasmову характеристику в діапазоні частот 3,3–6 ГГц. У роботі [4] була представлена монополярна щілинна антена МІМО для діапазонів частоти 2,6/3,5 ГГц. Чотири металеві каркасні антени, що живляться за допомогою L-подібної лінії живлення, були розташовані в середині друкованої плати, тоді як інші елементи були розміщені на верхній і нижній сторонах друкованої плати.

Антенна решітка МІМО у роботі [5] була розроблена для додатків смартфонів 5G на частоті 3,5 ГГц. Масив складався з двох різних варіантів: один був L-подібним масивом із спільним живленням, а інший являв собою U-подібний масив петлі, які були встановлені на металевій рамі смартфона. Для покращення ізоляції автори створили інвертований I-слот і лінію нейтралізації між компонентами антени, що призводить до ізоляції 15 дБ у робочій смузі частот. У роботі [6] розроблено восьмипортову антену МІМО на основі I-подібного елемента для технологій IoT та 5G. Щоб забезпечити простір для додаткових компонентів, металевий каркас телефону було сконструйовано для розміщення компонентів антени. Виявилось, що антена ефективно резонує в діапазоні частот 3,5 ГГц. Антена МІМО забезпечує 13 дБ ізоляції між елементами решітки, з коефіцієнтом підсилення 4 дБі та ефективністю антени понад 40%.

Інтегрована антенна система МІМО [7] розроблена для LTE (Long Term Evolution) та міліметрового діапазону частот. Розроблена структура антени складалася з двох елементів для зв'язку LTE і чотирьох елементів для зв'язку 5G на міліметровому діапазоні. Для обох частотних діапазонів використовувався модифікований прямокутний випромінювач. Крім того, дефекти в заземленій площині були введені за допомогою прямокутних і круглих форм. Розроблений антенний елемент забезпечує резонанс для діапазону частот 5,5 ГГц. Одноплосинна рамкова антена решітка МІМО під частотою 6 ГГц була розроблена в [8]. Антени організовані таким чином, щоб вони могли запропонувати як поляризацію, так і рознесення діаграм спрямованості. Крім того, покращення ізоляції було досягнуто шляхом створення стрілоподібної смуги між елементами антени. У роботі [9] автори розробили антенну решітку МІМО з копланарним хвилеводом для додатків смартфона на частоті нижче 6 ГГц. Для конструкції були обрані Г-подібні та Т-подібні випромінювальні елементи. Використовуючи копланарну хвилеводну техніку, було досягнуто ізоляції >15 дБ у смузі, що нас цікавить.

Вищезазначені антени МІМО мають деякі обмеження з точки зору неплоских конфігурацій, великих розмірів і складних структур. Крім того, ці антени страждають через низьку ефективність випромінювання, що в результаті призводить до поганого підсилення антени. Щоб усунути недоліки раніше опублікованих робіт, це дослідження представляє чотириелементну одноплосинну антенну систему МІМО для смартфонів 5G. Для одиночної антени вибирається елемент у формі петлі. Елементи випромінювання розташовані в кожному куті друкованої плати, що відповідає принципу різноманітності структур і звільняє місце для інших компонентів смартфона. Результати показують, що розроблена антена МІМО забезпечує широкопasmову характеристику у діапазоні частот 3,5 ГГц.

Запланована топологія МІМО має низький взаємозв'язок між антенами, що призводить до низького коефіцієнта кореляції обвідної і високого коефіцієнта підсилення. Крім того, запропонована антена МІМО забезпечує ефективність понад 90%.

### Виклад основного матеріалу

Запропонована конструкція МІМО-антени на частоті нижче 6 ГГц наведена на рис. 1. Для конструкції антени МІМО використовується недорога підкладка FR-4. Товщина підкладки 1,6 мм і має відносну діелектричну проникність  $\epsilon = 4,4$ . Для економії місця на друкованій платі для конструкції антени була використана петлеподібна конструкція [10]. На частоті 3,5 ГГц електрична довжина випромінювача приблизно дорівнює  $1\lambda$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі. Таким чином, оптимізована електрична довжина елемента антени становить  $\approx 45,5$  мм, а ширина лінії дорівнює 1 мм. Варто відзначити, що один елемент антени може займати максимальну площу  $14,5 \times 12$  мм<sup>2</sup>.

Антена МІМО, наведена на рис. 1, складається з чотирьох випромінювачів у формі петлі, розташованих у кожному куті друкованої плати мобільного телефону. Поверхня заземлення розміщена на одній площині з елементами випромінювання. Параметри конструкції запропонованої антени МІМО наведена на рис. 1, а оптимізовані значення наведено у таблиці 1.

