

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Бакалавр

Освітній рівень

Ширококутова МІМО-антена міліметрового діапазону

для бездротового зв'язку

Назва теми

КВРТР.2019008.01.07 ПЗ

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Шифр і назва

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Шифр і назва

Освітня програма «Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології»

Назва

Виконав:

студент IV курсу, група ТР1-19-1


Підпис

Назар КУКУС

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник:


Підпис, дата

Андрій СЕЛЬСЬКИЙ

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер:


Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

Зав. кафедри автоматизації,
комп'ютерно-інтегрованих
технологій та робототехніки:


Підпис

Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

« 13 » червня 2023р.

Хмельницький, 2023

Факультет	інформаційних технологій
Кафедра	автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки
Освітній рівень:	бакалавр
Галузь знань:	17 Електроніка та телекомунікації
Спеціальність:	172 Телекомунікації та радіотехніка
Освітня програма:	Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру АКІГтаР

 Валерій МАРТИНЮК

« 01 » лютого 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Кукуєву Назару Романовичу

Прізвище, ім'я по батькові здобувача





- 1 Тема роботи: Широкосмугова МІМО-антена міліметрового діапазону для бездротового зв'язку
Керівник роботи: к.ф.-м.н., доцент Сельський Андрій Анатолійович
Затверджено наказом по університету від «01» березня 2023р. № 5
- 2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру 03 червня 2023 року
- 3 Вихідні дані до роботи: схема технологічного процесу, технічне завдання широкосмугова антена МІМО; діапазон роботи від 24 ГГц до 39 ГГц; симетрична структура.
- 4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): огляд бездротового зв'язку технологій 5G; міліметровий зв'язок для технологій 5G; матеріали і методи дослідження; результати дослідження антени МІМО.
- 5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):
1. Конструкція широкосмугової антени. 2. Результати досліджень запропонованої антени МІМО. 3. Змодельовані параметри антени МІМО.

Завдання отримав 

Керівник



6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвища, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	КОРЕЦЬКА Людмила к.т.н., доцент		
Антиплагіат	ФЕДУЛА Микола к.т.н., доцент		


7 Дата видачі завдання 01 лютого 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

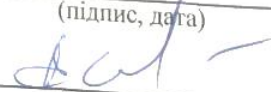
№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на кваліфікаційну роботу	05.02.2023р.	виконано
2.	Складання індивідуального плану на кваліфікаційну роботу	15.02.2023р.	виконано
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	10.03.2023р.	виконано
4.	Написання другого розділу	26.03.2023р.	виконано
5.	Написання третього розділу	15.04.2023р.	виконано
6.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до кваліфікаційної роботи	30.04.2023р.	виконано
7.	Оформлення кваліфікаційної роботи	10.05.2023р.	виконано
8.	Рецензування кваліфікаційної роботи	15.05.2023р.	виконано
9.	Презентаційні матеріали за результатами виконання кваліфікаційної роботи	28.05.2023р.	виконано

Здобувач

Науковий керівник



(підпис, дата)



(підпис, дата)

Назар КУКУЄВ

Андрій СЕЛЬСЬКИЙ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Широкопугова МІМО-антена міліметрового діапазону для бездротового зв'язку»

Автор роботи: Кукуєв Назар Романович

Керівник роботи: к.ф.м.н., доцент Сельський Андрій Анатолійович

Пояснювальна записка: 64 сторінки, 26 рисунків, 1 таблиця, 40 джерел.

Графічна частина: технічні креслення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СТИЛЬНИКОВИЙ ЗВ'ЯЗОК, СТАНДАРТИ КАНАЛУ МОДЕЛІ, МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛІВ, МІМО, 5G, MASSIVE МІМО, ІОТ, LTE МІЛІМЕТРОВА ХВИЛЯ, ПОШИРЕННЯ.

Об'єктом дослідження є широкопугова антена МІМО.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в підвищенні ізоляції між антенними елементами широкопугової МІМО-антени міліметрового діапазону для бездротового зв'язку.





У даній кваліфікаційній роботі представлена широкопугова антена міліметрового діапазону для застосувань 5-го покоління. Діапазон робочих частот становить від 24 ГГц до 39 ГГц, що покриває більшу частину діапазону. Крім того, розроблено антену 9x9 із декількома входами та декількома виходами (МІМО). Висока ізоляція досягається без введення зовнішніх роз'єднувальних структур. Коефіцієнт передачі становить менше -20 дБ у межах лише 0,4 мм простору між елементами антени. Діаграма спрямованості також показує стабільність в широкому робочому діапазоні. Результати моделювання та вимірювання показують, що запропонована антена МІМО підходить для майбутнього бездротового зв'язку.

03.06.2023 р.



ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП.....	5
1 ОГЛЯД БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ ТЕХНОЛОГІЙ 5G	9
1.1 5G Massive MIMO.....	9
1.2 5G неортогональний множинний доступ (NOMA).....	11
1.3 5G міліметрових хвиль (mmWave)	14
1.4 Підходи на основі 5G IoT.....	15
1.5 Методи машинного навчання для 5G.....	18
1.6 Технології Massive MIMO для 5G	19
1.7 Висновки до першого розділу	22
2 МІЛІМЕТРОВИЙ ЗВ'ЯЗОК ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЙ 5G	23
2.1 Бездротовий зв'язок п'ятого покоління	25
2.2 Спеціальні технології.....	26
2.2.1 Формування променя	27
2.2.2 Massive Multi Input Multi Output (ММІМО).....	28
2.2.3 Розгортання малих стільників.....	29
2.3 Застосування mm-Wave 5G.....	30
2.3.1 Розумні транспортні логістичні вузли.....	31
2.3.2 Підключення	33
2.3.3 Застосування mm-Wave 5G у транспорті.....	34

КвРТР.2019008.01.07 ПЗ								
№	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Широкопasmового МІМО-антена міліметрового діапазону для бездротового зв'язку	Літ.	Арк.	Акрюшів
зроб.		Кукуєв Н.Р.						
ревір.		Сельський А.А.					2	66
виз.						ХНУ, гр. ТР1-19-1		
Контр.		Корецька Л.О.		12.01.20	Пояснювальна записка			
тверд.		Мартинюк В.В.		12.01.20				

2.3.4 Застосування mm-Wave 5G в освіті	35
2.4 Основи проектування: підвищення рівня сигналів 5G mmWave	36
2.5 Досягнення моделювання на системному рівні для підтримки 5G	39
2.6 Масивні антенні решітки MIMO та формування променя	40
2.7 Висновки до другого розділу	41
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	43
3.1 Конструкція широкопasmової антени	44
3.2 Конструкція антен MIMO	48
3.3 Результати дослідження запропонованої антени MIMO	53
3.4 Висновки до третього розділу.....	59
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	61
ДОДАТКИ.....	65

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AMPS	–	advanced mobile phone systems – передові системи мобільних телефонів
EBG	–	electronic band gap – електронна заборонена зона
UE	–	user equipment
NOMA	–	non-orthogonal multiple access – неортогональний множинний доступ
OFDMA	–	множинний доступ з ортогональним частотним поділом каналів
LTE	–	long-term evolution
FDMA	–	frequency division multiple access – множинний доступ із розділенням каналів по частоті
TDMA	–	time division multiple acces – множинний доступ із розділенням за часом
mmWave	–	міліметрові хвилі
WiMax	–	worldwide interoperability for microwave access
GPS	–	global positioning system
Wi-Fi	–	wireless fidelity
IoT	–	internet of things

					КВРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

За останні кілька десятиліть розвиток бездротових технологій змінив наше життя. Технологічне вдосконалення дозволило нам скористатися новими послугами для мобільного зв'язку, такими як голос, аудіо, відео та послуги передачі даних. Крім того, це також допомогло нам досягти швидшої швидкості передачі даних між портативними пристроями та комп'ютерами на невеликій відстані. Ця високошвидкісна швидкість передачі даних може бути збільшена за рахунок збільшення потужності передачі або використання широкої смуги пропускання. Однак багато портативних пристроїв, що працюють за бездротовою технологією, живляться від батареї, тому широка смуга частот буде рішенням для досягнення високої швидкості передачі даних. З цієї точки зору ультраширока (UWB) технологія є революційним підходом у сфері бездротового зв'язку завдяки високій швидкості передачі даних і чудовій стійкості до багатопроменевих перешкод.

Сфера досліджень UWB викликала великий інтерес після рішення Федеральної комісії зв'язку (FCC) у лютому 2002 року, яке дозволило випромінювати дуже низьку спектральну щільність у смузі пропускання 7,5 ГГц від 3,1 ГГц до 10,6 ГГц. Відтоді технологія UWB вважається однією з найперспективніших технологій, що використовуються в різних додатках, таких як радар, зондування та військовий зв'язок. У розробці системи UWB антена відіграє значну роль. Таким чином, практична UWB антена повинна бути розроблена з кращим узгодженням імпедансу, компактним розміром, низькою вартістю, всенаправленою діаграмою спрямованості та плоскою груповою затримкою над UWB областю.