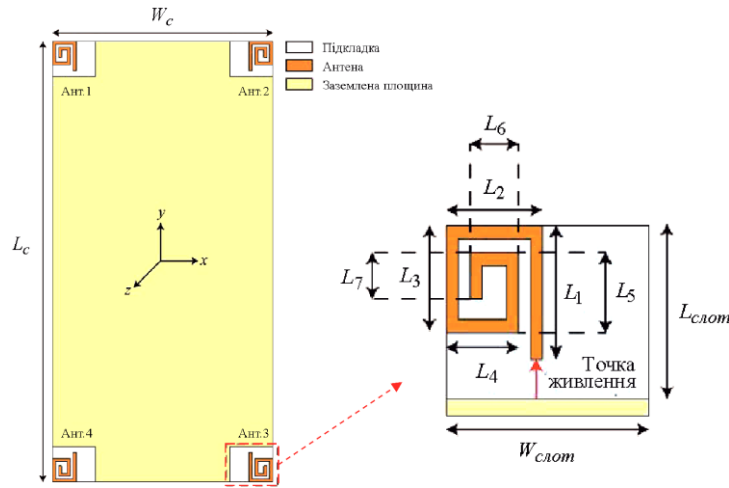


Рис. 1. Конструкція запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц

Таблиця 1

Оптимізовані параметри антени МІМО на частоті до 6 ГГц (у мм)

$L$	$W$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$	$L_7$	$L_{\text{слот}}$	$W_{\text{слот}}$
150	75	10	8	8	6	6	4	3.5	12	14.5

Для живлення антенного елемента використовується дискретний порт 50 Вт. На рис. 2 наведено змодельований коефіцієнт відбиття ( $S_{11}$ ) одного елемента антени. Помічено, що елемент антени добре резонує в діапазоні частот 3,5 ГГц і забезпечує широкосмугову характеристику. Відзначено, що ширина смуги імпедансу  $-6$  дБ і  $-10$  дБ становить 1,28 ГГц (3–4,28 ГГц) і 720 МГц (3,18–3,9 ГГц) відповідно.

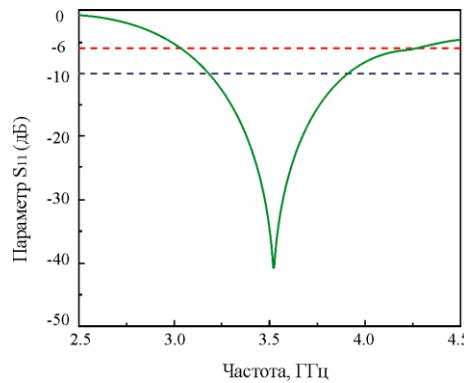


Рис. 2. Змодельовані характеристики  $S_{11}$  одноантенного елемента

Коефіцієнт відбиття  $S_{11}$  запропонованої антени можна регулювати, змінюючи деякі параметри антени. Для певної конструкції параметри  $W_{\text{слот}}$  і  $L_{\text{слот}}$  мають великий вплив на продуктивність.

Параметр  $W_{\text{слот}}$  відіграє важливу роль у досягненні узгодження імпедансу в діапазоні заданої частоти, тоді як параметр  $L_{\text{слот}}$  можна налаштувати для отримання резонансу для потрібного діапазону частот. Цей ефект чітко спостерігається в результатах на рис. 3, де наведено характеристики  $S_{11}$  розробленої антени для змінних  $W_{\text{слот}}$  і  $L_{\text{слот}}$ .

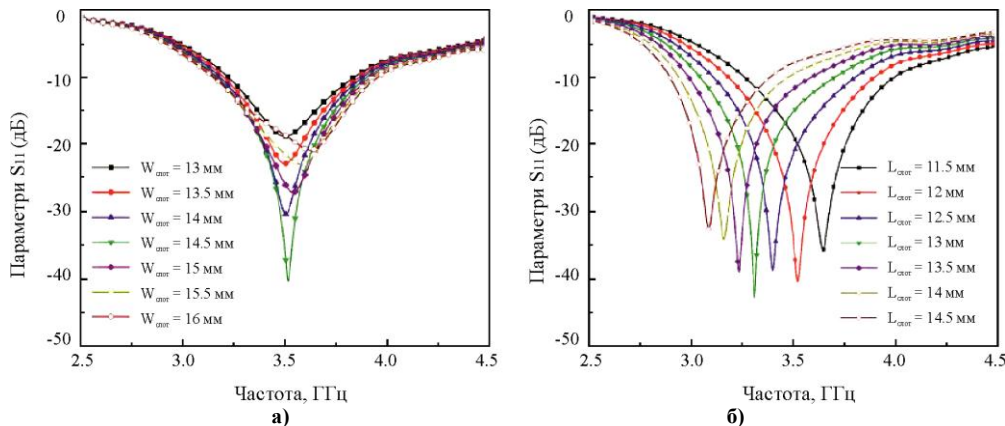


Рис. 3. Змодельовані характеристики  $S_{11}$  для різних значень: а)  $W_{\text{слот}}$  і б)  $L_{\text{слот}}$

На рис. 3а наведено характеристики  $S_{11}$  запропонованої антени для змінних значень параметра  $W_{\text{слот}}$ . З рисунку видно, що параметр  $W_{\text{слот}}$  має значний вплив на узгодження імпедансу. Максимальне узгодження імпедансу спостерігається для  $W_{\text{слот}} = 14,5$  мм, як показано на рис. 3а. З іншого боку, при зміні значення параметра  $L_{\text{слот}}$  в діапазоні від 11,5 мм до 14,5 мм, спостерігається зсув резонансної частоти, як показано на рис. 3б. Важливо зазначити, що ці значення мають незначний вплив на характеристики ізоляції антен МІМО.

Змодельовані  $S$ -параметри запропонованої антени МІМО наведено на рис. 4, де видно, що розроблена антена МІМО добре резонує для діапазону частот 3,5 ГГц. Крім того, відзначається, що мінімальна ізоляція між прилеглими елементами антени становить понад 10 дБ.

У коефіцієнті відбиття  $S_{11}$  спостерігаються зміни, які в основному відбуваються через точки живлення та різне розташування елементів антени на друкованій платі смартфона, як показано на рис. 1. Крім того, материнська плата [11] має прямокутну форму, що може спричинити певні розбіжності в частотній характеристиці та зв'язках, переважно між парними та непарними номерами портів. Однак можна налаштувати потрібний діапазон частот, змінюючи параметри конструкції, як це показано на рис. 3.

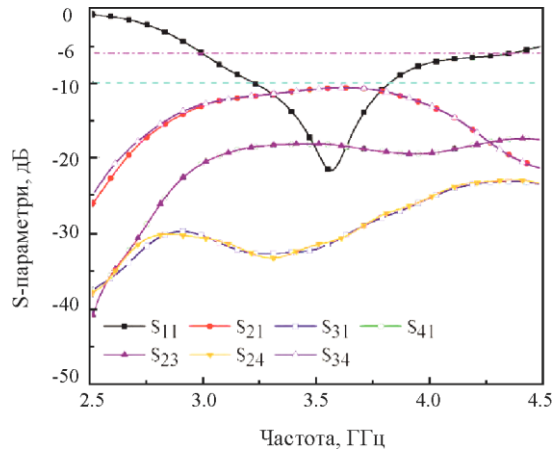


Рис. 4. Змодельовані  $S$ -параметри запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц

Змодельовані тривимірні (3D) діаграми підсилення розробленої антени наведено на рис. 5. Антена генерує різні вертикальні та горизонтальні поляризовані діаграми для вибраного діапазону частот, як показано на діаграмі. Крім того, як показано на рис. 5, коефіцієнт підсилення антени становить  $\sim 3,6$  дБі. Отримані діаграми ще більше підтверджують, що антена МІМО підтримує рознесеність діаграм, що є бажаною функцією для додатків смартфона.

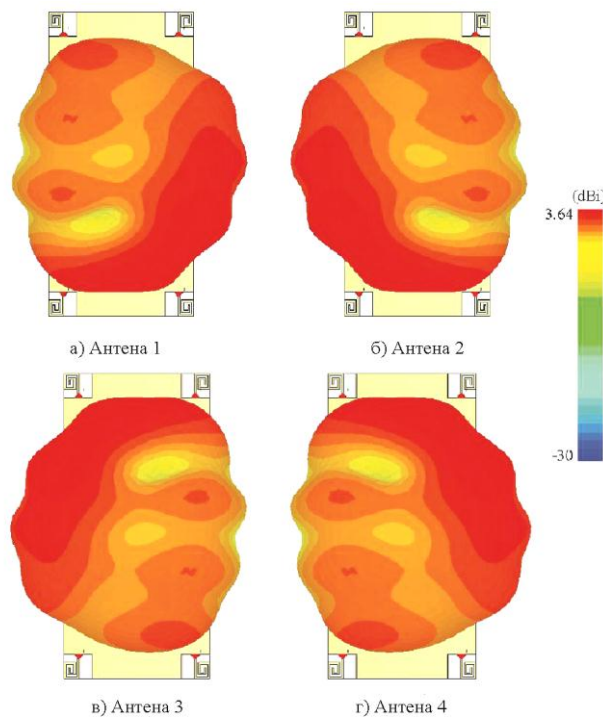


Рис. 5. Тривимірні діаграми підсилення запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц

Одним із найважливіших аспектів у визначенні ефективності антен МІМО є коефіцієнт кореляції обвідної. Для практичних застосувань коефіцієнт кореляції обвідної має бути понад 0,5, а в ідеалі він приблизно дорівнює нулю. Коефіцієнт кореляції обвідної (*ECC*) можна визначити, використовуючи *S*-параметри системи МІМО [12–14]:

$$ECC = \frac{|S_{jj}^* S_{ij} + S_{ij}^* S_{ii}|^2}{(1 - |S_{jj}|^2 - |S_{ji}|^2)(1 - |S_{ij}|^2 - |S_{ii}|^2)}, \quad (1)$$

де  $S_{ii}$  та  $S_{jj}$  – коефіцієнти відбиття, а  $S_{ji}$  та  $S_{ij}$  – коефіцієнти передачі антени МІМО.

Як показано на рис. 6а, значення коефіцієнта кореляції обвідної для передбачуваного діапазону частот (3,5 ГГц) становить менше 0,01. Результати також демонструють високу ізоляцію між елементами антени, що є вирішальним фактором для одночасного функціонування. Підсилення від рознесеності (*DG*) запропонованої антени МІМО, з іншого боку, можна розрахувати наступним чином [14]:

$$DG = 10 \left( \sqrt{1 - ECC} \right)^2. \quad (2)$$

Для представленої антени МІМО значення  $K_p$  становить понад 9,9 дБ, як показано на рис. 6б.

Загальний коефіцієнт активного відбиття (*TARC*) є ще одним важливим показником, який слід враховувати при оцінці роботи антени МІМО, і його можна визначити наступним чином [15–18]:

$$TARC = \sqrt{\frac{(S_{mm} + S_{mn})^2 (S_{nm} + S_{nn})^2}{2}}. \quad (3)$$

Результати демонструють, що запропонована антена МІМО забезпечує *TARC* понад 20 дБ для заданого діапазону, як показано на рис. 6в.

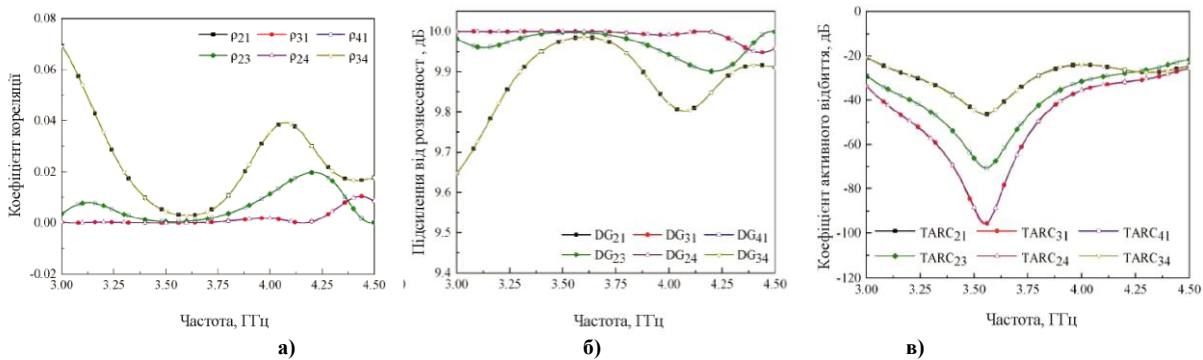


Рис. 6. Змодельовані результати для запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц: а) коефіцієнт кореляції обвідної, б) підсилення від рознесення в) загальний коефіцієнт активного відбиття

Змодельоване підсилення для порту-1 наведено на рис. 7а. Коефіцієнт підсилення вимірюється живленням порту-1, тоді як порт-2 за допомогою узгодженого навантаження 50 Вт. Середнє змодельоване підсилення на порту 1 становить 4 дБі (рис. 7а). Змодельоване підсилення коливається в діапазоні від 2 до 4,75 дБі. Результати випромінювання та загальної ефективності для порту-1 наведено на рис. 7б. Помічено, що розроблена антена має ефективність випромінювання понад 90%, при цьому загальний ККД коливається в межах 70–95%. На рис. 7б слід звернути увагу на те, що розроблена антена забезпечує постійну ефективність випромінювання в обраному діапазоні частот.