Серед різних типів антен друковані антени зазвичай віддають перевагу для систем зв'язку на основі технології UWB через їхні компактні розміри, низький профіль і легкі можливості інтеграції. Ці антени допомагають зробити систему

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

більш надійною, а також зменшити вартість впровадження. Тому багато зусиль було приділено розробці друкованих UWB антен.

Однак основною проблемою для антени UWB є уникнення перешкод через деякі існуючі технології, які спільно використовують смуги частот у стандартах регулювання UWB. Це WiMAX (діапазон 3,3-3,7 ГГц), WLAN (діапазон 5,15-5,35 ГГц і 5,725-5,825 ГГц), супутникова низхідна лінія X-діапазону (діапазон 7,25-7,75 ГГц), ITU в діапазоні X (діапазон 8,025-8,4 ГГц). Таким чином, важливо відмовитися від перешкод існуючим бездротовим технологіям.

Швидке зростання технології UWB протягом кількох десятиліть привернуло велику увагу дослідницької спільноти. Традиційно він використовувався для отримання радіолокаційних зображень, але останнім часом у зв'язку з технологічним прогресом він дозволяє користувачам отримувати доступ до послуг зв'язку з великою кількістю даних за рахунок низького енергоспоживання. Як важлива частина систем зв'язку, антена також привернула глибоку увагу дослідників і академіків. Серед них друковані монопольні антени дуже популярні через їхні портативні розміри, малу вагу та простоту виготовлення. Проте конструкція антени для застосувань UWB повинна забезпечувати уникнення перешкод з іншими існуючими системами вузькосмугового радіозв'язку. Крім того, антена UWB також страждає від багатопроменевого замирання, яке можна подолати завдяки застосуванню концепції технології MIMO (multi-input multi-output). У цій книзі було проведено вичерпний огляд антен UWB та UWB MIMO з характеристиками діапазону різання.

Зі швидким розвитком технології бездротового зв'язку та зростанням попиту на гнучкі додатки зв'язок наступного покоління (5G) став однією з найгарячіших тем антенної індустрії [1–3]. Через обмеженість ресурсів спектру відомі дослідження зв'язку 5G зосереджені в основному на міліметровому

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

діапазоні. Смуга частот близько 28 ГГц привернула увагу всього світу завдяки ресурсному безперервному спектру [4].

Як одна з найважливіших технологій зв'язку 5G, технологія множинних входів-множинних виходів (MIMO) широко застосовується завдяки високій швидкості передачі та стабільній якості зв'язку. Вона використовує кілька антен для передачі та отримання сигналу в бездротовому зв'язку; таким чином, вона може покращити пропускну здатність системи зв'язку та коефіцієнт використання спектру без збільшення потужності передачі. Оскільки мініатюризація електронного обладнання стала основною тенденцією розвитку технологій, це вимагає розміщення антени з кількома елементами в обмеженій зоні. У той же час система MIMO вимагає високої ізоляції між різними антенами, що, в свою чергу, потребує більшого простору між антенами [5, 6]. Велика проблема для дослідників полягає в тому, щоб знайти найкращий баланс між мініатюрністю та високою ізоляцією.

У сучасних бездротових комунікаціях широко застосовуються антени 2x2 або 4x4 MIMO. Однак зв'язок 5G висуває набагато вищі вимоги, оскільки в обладнанні 5G потрібна 8x8 або навіть масивна антена MIMO. Збільшення кількості антен MIMO ставить перед усіма дослідниками антенної промисловості серйозний виклик. Як один з важливих факторів у технології MIMO, взаємний зв'язок між елементами антени був глибоко вивчений. Як правило, для покращення ізоляції вводяться роз'єднувальні структури, такі як паразитні елементи [7], електронна заборонена зона (electronic band gap – EBG) [8], штучні метаматеріали [9, 10] і фільтри. Однак ці структури розв'язки впливатимуть на характеристики антени. Крім того, інший метод, такий як ортогональне рознесення [11], також використовується для підсилення ізоляції. Ці методи все ще стикаються з проблемами під час застосування у великомасштабній антені MIMO, і однорідність діаграм спрямованості не може бути гарантована.

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У кваліфікаційній роботі представлено широкосмугову антену для зв'язку 5G. Діапазон роботи запропонованої антени становить від 24 ГГц до 39 ГГц. Використовуючи симетричну структуру, запропонована антена реалізує стабільну діаграму спрямованості в такій широкій смузі. На її основі запропоновані та досліджені антени МІМО. Завдяки своїй унікальній структурі висока ізоляція між антенними елементами зберігається при застосуванні великомасштабної решітки.

					КВРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						8
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1 ОГЛЯД БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ ТЕХНОЛОГІЙ 5G

У сфері бездротового зв'язку технологія п'ятого покоління (5G) – це новітнє покоління мобільних мереж. Серед усіх існуючих раніше мобільних мереж 5G забезпечує високошвидкісний доступ до Інтернету в будь-який час, у будь-якому місці та для всіх. 5G дещо відрізняється завдяки своїм новим функціям, таким як взаємозв'язок людей, керування пристроями, об'єктами та машинами. Мобільна система 5G забезпечить різноманітні рівні продуктивності та можливостей, що забезпечить новий досвід користувачів і з'єднає нові підприємства.

1.1 5G Massive MIMO

Технологія кількох входів-множинних виходів (MIMO) є дуже важливою технологією для бездротових систем. Вона використовується для надсилання та отримання кількох сигналів одночасно по одному радіоканалу. MIMO відіграє дуже важливу роль у мережах WI-FI, 3G, 4G і 4G LTE-A. MIMO в основному використовується для досягнення високої спектральної та енергоефективності, але це не було на належному рівні. MIMO забезпечує низьку пропускну здатність і дуже низьку надійність підключення. Щоб вирішити цю проблему, було використано багато технологій MIMO, наприклад MIMO для одного користувача (SU-MIMO), багатокористувацького MIMO (MU-MIMO) і мережевого MIMO. Однак ці нові MIMO також не задовольнили вимоги кінцевих користувачів.

Massive MIMO – це вдосконалення технології MIMO, яка використовується в мережі 5G, у якій сотні й тисячі антен підключаються до базових станцій для підвищення пропускну здатності та спектральної ефективності. Декілька передавальних і приймальних антен використовуються в масивному MIMO для збільшення швидкості передачі та спектральної ефективності. Коли декілька UE (user equipment – UE) генерують трафік

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

низхідної лінії зв'язку одночасно, масивний MIMO отримує більшу пропускну здатність. Massive MIMO використовує додаткові антени для переміщення енергії в менші області простору, щоб підвищити спектральну ефективність і пропускну здатність. У традиційних системах збір даних від інтелектуальних датчиків є складним завданням, оскільки це збільшує затримку, знижує швидкість передачі даних і знижує надійність. У той час як масивний MIMO з формуванням променя та величезними методами мультиплексування може сприймати дані від різних датчиків з низькою затримкою, високою швидкістю передачі даних і високою надійністю. Massive MIMO допоможе в режимі реального часу передавати дані, зібрані з різних датчиків, до центральних місць моніторингу для додатків розумних датчиків, таких як безпілотні автомобілі, медичні центри, розумні електромережі, розумні міста, розумні магістралі, розумні будинки та розумні підприємства.

Основні особливості технології 5G Massive MIMO такі:

- *Швидкість передачі даних:* Massive MIMO рекомендується як одна з домінуючих технологій для забезпечення високої швидкості бездротового зв'язку та високої швидкості передачі даних у гігабітах на секунду.
- *Співвідношення між частотою хвилі та розміром антени:* обидва вони обернено пропорційні один одному. Це означає, що сигнали з нижчою частотою потребують більшої антени, і навпаки.
- *Кількість користувачів:* від 1G до 4G технології одна комірка складається з 10 антен. Але в технологіях 5G одна комірка складається з більш ніж 100 антен. Таким чином, одна маленька комірка одночасно може обслуговувати декілька користувачів, як показано на рисунку 1.1.
- *Роль MIMO в 5G:* Massive MIMO відіграватиме вирішальну роль у розгортанні майбутнього мобільного зв'язку 5G, оскільки може бути забезпечена більша спектральна та енергоефективність.

					КВРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

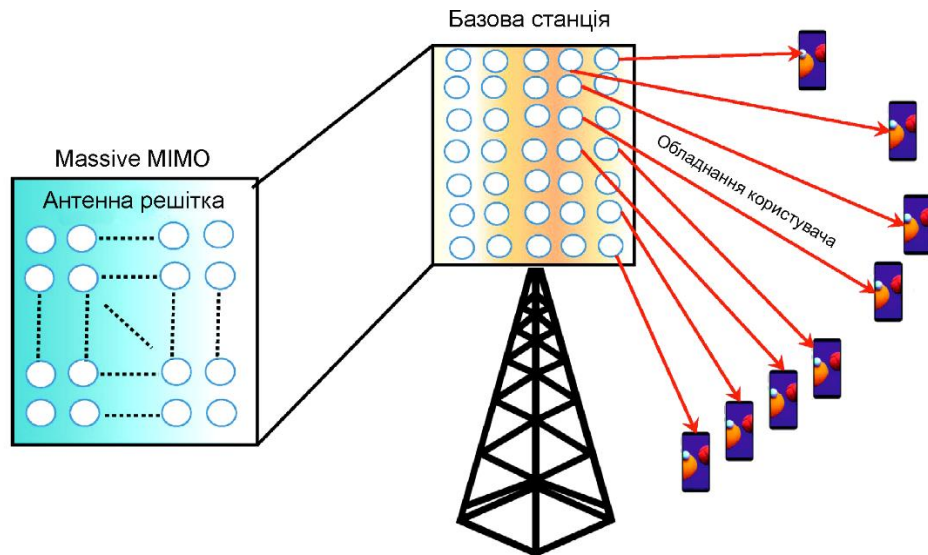


Рисунок 1.1 – Ілюстраційне представлення MIMO

1.2 5G неортогональний множинний доступ (NOMA)

Неортогональний множинний доступ (Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA) є дуже важливою технологією радіодоступу, яка використовується в бездротовому зв'язку наступного покоління. NOMA пропонує багато переваг, таких як висока ефективність використання спектра, низька затримка з високою надійністю та високошвидкісним масовим підключенням. NOMA в основному працює на базовій лінії, щоб обслуговувати кількох користувачів з однаковими ресурсами з точки зору часу, простору та частоти.

NOMA поділяється на дві основні категорії: одна – кодовий домен NOMA, а друга – потужний домен NOMA. Кодовий домен NOMA може підвищити спектральну ефективність mMIMO, що покращує зв'язок у бездротовому зв'язку 5G. Кодовий домен NOMA був розділений на кілька інших методів множинного доступу, таких як множинний доступ до розрідженого коду, множинний доступ із решітчастими розділами, спільний доступ для кількох користувачів і множинний доступ за шаблоном. Потужний домен NOMA широко використовується в бездротових мережах 5G, оскільки добре працює з різними методами бездротового зв'язку, такими як MIMO, формування променя,

						КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			11

просторово-часове кодування, мережеве кодування, повний дуплекс і кооперативний зв'язок тощо. Звичайний множинний доступ з ортогональним частотним поділом каналів (OFDMA), який використовується 3GPP у мережі 4G LTE, забезпечує дуже низьку спектральну ефективність, коли ресурси пропускної здатності розподіляються користувачам із низькою інформацією про стан каналу (CSI). NOMA вирішила цю проблему, оскільки надає користувачам доступ до всіх каналів піднесучої, тому користувачі з сильним CSI все ще можуть отримати доступ до ресурсів пропускної здатності, виділених користувачам із низьким CSI, що підвищує спектральну ефективність.

Мережа 5G підтримуватиме гетерогенну архітектуру, в якій базові станції малих стільникових і макробазових станцій працюють для спільного використання спектру. NOMA є ключовою технологією бездротової системи 5G, яка дуже корисна для гетерогенних мереж, оскільки кілька користувачів можуть обмінюватися своїми даними в маленькій комірці за принципом NOMA. Неортогональний множинний доступ корисний у різних додатках, таких як надщільні мережі (UDN), зв'язок між машинами (M2M) і зв'язок масового машинного типу (mMTC). Оскільки NOMA надає багато функцій, вона також має певні проблеми, наприклад, NOMA потребує величезної обчислювальної потужності для великої кількості користувачів із високою швидкістю передачі даних для запуску алгоритмів SIC. По-друге, коли користувачі переходять з мереж, оптимізація розподілу електроенергії є складним завданням для NOMA.

Гібридна NOMA (HNOMA) є комбінацією NOMA домену потужності та кодового домену. HNOMA використовує як різницю потужності, так і ортогональні ресурси для передачі між кількома користувачами. Оскільки HNOMA використовує як NOMA потужного домену, так і NOMA кодового домену, він може досягти вищої спектральної ефективності, ніж NOMA потужного домену та NOMA кодового домену. У HNOMA декілька груп можуть одночасно передавати сигнали одночасно. Він використовує алгоритм передачі

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повідомлень (MPA) і виявлення на основі послідовного усунення перешкод (SIC) на базовій станції для цих груп.

Основні характеристики технології 5G NOMA:

1. NOMA відрізняється від усіх попередніх методів ортогонального доступу, таких як TDMA, FDMA та CDMA. У NOMA кілька користувачів працюють одночасно в одному діапазоні з різними рівнями потужності, як показано на рисунку 1.2.

2. NOMA забезпечує більш високі швидкості передачі даних і вирішує всі прогалини ОМА, що робить мобільну мережу 5G більш масштабованою та надійною.

3. Оскільки кілька користувачів використовують один і той же діапазон частот одночасно, це підвищує продуктивність усієї мережі.

4. Для налаштування внутрішньостільникових і міжстільникових перешкод NOMA забезпечує неортогональну передачу на кінці передавача.

5. Важливим фактором основи NOMA є підвищення ефективності використання спектра шляхом зміцнення розгалуженості приймача.

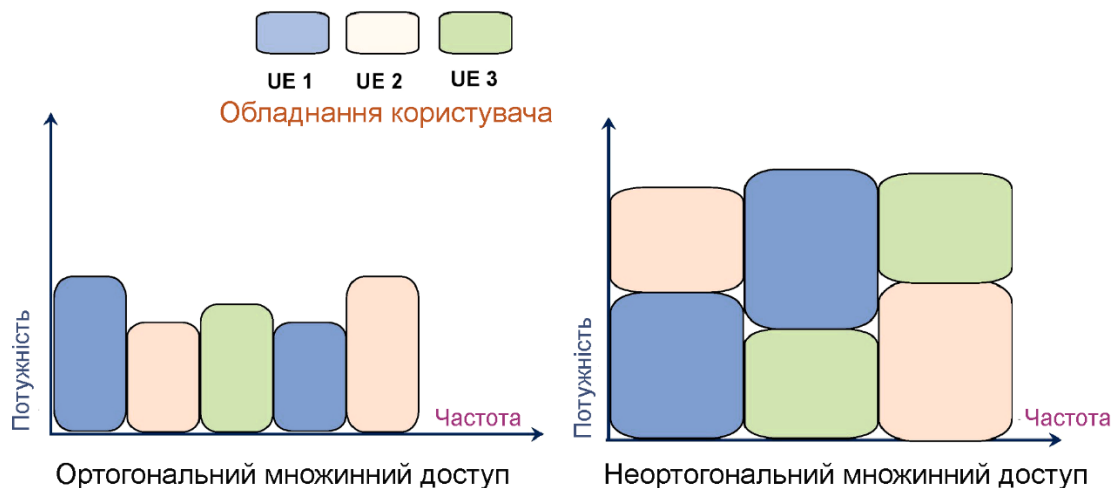


Рисунок 1.2 – Зображення ортогонального та неортогонального множинного доступу

1.3 5G міліметрових хвиль (mmWave)

Міліметрові хвилі (mmWave) – це діапазон надзвичайно високих частот, який дуже корисний для бездротових мереж 5G. Міліметрові хвилі використовує для передачі смугу спектру від 30 ГГц до 300 ГГц. Діапазон частот від 30 ГГц до 300 ГГц відомий як mmWave, оскільки ці хвилі мають довжину хвилі від 1 до 10 мм. Дотепер радіолокаційні системи та супутники використовують лише mmWave, оскільки це дуже швидкі діапазони частот, які забезпечують дуже високу швидкість бездротового зв'язку. Багато постачальників мобільних мереж також запустили mmWave для передачі даних між базовими станціями.

Швидкість передачі даних можна підвищити за допомогою двох способів: один – за рахунок збільшення використання спектру, а другий – за рахунок збільшення пропускної здатності спектру. З цих двох підходів збільшення пропускної здатності є досить простим і кращим. Смуга частот нижче 5 ГГц дуже переповнена, оскільки її використовують багато технологій, тому для підвищення швидкості передачі даних бездротова мережа 5G використовує технологію mmWave, яка замість збільшення використання спектру збільшує смугу пропускання. Щоб максимізувати смугу пропускання сигналу в бездротовому зв'язку, несучу частоту також слід збільшити на 5%, оскільки смуга пропускання сигналу прямо пропорційна несучим частотам.