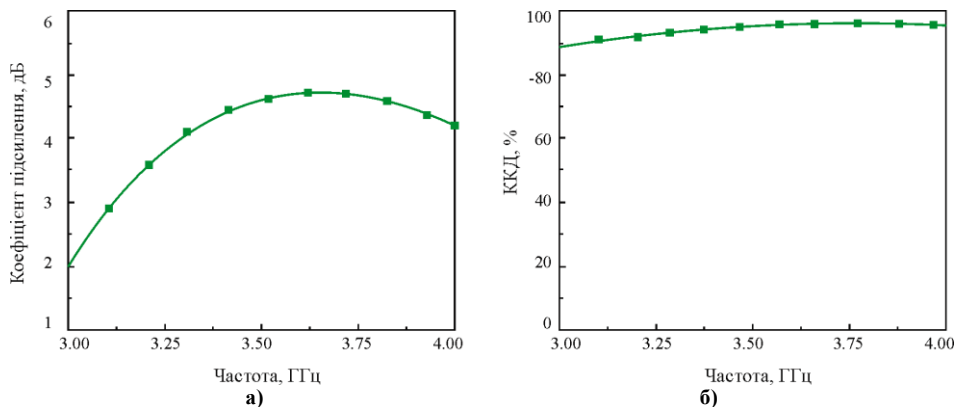


Рис. 7. Змодельовані: а) коефіцієнт підсилення, і б) загальна ефективність запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц, коли порт-1 активний

Змодельовані характеристики випромінювання порту-1 для частот 3,2 ГГц, 3,5 ГГц і 3,9 ГГц наведено на рис. 8. Розроблена антена МІМО забезпечує квазівспрямовані характеристики випромінювання як для площини  $yz$ , так і для площини  $xz$  на заданих частотах. Крім того, антена МІМО забезпечує рознесення діаграм спрямованості в площині  $xz$ , як показано на рис. 8.

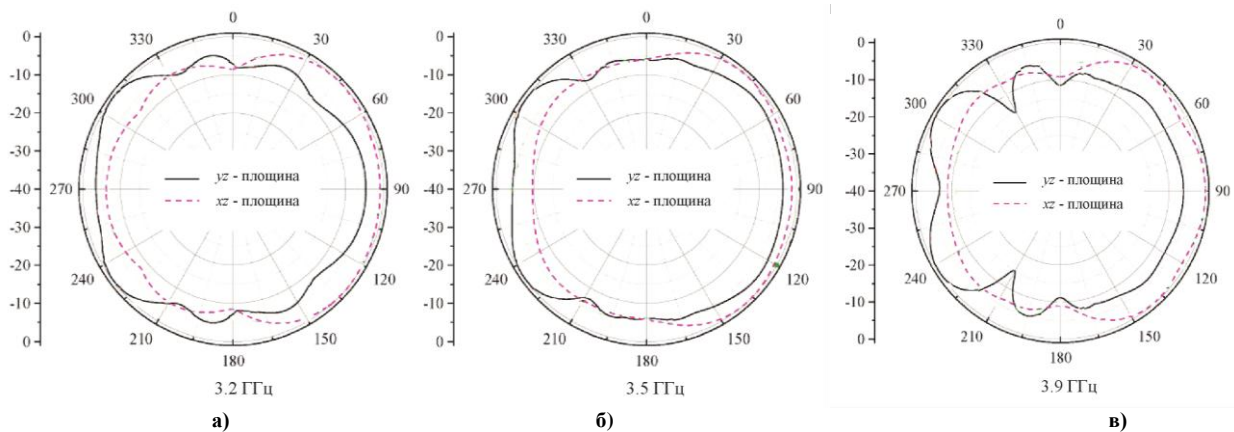


Рис. 8. Характеристики випромінювання запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц, коли порт 1 активний

Для антен, що використовуються в смартфонах, одне з найважливіших питань є питомий коефіцієнт поглинання (SAR). Питомий коефіцієнт поглинання – це параметр, який вимірює кількість електромагнітних хвиль, які поглинає людський організм.

Характеристики питомого коефіцієнта поглинання для моделі голови користувача досліджено та наведено на рис. 9. Мінімальний SAR становить 0,94 Вт/кг для Антени 2, тоді як максимальне значення SAR становить 2 Вт/кг для Антени 3. Відповідно, що чим ближче елементи до моделі голови, тим вище значення SAR, і навпаки.

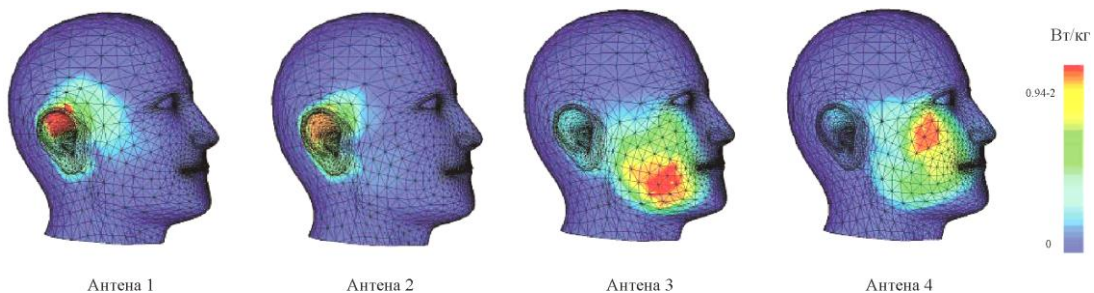


Рис. 9. Аналіз коефіцієнта питомого поглинання під час використання антени МІМО у режимі розмови

### Висновки

Представлено одноплосинну конструкцію антени МІМО для мобільних телефонів із підтримкою 5G з частотою нижче 6 ГГц. Чотири випромінювачі у формі петлі розроблені в кожному куті плати смартфона, і всі вони відповідають конструкції налаштування різноманітності шаблонів. Оцінюються деякі функції антени МІМО, такі як  $S$ -параметри, діаграми підсилення, випромінювання та загальна ефективність, коефіцієнт кореляції обвідної, загальний коефіцієнт активного відбиття та посилення рознесення. З отриманих результатів можна зробити висновок, що представлена антенна система МІМО успішно відповідає критеріям мобільних телефонів з підтримкою 5G.

### References

1. Li, Y., Luo, Y., Yang, G. High-isolation 3.5 GHz eight-antenna MIMO array using balanced open-slot antenna element for 5G smartphones. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2019, 67, 3820–3830.
2. Ullah, R., Ullah, S., Ullah, R., Faisal, F., Mabrouk, I.B., Al Hasan, M.J. A 10-Ports MIMO Antenna System for 5G Smart-Phone Applications. *IEEE Access* 2020, 8, 218477–218488.
3. Zhang, X., Li, Y., Wang, W., Shen, W. Ultra-wideband 8-port MIMO antenna array for 5G metal-frame smartphones. *IEEE Access* 2019, 7, 72273–72282.
4. Abdullah, M., Kiani, S.H., Iqbal, A. Eight element MIMO antenna for 5G mobile applications. *IEEE Access* 2019, 7, 134488–134495.
5. Jiang, W., Liu, B., Cui, Y., Hu, W. High-isolation eight-element MIMO array for 5G smartphone applications. *IEEE Access* 2019, 7, 34104–34112.
6. Kiani, S.H., Altaf, A., Abdullah, M., Muhammad, F., Shoaib, N., Anjum, M.R. Damaševičius, R.