Смуга частот від 28 ГГц до 60 ГГц дуже корисна для бездротового зв'язку 5G, оскільки смуга частот 28 ГГц забезпечує смугу пропускання до 1 ГГц, а смуга частот 60 ГГц – 2 ГГц. 4G LTE забезпечує несучу частоту 2 ГГц, що забезпечує лише 100 МГц смуги пропускання. Однак використання mmWave збільшує пропускну здатність спектру в 10 разів, що призводить до кращої швидкості передачі.

Основні характеристики 5G mmWave:

- У технологічному світі всі використовують для зв'язку WiMax, GPS, Wi-Fi, 4G, 3G, L-Band, S-Band, C-Band Satellite тощо. Радіочастотний спектр цих

						КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			14

технологій є мінімальним і становить від 1 ГГц до 6 ГГц. Діапазон спектру від 30 ГГц до 300 ГГц, відомий як mmWave, використовується менше і досі не розподіляється для інших комунікаційних технологій. Через тривалий час діапазон від 24 ГГц до 100 ГГц виділяється 5G, як показано на рисунку 1.3.

- 5G mmWave пропонує три переваги:
 - mmWave дуже рідше використовується новий діапазон;
 - сигнали mmWave несуть більше даних, ніж хвилі низької частоти;
 - mmWave можна об'єднати з антеною MIMO, що потенційно може запропонувати більшу пропускну здатність порівняно з поточними системами зв'язку.

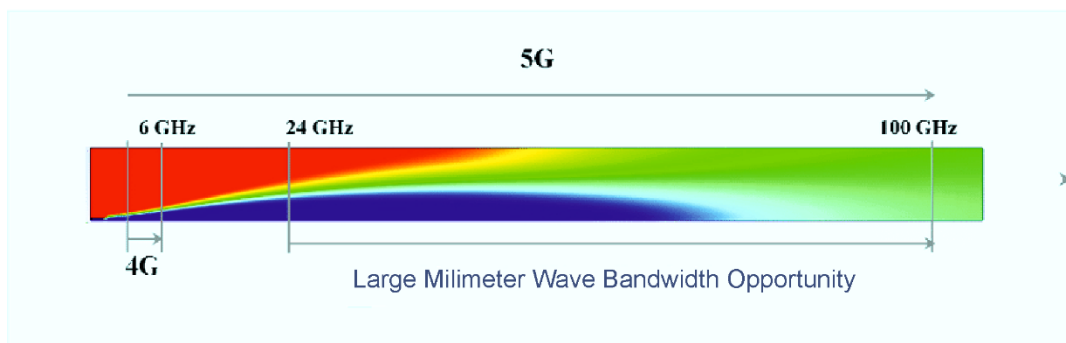


Рисунок 1.3 – Зображення міліметрової хвилі

1.4 Підходи на основі 5G IoT

Мобільна мережа 5G відіграє велику роль у розвитку Інтернету речей (IoT). IoT з'єднає багато речей з Інтернетом, як-от прилади, датчики, пристрої, об'єкти та програми. Ці програми будуть збирати багато даних з різних пристроїв і датчиків. 5G забезпечить дуже високу швидкість підключення до Інтернету для збору, передачі, контролю та обробки даних. 5G – це гнучка мережа з невикористаним доступним спектром і пропонує дуже низьку вартість розгортання, тому це найефективніша технологія для IoT. У багатьох сферах 5G надає переваги IoT, а саме:

Розумні будинки: розумна побутова техніка та продукти сьогодні користуються попитом. Мережа 5G робить розумні будинки більш реальними, оскільки пропонує високошвидкісне підключення та моніторинг розумних пристроїв. Розумна побутова техніка легко доступна та налаштована з віддалених місць за допомогою мережі 5G, оскільки вона пропонує дуже високу швидкість зв'язку з низькою затримкою.

Розумні міста: бездротова мережа 5G також допомагає в розробці додатків для розумних міст, таких як автоматичне управління дорожнім рухом, оновлення погоди, місцеве мовлення, енергозбереження, ефективне електропостачання, розумна система освітлення, управління водними ресурсами, управління натовпом, контроль надзвичайних ситуацій тощо.

Промисловий IoT: бездротова технологія 5G надасть багато функцій для галузей майбутнього, таких як безпека, відстеження процесів, розумне пакування, доставка, енергоефективність, автоматизація обладнання, прогнозне обслуговування та логістика. Технологія інтелектуального датчика 5G також пропонує розумнішу, безпечнішу, економічну та енергозберігаючу промислову експлуатацію для промислового IoT.

Розумне землеробство: технологія 5G відіграватиме вирішальну роль для сільського господарства та розумного землеробства. Датчики 5G і технологія GPS допоможуть фермерам відстежувати живі атаки на посіви та швидко керувати ними. Ці розумні датчики також можна використовувати для контролю зрошення, боротьби зі шкідниками, комахами та контролю електроенергії.

Автономне водіння: бездротова мережа 5G пропонує високошвидкісний зв'язок із дуже низькою затримкою, що дуже важливо для автономного водіння. Це означає, що бездротові мережі 5G незабаром оживуть безпілотні автомобілі. За допомогою 5G автономні автомобілі можуть легко спілкуватися з розумними дорожніми знаками, об'єктами та іншими транспортними засобами, що рухаються по дорозі. Функція низької затримки 5G робить самостійне водіння більш реальним, оскільки кожна мілісекунда важлива для автономних

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

транспортних засобів, рішення приймається за мікросекунди, щоб уникнути аварій.

Основні особливості 5G IoT:

1. IoT називають «Інтернетом речей». Він забезпечує зв'язок між машинами (M2M) і обмінюється інформацією між різноманітними пристроями без втручання людини, як показано на рисунку 1.4.

2. 5G з IoT – це нова функція мобільного зв'язку наступного покоління, яка забезпечує високошвидкісне інтернет-з'єднання між модернованими пристроями. 5G IoT також пропонує розумні будинки, розумні пристрої, датчики, розумні транспортні системи, розумні галузі тощо для кінцевих користувачів, щоб зробити їх розумнішими.

3. IoT працює з помірними пристроями, які підключаються через Інтернет. Підхід IoT взяв до уваги дослідження, пов'язані з результатами надання носимих пристроїв, смартфонів, датчиків, розумних транспортних систем, розумних пристроїв, пральних машин, планшетів тощо, і ці різноманітні системи пов'язані зі спільним інтерфейсом з інтелектом для підключення.

4. Значні додатки IoT включають приватні системи охорони здоров'я, управління трафіком, промислове управління та тактильний Інтернет тощо.

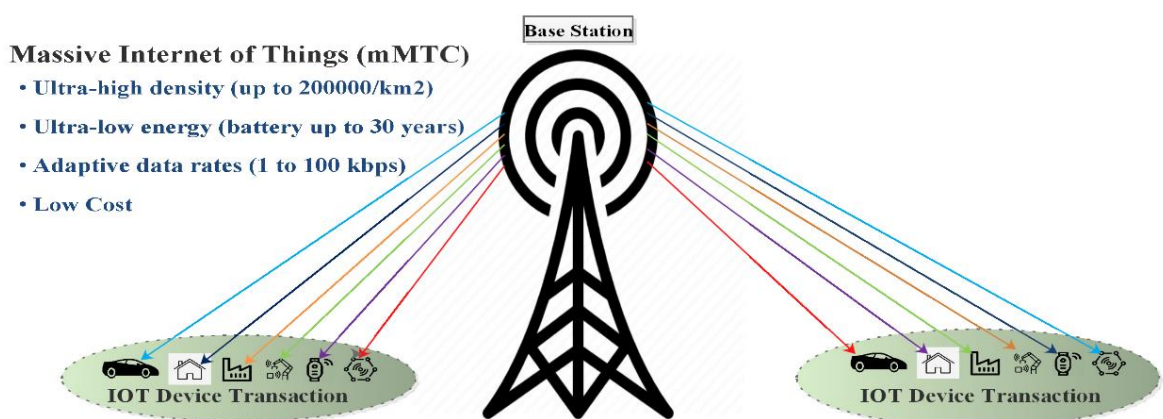


Рисунок 1.4 – Ілюстраційне представлення IoT з 5G

1.5 Методи машинного навчання для 5G

Різні методи машинного навчання (machine learning – ML) застосовувалися в мережах 5G і мобільному зв'язку. Вони забезпечують вирішення багатьох складних проблем, які потребують багато ручного налаштування. Методи ML можна в цілому класифікувати як контрольоване, неконтрольоване та навчання з підкріпленням.