- Blažauskas, T. Eight element side edged framed MIMO antenna array for future 5G smart phones. *Micromachines* 2020, 11, 956.
7. Iffat Naqvi, S. Hussain, N. Iqbal, A. Rahman, M. Forsat, M. Mirjavadi, S.S. Amin, Y. Integrated LTE and Millimeter-Wave 5G MIMO Antenna System for 4G/5G Wireless Terminals. *Sensors* 2020, 20, 3926.
  8. Parchin, N.O., Basherlou, H.J., Al-Yasir, Y.I., Abd-Alhameed, R.A. A broadband multiple-input multiple-output loop antenna array for 5G cellular communications. *AEU-Int. J. Electron. Commun.* 2020, 127, 153476.
  9. Parchin, N.O., Al-Yasir, Y.I., Abdulkhaleq, A.M., Basherlou, H.J., Ullah, A., Abd-Alhameed, R.A. A New broadband MIMO antenna system for sub 6 GHz 5G cellular Communications. In *Proceedings of the 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Copenhagen, Denmark, 15–20 March 2020, pp. 1–4.
  10. Ahmad, U., Ullah, S., Rafique, U., Choi, D.Y., Ullah, R., Kamal, B., Ahmad, A. MIMO Antenna System With Pattern Diversity for Sub-6 GHz Mobile Phone Applications. *IEEE Access*, 2021, 9, 149240–149249.
  11. Kovtun I., Boiko J., Petrashchuk S. Nondestructive strength diagnostics of solder joints on printed circuit boards. In *2017 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odessa, Ukraine, 2017, pp. 1-4.
  12. Boiko J., Polikarovskiykh O., Tkachuk V., Yehoshyna H., Karpova L., Tkachuk. V. Design Concepts for Mobile Computing Direction Finding Systems. *Mobile Computing and Sustainable Informatics: Proceedings of ICMCSI 2023*, vol. 166. Springer, Singapore. 2023, pp. 89-107.
  13. Boiko J., Polikarovskiykh O. Tkachuk V. Development and modeling of the antenna system the direction finder unmanned aerial vehicle. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, vol. 13, no. 1, pp. 26-32, March 2023.
  14. Mazloun, J., Ghorashi, S.A., Ojaroudi, M., Ojaroudi, N. Compact Triple-Band S-Shaped Monopole Diversity Antenna for MIMO Applications. *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.* 2015, 30, 975–980.
  15. Kumar, A., Ansari, A.Q., Kanaujia, B.K., Kishor, J. High isolation compact four-port MIMO antenna loaded with CSRR for multiband applications. *Frequenz* 2018, 72, 415–427.
  16. Sharawi, M.S. Printed multi-band MIMO antenna systems and their performance metrics [wireless corner]. *IEEE Antennas Propag. Mag.* 2013, 55, 218–232.
  17. Parhomey I. R., Boiko J. M., Eromenko O. I. Features of digital signal processing in the information control systems of multipositional radar. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 77, no. 2, pp. 75-84, Aug. 2016.
  18. Boiko, J., Karpova, L. Increasing Efficiency in the Correlation Processing of Information Signals for Radar. *Proceedings of Fourth International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 977. Springer, Singapore. 2023.

Завідувачу кафедри телекомунікацій,  
медійних та інтелектуальних технологій  
д.т.н., професору ПІДЧЕНКУ Сергію  
здобувача вищої освіти  
СЕМЕНЮКА Віталія  
ФІТ, гр. ТРМ-22-1

### 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. 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 моєї дипломної роботи «Синтез антени високого рівня МІМО для девайсів 5G з обмеженим простором» роботи 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.

17 листопада 2023 р.  
дата

підпис

## Anti-Plagiarism v-15.257

**Максимальное совпадение с одним документом 1.0%**

Словари проверки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. **Ошибок в документах: 12%**

ID: 121135 Название: Синтез антени високого рівня МІМО для девайсів 5G з обмеженим простором Добавлено в БД: 2023-11-26 Авторы: Семенюк Віталій Олегович Руководители: Бойко Юлій Миколайович Консультанты: Опоненты:	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	105331	1588	1589 (2%)	26 (2%)



Имя пользователя:  
Kafedra TMIT KhNU

Дата проверки:  
26.11.2023 20:54:39 EET

Дата отчета:  
26.11.2023 21:04:28 EET

ID проверки:  
1015942760

Тип проверки:  
Doc vs Internet + Library

ID пользователя:  
100005657

Название файла: Семенюк\_ТРм\_22

Количество страниц: 109    Количество слов: 17897    Количество символов: 135225    Размер файла: 3.49 MB    ID файла: 1015617238

## 2.16% Совпадения

Наибольшее совпадение: 1.47% с Интернет-источником ([http://elar.khmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/12868/1/..](http://elar.khmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/12868/1/))

2.02% Источники из Интернета    64 ..... Страница 111

1.82% Источники из Библиотеки    64 ..... Страница 111

## 0.21% Цитат

Цитаты    1 ..... Страница 112

Не найдено ни одной ссылки

## РІШЕННЯ

### кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

#### ПРО ДОПУСК ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

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

Назва: Синтез антени високого рівня МІМО для девайсів 5G з обмеженим простором

Автор: Семенюк Віталій Олегович

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.	-
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	відповідає
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 розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження (є власні терміни, визначення тощо), складають 2,16% та мають посилання на приведений список літературних джерел.

«26» листопада 2023 р.

Науковий керівник

Завідувач кафедрою ТМІТ



Юлій БОЙКО

Сергій ПІДЧЕНКО

## ВІДГУК

на дипломну роботу

студента групи ТРМ-22-1 Віталія СЕМЕНЮКА

«СИНТЕЗ АНТЕНИ ВИСОКОГО РІВНЯ МІМО

ДЛЯ ДЕВАЙСІВ 5G З ОБМЕЖЕНИМ ПРОСТОРОМ»

Дипломна робота вражає високим рівнем актуальності та наукового підходу до проблеми розробки та оптимізації антенних систем МІМО для сучасних смартфонів з підтримкою технології 5G. Автор чітко визначив актуальні виклики, з якими стикається сучасна телекомунікаційна індустрія, та впевнено поставив перед собою завдання їх вирішення через вдосконалення антенних конфігурацій.

Особливо вражає те, що автор вивчив не лише технічні характеристики антен, а й їх взаємодію з реальними умовами користування, такими як взаємодія з руками та головою користувача. Введення новаторської конструкції антени з чотирьох випромінювачів у формі петлі, розташованих у кутах плати мобільного телефону, є перспективним рішенням для покращення рознесення діаграм спрямованості та ізоляції між антенними елементами.

Дослідження впливу взаємодії антени МІМО з руками та головою на продуктивність є важливим в контексті практичного застосування технологій у реальних умовах. Результати, отримані в ході роботи, висвітлюють важливі аспекти, такі як пікове підсилення, ефективність та покриття випромінюванням.

Загальний висновок відносно практичної значущості отриманих результатів і їх внеску в розвиток телекомунікаційної галузі дуже переконливий. Рекомендую автору подальші дослідження в даному напрямку, можливо, з фокусом на визначенні впливу інших експлуатаційних умов на антенні системи МІМО.

У процесі виконання дипломної роботи Віталій СЕМЕНЮК проявив креативність, ініціативність, старанність, наполегливість, здатність та вміння застосовувати набуті знання для вирішення складних завдань, обізнаність у сучасних системних та інформаційних технологіях.

Дипломну роботу виконано на високому технічному рівні, вона має безперечну актуальність в області сучасних телекомунікацій, а студент Віталій СЕМЕНЮК заслуговує оцінки «відмінно».

Керівник:  
д-р техн. наук, професор



Юлій БОЙКО

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Дипломник: Семенюк Віталій Олегович

Тема роботи: Синтез антени високого рівня МІМО для девайсів 5G з обмеженим простором

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг дипломної роботи

Кількість листів креслень 15 Кількість сторінок записки 101

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Дипломна робота має на меті вдосконалення конструкції антенної системи МІМО для смартфонів, що підтримують технологію 5G на частоті до 6 ГГц. Досліджується використання антенної конфігурації із чотирьох випромінювачів у формі петлі, розташованих у кожному куті плати мобільного телефону. Основний акцент робиться на досягненні оптимальних параметрів, таких як частотні характеристики, ефективність та покриття випромінюванням, із забезпеченням високої ізоляції між антенними елементами.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Дипломна робота відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: Дипломна робота націлена на аналіз та удосконалення конструкції антенної системи МІМО для смартфонів з підтримкою технології 5G на частоті до 6 ГГц. Основна увага приділяється використанню антенної конфігурації із чотирьох випромінювачів у формі петлі, розташованих у кожному куті плати мобільного телефону, з метою покращеного рознесення діаграм спрямованості. Результати порівнюються з теоретичними розрахунками для підтвердження ефективності конструкції. Загальне об'єднання аналізу, експериментальних досліджень та моделювання надає вичерпний огляд та оцінку продуктивності розробленої антенної системи МІМО для смартфонів 5G.

4. Позитивні сторони роботи: Розроблено інноваційну конфігурацію антен, використовуючи чотири випромінювачі у формі петлі, розташовані в кутах плати мобільного телефону. Це свідчить про творчий підхід та оригінальність у виборі конструкційних елементів. Робота має важливе практичне значення

для розвитку телекомунікаційної індустрії та мобільних технологій, сприяючи покращенню продуктивності антенних систем MIMO у сучасних смартфонах з підтримкою 5G.

---

5. Негативні сторони роботи: У роботі бажано було б більш детально розглянути аналіз вартості виготовлення прототипу та можливостей виробництва. Присутні невеликі граматичні помилки. Однак, ці недоліки не мають принципового значення, суттєво не впливають на кінцевий результат і не знижують загального враження від проведеної роботи.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає


7. Відгук про роботу в цілому: В цілому дипломна робота виконано на високому технічному рівні, вона має безперечну актуальність в області сучасних технологій телекомунікацій. Результати дослідження мають важливе практичне застосування та внесуть вагомий внесок у розвиток технології 5G.

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка дипломної роботи: Дипломна робота відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки «відмінно» (5.00/А), а її автору Семенюку В.О. присвоєння кваліфікації магістра зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка»

10. Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, місце роботи) Єрмоменко Олександр Іванович – к.т.н., доцент кафедри фізики та електротехніки

« 29 » листопада 2023р.



підпис