Навчання під наглядом, де користувач працює з позначеними даними; деякі проблеми з мережею 5G можна додатково класифікувати як проблеми класифікації та регресії. Деякі регресійні проблеми, такі як планування вузлів у 5G і доступність енергії, можна передбачити за допомогою алгоритму лінійної регресії (Linear Regression – LR). Щоб точно передбачити смугу пропускання та розподіл частот, застосовано статистичну логістичну регресію (Statistical Logistic Regression – SLR). Деякі контрольовані класифікатори застосовуються для прогнозування попиту на мережу та розподілу мережевих ресурсів на основі продуктивності підключення; це означає налаштування топології та швидкість передачі даних. Машина опорних векторів (Support Vector Machine – SVM) і алгоритми апроксимації на основі NN використовуються для навчання каналу на основі інформації про стан каналу, що спостерігається. Глибинна нейронна мережа (Deep Neural Network – DNN) також використовується для отримання рішень для прогнозування векторів формування променя на базових станціях шляхом врахування функцій відображення та пілотних сигналів висхідної лінії зв'язку.

У неконтрольованому навчанні, коли користувач працює з даними без міток, застосовуються різні методи кластеризації для підвищення продуктивності мережі та з'єднання без перерв. Кластеризація K-засобу зменшує переміщення даних, зберігаючи вміст центрів обробки даних у кластерах. Він оптимізує оцінку передачі на основі моделі мобільності та вибору вузлів ретрансляції в мережі V2V. Ієрархічна кластеризація зменшує збій мережі

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

шляхом виявлення вторгнення в мобільну бездротову мережу; неконтрольоване м'яке кластеризування допомагає зменшити затримку шляхом кластеризації туманних вузлів. Непараметрична байєсовська техніка неконтрольованого навчання зменшує трафік у мережі, активно обслуговуючи запити та вимоги користувача.

У разі невизначеного середовища в бездротовій мережі 5G для вирішення деяких проблем використовуються методи навчання з підкріпленням (RL). Актор-критичне підкріплення навчання використовується для планування користувачів і розподілу ресурсів у мережі.

Основні методи машинного навчання для 5G:

1. Машинне навчання (ML) є частиною штучного інтелекту. Воно обробляє та аналізує дані, автоматизуючи систематичну модель, яка знаходить закономірності та приймає рішення з мінімальним втручанням людини, як це показано на рисунку 1.5.

2. У ML буде визначена модель, яка відповідає бажаним вимогам, за допомогою яких можна отримати бажані результати. На наступному етапі перевіряється точність отриманих результатів.

3. ML відіграє важливу роль в аналізі мережі 5G для виявлення загроз, прогнозування навантаження на мережу, остаточного упорядкування та формування мережі. Пошук кращого балансу між потужністю, довжиною антен, площею та товщиною мережі перетинався зі спонтанним використанням послуг у всесвіті окремих користувачів і типів пристроїв.

1.6 Технології Massive MIMO для 5G

Загальна концепція масивного MIMO визначається як технологія фізичного рівня, яка оснащує кожен базову станцію величезною кількістю активних антен, які можна використовувати для просторового мультиплексування багатьох UE, щоб з ними можна було спілкуватися на

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

одному частотно-часовому ресурсі. Спектральну ефективність на комірку можна покращити на порядки величини порівняно з класичними стільниковими мережами, впоравшись із загасанням сигналу та перешкодами за допомогою просторової обробки сигналу за допомогою таких методів, як комбінування прийому та попереднє кодування передачі. Отже, масивний MIMO є оновленою версією множинного доступу з розділенням простору (SDMA), що виводить просторове мультиплексування на екстремальний рівень.

Бездротовий зв'язок і особливо системи мобільного зв'язку розвиваються неймовірними темпами. Системи радіозв'язку повинні задовольняти зростаючу кількість користувачів і зростаючий попит на нові програми, нові типи трафіку та служби передачі даних. Наприклад, міжмашинний зв'язок підтримуватиме такі концепції, як розумна мережа, розумні будинки та міста та електронна охорона здоров'я, і ці програми мають дуже різноманітні вимоги до зв'язку, необхідні для безперебійної роботи єдиної бездротової технології.

Щоб підвищити пропускну здатність, слід використовувати аспекти пропускну здатності та спектральної ефективності. Збільшення смуги пропускання має свої недоліки з точки зору зменшення відношення сигнал/шум (SNR) на герц для тієї самої переданої потужності, що виправдовує фокус поточних робіт на методах, які покращують спектральну ефективність. Відомим способом підвищення спектральної ефективності є використання декількох антен на приймачах. У цьому контексті системи зв'язку з кількома входами та багатьма виходами (MIMO), засновані на використанні антенної решітки на передавач і приймач, як показано на рисунку 1.5, можуть запропонувати високу швидкість передачі з мінімальною гарантією якості обслуговування. Енергоефективність є ще одним аспектом, важливість якого зростає разом із попитом на бездротові системи. Оскільки ці системи розширюються в різних областях (потужність, антени, термінали, базові станції), споживання електроенергії зросло б неприйнятним чином за допомогою класичних методів. З метою енергоефективності розробляються нові архітектури та підходи.

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

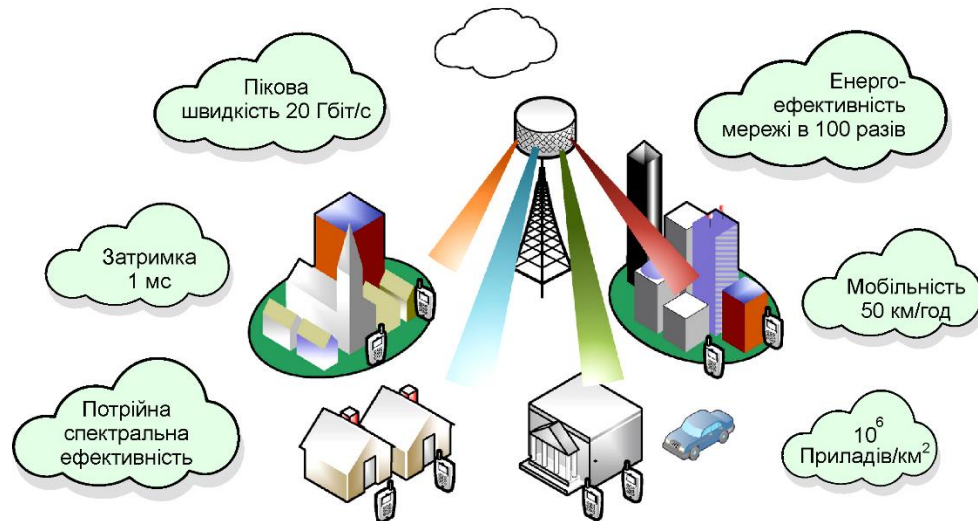


Рисунок 1.5 – Основні цілі 5G та ілюстрації масового розгортання MIMO

В дослідженнях і розробці систем MIMO була надихнута роботою Фоскіні [7] і Телатара [8], результати якої показали стрімке лінійне збільшення пропускної здатності каналу зі збільшенням кількості представлених антен. Системи MIMO дозволяють нам керувати двома різними вимірами радіозв'язку, першим є рознесення, а другим – пропускна здатність. Обидва виміри були предметом досліджень і розробок в останні роки: різноманітність покращує надійність каналу зв'язку, використовуючи переваги кількох антенних каналів, а пропускну здатність можна збільшити за допомогою кількох антен і методів мультиплексування, при цьому максимальна кількість переданої інформації через цей канал. Крім того, замість підвищення продуктивності системи загальну передану потужність можна зробити майже обернено пропорційною кількості передавальних антен [9].

Нові концепції, такі як зв'язок між машинами (M2M) та Інтернет речей (IoT) у повністю підключеній бездротовій мережі, разом із розповсюдженням таких послуг, як відео за запитом або 3D-відео та доповнена реальність, яку використовують мобільні користувачі, сприяють експоненціальному розвитку збільшення трафіку даних у бездротових стільникових мережах. Фактично, протягом наступних кількох років очікується збільшення трафіку даних у

бездротових мобільних мережах у 1000 разів, щоб відповісти на цей глобальний попит. Щоб задовольнити такий попит, стільникова мережа повинна різко збільшити свою пропускну здатність, і використання більшої пропускну здатності або збільшення щільності клітинок мережі не дасть життєздатної відповіді на це. Інша проблема полягає в енергії, необхідній для підтримки високих бітових швидкостей і якості обслуговування (QoS) цих широкосмугових каналів зв'язку. Технологія Massive MIMO забезпечує рішення для збільшення пропускну здатності бездротового зв'язку без використання додаткової пропускну здатності або збільшення кількості комірок. Massive MIMO є розширенням технології MIMO, яка базується на використанні сотень або навіть тисяч активних комунікаційних антен для підвищення спектральної ефективності та пропускну здатності. Слід зазначити, що сьогодні радіомережі складають понад 60% споживання електроенергії мобільними мережами, а з 5G спостерігається тенденція до значного збільшення споживання електроенергії. Таким чином, навіть масивне рішення MIMO пов'язане з неминучою проблемою з енергією, оскільки важливо забезпечити енергоефективність при дотриманні вимог до обслуговування.

1.7 Висновки до першого розділу

У даному розділі проведено огляд бездротового зв'язку технологій п'ятого покоління, а також розглянуто технологію кількох входів-множинних виходів MIMO, яка вважається дуже важливою для бездротових систем. Розглянуті функції мобільної мережу 5G та її функції, які роблять покоління 5G більш надійним, масштабованим, ефективним за доступними тарифами. Як зазначалось, численні технічні проблеми виникають під час впровадження цих функцій або надання послуг через мобільну мережу 5G. Які можна подолати, впроваджуючи технології MIMO, NOMA, small cell, mmWave, beam-forming, MEC через мережу 5G.

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 МІЛІМЕТРОВИЙ ЗВ'ЯЗОК ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЙ 5G

Величезне збільшення трафіку даних відбулося завдяки системі мобільного зв'язку 5-го покоління (5G), яка має швидкість передачі даних 10 Гбіт/с і затримку близько 1 мс. Оскільки попит на стільникові дані зростає, фактична смуга спектру 3 ГГц стає настільки переповненою. Це спонукає до пошуку нових виділених смуг частот мобільного зв'язку, які можуть запропонувати широкопasmовий спектр. Це можна подолати, використовуючи міліметрові хвилі (міліметрові хвилі). Ідея комунікацій у мм-хвилях полягає в тому, щоб скористатися перевагами величезної та невикористаної смуги пропускання, щоб впоратися з майбутніми мобільними, зображеннями та мультимедійними додатками зі швидкістю мультигігабіт на секунду. Незважаючи на те, що технологія міліметрових хвиль відома протягом багатьох десятиліть, системи mmWave в основному розгорталися для військових застосувань. Завдяки розвитку технологічних процесів і недорогих інтеграційних рішень технологія mmWave почала набирати значних обертів серед академічних кіл, промисловості та органів стандартизації. Основна увага в цьому документі полягає в тому, щоб пролити світло на те, як міліметрові хвилі можна використовувати для зв'язку п'ятого покоління, і обговорити, як користувачі наступного покоління можуть отримати високу користь від розумного використання смуги пропускання, доступної в міліметровому спектрі в діапазоні від 30 ГГц. до 300 ГГц.

Міліметрова хвиля є перспективною технологією для стільникових систем майбутнього. Доступний спектр для стільникових систем обмежений. Тому для підвищення спектральної ефективності використовуються різні методики. До них відносяться мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

(OFDM), множинні входи і множинні виходи (MIMO), ефективні методи каналного кодування та координація перешкод.

Нещодавно було також досліджено ущільнення мережі для оптимізації спектральної ефективності зони, на додаток до використання гетерогенної інфраструктури, такої як макро, піко, фемтосоти, реле, розподілені антени [1]. Але лише підвищеної спектральної ефективності недостатньо, щоб гарантувати високу швидкість передачі даних. Вихід – використання міліметрового діапазону. Клієнти 4G використовують наявну смугу пропускання каналів 20 МГц.

Постачальники послуг можуть використовувати спектр міліметрових хвиль для значного збільшення пропускної здатності каналу. Розширення смуги радіочастотного каналу збільшує ємність даних. Крім того, проблему затримки можна зменшити для цифрового трафіку. Це забезпечує розширений доступ через Інтернет і програми, які потребують мінімальної затримки. Можна використовувати поляризацію та нові методи просторової обробки, такі як масивний MIMO та адаптивне формування променя, оскільки частоти мм-хвиль мають набагато меншу довжину хвилі. Спектральні розподіли в спектрі мм-хвиль набагато ближчі. Це робить характеристики розповсюдження діапазонів міліметрових хвиль більш порівнянними та однорідними.

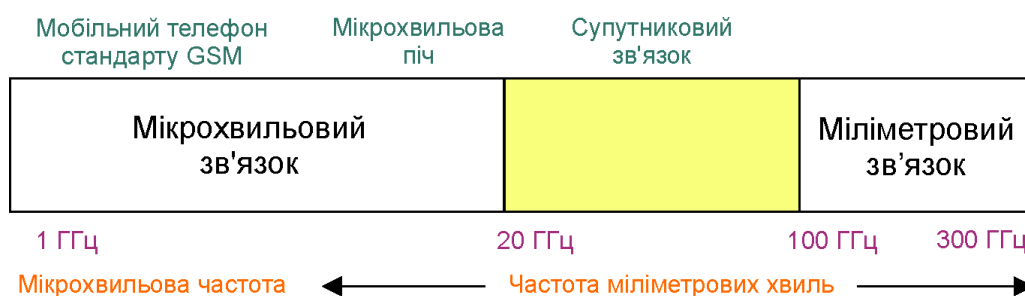


Рисунок 2.1 – Зв'язок на частотах міліметрових хвиль

Зокрема, незбалансовані часові та географічні варіації використання спектру, а також швидке поширення мобільних додатків, що вимагають пропускної здатності, таких як потокове відео з телебаченням високої чіткості (high definition television – HDTV) і відео надвисокої чіткості (ultra-high-definition video – UHDV), надихнули міліметрові хвильовий (mmWave) зв'язок як перспективну технологію для зменшення тиску дефіцитних ресурсів спектру для мобільного широкосмугового зв'язку п'ятого покоління (5G).

2.1 Бездротовий зв'язок п'ятого покоління

Невикористані діапазони частот мм-хвиль, високоспрямовані антени формування променя як на мобільному і базові станції, збільшений термін служби батареї, менша ймовірність відключення, вищі швидкості передачі даних у більшій зоні покриття, нижчі витрати на інфраструктуру та більша сукупна ємність для одночасних користувачів в обох ліцензованих і неліцензований спектр призводить до прогресу та впровадження п'ятого покоління (5G) порівняно з 4G, який використовує більший розподіл спектру [2]. Бездротове з'єднання міліметрових хвиль вважається однією з головних сильних сторін мереж 5G, які перетворюються з міді та оптоволокна, що розгортає сітчасте з'єднання для допомоги між базовими станціями.

Користувачі мобільних телефонів можуть легко отримати доступ до 5G за допомогою будь-яких електронних пристроїв, таких як ноутбуки або планшети, щоб отримати доступне широкосмугове підключення до Інтернету, на додаток до якого ця технологія 5G надає більше можливостей і компетенції. Двонаправлена величезна пропускна здатність, висока швидкість передачі даних, висока роздільна здатність і найвища якість обслуговування (Quality of Service – QoS) – це найкращі функції, які на сьогодні пропонуються та реалізуються технологією 5G. Використання мікрохвильових радіочастотних

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтегральних схем (Radio Frequency Integrated Circuits – RFIC), які забезпечують основну радіотехнологію, вважається ключовим рішенням для мм-хвиль 5G. Високоінтегроване пояснення пропонує RFIC з перевагами компактного розміру, споживання електроенергії та вартості.

Технологія малих стільників міліметрового діапазону може забезпечувати стійку та низьку швидкість передачі даних із кількома гігабітами на секунду для мобільних користувачів у майбутніх бездротових мережах 5G, що забезпечує безпрецедентний доступ до вмісту, додатків і хмарних сервісів. Поточний ріст трафіку мобільних даних зручних пристроїв кидає серйозний виклик мережам стільникового зв'язку 4G, які зараз розгортаються [3]. Існують критичні технічні проблеми, які необхідно вирішити для успішного розгортання та роботи майбутніх гетерогенних бездротових мереж 5G, зокрема:

1. Швидкість бездротового доступу порівняно нижча, ніж у фіксованого доступу.
2. Використання переваг широких неліцензійних або легких ліцензованих діапазонів частот, доступних на частотах міліметрових хвиль, для забезпечення гнучкого використання спектру, а також пікової пропускної здатності понад 10 Гбіт/с, що значно перевищує систему розширення LTE.
3. Споживання енергії стрімко зростає, особливо в частині мобільних радіомереж.
4. Щоб зменшити загальне опромінення людини без шкоди для сприйнятої користувачем якості на великій панелі передбаченого діапазону частот для 5G.

2.2 Спеціальні технології

У діапазоні міліметрових хвиль спектр до 252 ГГц може бути легко використаний системою стільникового мобільного зв'язку. Нижче наведено

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

основні технології, необхідні для того, щоб мобільна система 5G могла ефективно використовувати діапазон мм-хвиль.

2.2.1 Формування променя

Для покращення підсилення антени базової станції та фокусування енергії антени в бажаному напрямку застосовують метод формування променя. Крім того, вузькі промені та спрямовані передачі для стільникового застосування корисні для зменшення перешкод, створених повторним просторовим використанням, що призводить до збільшення співвідношення сигнал/перешкода (signal to interference ratio – SINR) [4]. Перевагою міліметрових хвиль є менша вимога до антени через меншу довжину радіохвилі. Тим не менш, менша антена також призводить до менших ефективних розмірів апертури антени, отже, меншого підсилення антени. Наприклад, згідно з рівнянням вільного простору, міліметровий сигнал на частоті 30 ГГц матиме на 20 дБ більші втрати на шляху порівняно з сигналом на частоті 3 ГГц. Таким чином, антена на частотах мм-Вт на частоті 30 ГГц захоплює в 100 разів менше енергії порівняно з аналогічною антеною на частоті 3 ГГц. Щоб подолати невеликі підсилення антени разом з іншими втратами на хвилях міліметрового діапазону, можна використовувати багатоантенну решітку, яка також відома як розумна антена [5]. Разом із малим розміром антени ($\lambda/2$ диполь або патч), рознос антени (d) може бути зменшений до дуже малої відстані (близько $\lambda/2$) для цілей формування променя. Невеликий розмір і поділ антен міліметрового діапазону дають змогу розміщувати велику кількість антен у невеликому розмірі, що дає реалізацію антени з високим коефіцієнтом підсилення на відносно невеликій території (наприклад, десятки антен на см площі на несучій частоті 80 ГГц).

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Добре відомі два типи інтелектуальних антен – це системи з комутаційним променем і системи з адаптивною решіткою [6]. Системи з перемиканням променів забезпечують заздалегідь визначену групу променів, які можна вибрати відповідно. Недоліком цього методу є те, що цікавий користувач може бути не в центрі дальнього променя. Водночас джерела перешкод не знаходяться в радіаційному нулі. Адаптивні решітки дозволяють антені спрямовувати промінь у будь-якому цікавому напрямку, встановлюючи зацікавленого користувача в центрі головного променя, водночас нулюючи заважаючі сигнали. Методи формування променя є ще одним обмежуючим фактором, пов'язаним з тим, що 5G надає дуже високий пріоритет майже нульовій затримці, що означає необхідність більше покладатися на кремнієву технологію для складної обробки, а не на програмне забезпечення.

2.2.2 Massive Multi Input Multi Output (MIMO)

У радіозв'язку множинні входи та множинні виходи, або MIMO, – це використання кількох антен як на передавачі, так і на приймачі для підвищення продуктивності мобільної системи. Системи MIMO привернули підвищену увагу завдяки своїй здатності підвищувати спектральну ефективність і покращувати пропускну здатність мережі. Як правило, чим більше антен має передавач/приймач, тим більше шляхів проходження сигналу та краща надійність зв'язку та швидкість передачі даних [7]. Методи MIMO раніше були представлені в сучасних мобільних системах 4G. Наступне, що стосується MIMO, це підтримувати збільшення антенних решіток на порядок, більше елементів, ніж у системах, що будуються зараз, наприклад, 100 антен або більше; це було широко відомо як Massive MIMO. Massive MIMO також називається великомасштабними антенними системами, дуже великою MIMO,

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гіпер MIMO та повнорозмірною (FD) MIMO, і вона буде вести шлях до стільникових систем 5G.

2.2.3 Розгортання малих стільників

Ущільнення мережі – це підхід до додавання більшої кількості сайтів стільникового зв'язку для підтримки попиту на трафік, особливо в густонаселених містах і гарячих точках, таких як стадіони та торгові центри. Невеликі стільникові сайти всередині зони покриття вже розгорнутих макросайтів, що призводить до того, що називається багаторівневою або багаторівневою мережею. Завдяки розгортанню малих стільникових вузлів відстань між користувачами та базовими станціями зменшується, що призводить до менших втрат при розповсюдженні, енергоефективності та вищих швидкостей передачі даних. Високошвидкісне користувальницьке обладнання та обладнання, яке не охоплюється малими стільниками, отримує дані та керування від макростільника. UE, охоплені малими стільниками, отримують керування від макростільників і дані від малих стільників. Отже, корисно передавати певні важливі сигнали каналу керування за допомогою мікрохвильових (< 3 ГГц) стільникових радіочастот, одночасно використовуючи міліметрові хвилі для передачі даних з високою швидкістю передачі даних через малі стільники [8].

Переваги мм-хвилі:

1. Більша смуга частот мм-хвиль здатна забезпечити вищу швидкість передачі, можливість розширення спектру та більшу стійкість до перешкод.
2. Кілька коротких відстаней часто досягаються на дуже високих частотах (тобто кілька передавачів часто розміщуються в безпосередній близькості до кожного іншого) використанням на однаковій частоті, не зайняті один одним.

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Ширина променя має бути вузкою. Як тільки частота стає гіперболічною для аналогічного розміру антени, ширина променя зменшується.

4. Розмір апаратного забезпечення зменшено, тобто частота та розмір одиниці площі антени пропорційні кожній різниці.

Обмеження мм-хвилі:

1. Елементи невеликого розміру з більшою точністю підвищують вартість виробництва.

2. Значне загасання відбувається на дуже високих частотах, які навряд чи будуть використовуватися для застосування на великій відстані.

3. Міліметрові хвилі мають меншу здатність проникати крізь такі об'єкти, як бетонні стіни.

4. Взаємодія з елементами й дощем виникає на вищих частотах, у результаті аналізується більше, щоб зменшити рівень перешкод.

2.3 Застосування mm-Wave 5G

5G має потенціал вплинути на суспільство навіть більше, ніж різні мобільні технології, стимулюючи інновації та переробляючи цифровий ландшафт у абсолютно різних галузях і секторах суспільства. Незабаром буде помітна масова доступність телефонів із швидшим ширококутовим зв'язком, автомобілів, які спілкуються з різними транспортними засобами, та гарної транспортної інфраструктури. Доповнять вони інтелектуальне промислове підприємство та інноваційні інструменти для віддаленого доступу до освіти та лікування серед кількох нових розробок на основі 5G. Переваги 5G є міжнародними, вплив і нові можливості поширюються на різні галузі (наприклад, виробництво енергії, транспорт, кваліфіковані послуги, видобуток корисних копалин і охорона здоров'я). Вони спільно поєднують кілька варіантів використання (наприклад,

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

віддалене керування об'єктами, високошвидкісний широкосмуговий зв'язок до будинку та на робочому місці, промислова автоматизація, широкосмуговий зв'язок нового покоління для транспорту). Однак для реалізації переваг мереж 5G потрібне виділення найновішого спектру, особливо у високочастотних діапазонах вище двадцяти чотирьох гігациклів на секунду, які спільно називають мм-хвилями.

5G на основі мм-хвиль може принести вичерпну користь людям, підприємствам і урядам у всьому світі. Економічний вплив 5G у мм-хвилях може відрізнятись між країнами та змінюватись, враховуючи національні пріоритети та виклики, а також через розробку та підготовку додатків 5G. На дальньому боці, на дальньому боці економічний вплив, соціальні переваги міліметрових хвиль 5G значні.

2.3.1 Розумні транспортні логістичні вузли

Mm-wave 5G вплине на транспортну логістичну інфраструктуру, таку як внутрішні транспортні вузли та морські порти. Застосування кількох варіантів використання 5G у мм-хвилях буде розглянуто в контексті інтелектуальної інфраструктури, включаючи широкосмуговий зв'язок наступного покоління для транспорту, віддаленого керування об'єктами та високошвидкісного широкосмугового зв'язку до офісу. Ці додатки 5G у мм-хвилях можуть особливо вплинути на певні галузі, окрім прямої вигоди для торгівлі. Наприклад, у промисловості, гірничодобувній промисловості, сільському господарстві та інших секторах транспортні витрати будуть нижчими. Швидке завантаження та розвантаження вантажів на кораблі, вантажівки та залізничні вагони є критично важливим фактором продуктивності порту. Дистанційне керування об'єктами завдяки з'єднанню 5G у мм-хвилі з центром керування дозволить координувати

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

все більш складні розумні крани, які піднімають контейнери. Ця взаємодія вимагає високого рівня точності, включаючи вимоги до мережі з точки зору низької затримки, надійності та швидкості передачі даних. Ці інновації на основі 5G-мм-хвиль підвищують ефективність і знизять ризики, пов'язані з завантаженням і розвантаженням вантажу. Координація діяльності багатьох видів транспорту – морського, автомобільного та залізничного – стає все більш складним завданням для мультимодальних логістичних центрів.

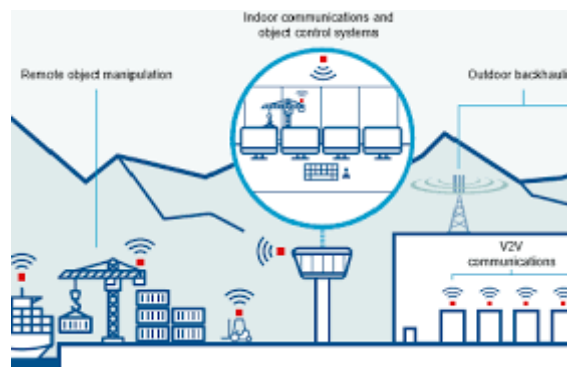


Рисунок 2.2 – Зв'язок MM Wave 5G через Smart Port

Підключення цих різноманітних транспортних засобів до внутрішнього розподільчого флоту та інфраструктури в порту знизить витрати на обробку та переміщення вантажів і збільшить пропускну здатність порту. Системи зв'язку між транспортними засобами (Vehicle-to-Vehicle – V2V) дозволять підключеним транспортним засобам обмінюватися динамічною картою високої чіткості між транспортними засобами, придорожніми підрозділами та менеджерами з логістики. Таким чином, транспортні засоби будуть ефективно переміщатися в складному та мінливому портовому середовищі, щоб забезпечити доставку контейнерів у правильне місце для завантаження та відправлення. Подібним чином зв'язок транспортного засобу для всього (Vehicle-to-Everything – V2X) покращить операції в порту, забезпечуючи скоординоване складування та транспортування в портовому об'єкті.

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3.2 Підключення

MmWave 5G може покращити зв'язок у регіоні, особливо враховуючи його швидку урбанізацію. MmWave 5G може забезпечити швидкість, схожу на оптоволокно, без високих витрат на розгортання фіксованої інфраструктури, дозволяючи міському населенню будь-якого походження підключатися до додатків 5G, які інтенсивно передають дані. Високошвидкісне підключення також принесе користь регіональній економіці, забезпечивши повний спектр варіантів використання mmWave 5G у всіх галузях економіки. Високошвидкісний широкосмуговий зв'язок стає все більш важливою частиною добре функціонуючого міського середовища та ключовою частиною інтегрованої міської політики. Проте розгортання високошвидкісного широкосмугового зв'язку може бути особливо проблематичним у цих міських середовищах. Прокладка кабелю означає отримання смуги відведення (rights-of-way – ROW), дорогий і трудомісткий процес, особливо коли затори вже є проблемою або процедури отримання дозволів заплутані. Як правило, у цих містах мало доступних каналів, а для тих, у яких є, забезпечення місця може вимагати тривалих і дорогих переговорів і бюрократії, а також регулярних зобов'язань за оплату. Цей комплекс викликів робить застосування зв'язку mmWave 5G перспективним для регіону. MmWave 5G може забезпечити високошвидкісне підключення в густонаселеному середовищі за дуже низьку ціну порівняно з оптоволокном, оскільки уникає необхідності розкопувати вулиці та координувати дії з різними рівнями влади. Mm-wave 5G забезпечує підключення за принципом «оптоволокно в повітрі» в міських умовах, досягаючи мультигігабітних швидкостей шляхом передачі через антени з боків будівель, дахів і вуличних споруд (ліхтарні стовпи, світлофори). Невеликі

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

стаціонарні бездротові вузли можна приєднати до існуючих структур і усунути потребу у значних будівельних роботах. До недавнього часу рішення 5G для мм-хвиль не вважалися реалістичним варіантом через їх короткий радіус дії та схильність до блокування. Однак кілька помітних галузевих інновацій усувають багато з цих перешкод. Зокрема, розгортаючи численні антени з декількома шляхами прямої видимості, мережа може перенаправляти трафік непрямым маршрутом, коли виникають непередбачені тимчасові блокування (наприклад, рух транспорту або будівництво будівлі). З часом відбудеться більша інтеграція mmWave із діапазонами нижче 6 ГГц, щоб забезпечити широке покриття та безперебійне підключення, таким чином сприяючи розвитку багатомодових пристроїв. У свою чергу користувачі одночасно підключатимуться до діапазонів нижче 6 ГГц для широкого покриття та діапазонів mmWave для додаткової пропускної здатності та ємності.

Mm-wave 5G може дозволити швидко зростаючим міським громадам уникнути багатьох проблем, пов'язаних із розгортанням фіксованих широкосмугових мереж. Роблячи це, ці спільноти можуть використовувати новітні технології та впроваджувати інновації, доступні завдяки високошвидкісному з'єднанню різними способами, наприклад, у транспорті, охороні здоров'я та освіті тощо.

2.3.3 Застосування mm-Wave 5G у транспорті

У цьому контексті 5G, що підтримується mmWave, пропонує кілька програм для вирішення деяких поточних транспортних проблем, з якими стикаються уряди в регіоні. По-перше, пропускна здатність і низька затримка широкосмугового діапазону mmWave дозволять багатьом додаткам увімкнути підключене транспортне середовище, включаючи V2V, транспортний засіб –

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

інфраструктура (Vehicle-to-Infrastructure – V2I), транспортний засіб – пішохід (Vehicle-to-Pedestrian – V2P), транспортний засіб – мережа (Vehicle-to-Network – V2N) і, зрештою, до екосистеми V2X. Екосистеми V2X можуть забезпечувати низку покращень, особливо для підвищення безпеки завдяки управлінню транспортними засобами (V2V) [9], завчасному сповіщенню про змову чи перешкоду (V2V або V2I), попередженню про пішохідний перехід (V2P), а також кращому дотриманню правил дорожнього руху та адаптивне водіння у випадках автоматизованого або допоміжного водіння. Оскільки очікується, що початкове впровадження 5G буде обмежено великими містами регіону, системи міського громадського транспорту, особливо автобуси, мають можливість одними з перших отримати вигоду від транспортної інфраструктури нового покоління. Уряди також можуть скористатися додатками 5G для мм-хвиль, які дозволяють екосистемам V2X впроваджувати інтелектуальні транспортні системи (ITS) для зменшення заторів у міських районах.

Mm Wave 5G також забезпечить і підтримуватиме високошвидкісне та високоємне широкосмугове з'єднання в транспортних засобах і громадському транспорті, дозволяючи водіям споживати високоємні відеорозваги або додатки доповненої або віртуальної реальності[10]. Транспорт може отримати вигоду від додатків mmWave 5G для підвищення безпеки учасників дорожнього руху, пасажирів і водіїв, зменшення забруднення та покращення якості повітря, а також зменшення заторів у містах, тим самим покращуючи здоров'я та благополуччя громадян.

2.3.4 Застосування mm-Wave 5G в освіті

Нові додатки mmWave 5G можуть сприяти існуючим зусиллям уряду, покращуючи доступ до освіти та якість освіти як для молоді, так і для дорослих.

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Вони можуть допомогти розширити доступ шляхом покращення можливостей дистанційного навчання. Використовуючи мережі mmWave 5G, громади можуть використовувати додатки доповненої реальності (augmented reality – AR) і віртуальної реальності (virtual reality – VR) через високошвидкісний широкосмуговий зв'язок, щоб запропонувати різноманітні віртуальні класи незалежно від місця розташування. Оскільки тактильні Інтернет-додатки стають доступними, онлайн-навчання також може навчити фізичних навичок, яким зараз важко навчити в онлайн-середовищі. Ці можливості можуть бути особливо корисними для кількох груп, у тому числі: молоді студенти, які можуть не мати змоги відвідувати уроки, дорослі учні, які повинні відвідувати уроки, пов'язані з роботою та сімейними зобов'язаннями, а також студенти середніх, вищих або професійних навчальних закладів, які цікавляться предметами, які можуть не можна пропонувати в доступних місцевих університетах або школах. Також з'являються можливості для mmWave 5G для покращення якості освіти.

Багато додатків AR/VR і тактильного Інтернету можуть підвищити якість завдяки кращій взаємодії зі студентами в цілому, чи то у віртуальному, чи то у фізичному класі. MmWave 5G покращить інфраструктуру широкосмугового зв'язку та забезпечить необхідні вимоги до пропускну здатності та затримки, необхідні для підтримки AR/VR і тактильних Інтернет-додатків, що може значно розширити можливості доступу до високоякісної та захоплюючої освіти на відстані, а також покращити загальну якість освіти.

2.4 Основи проектування: підвищення рівня сигналів 5G mmWave

Технологія бездротової мережі п'ятого покоління (5G) рекламується як справжнє «наступне покоління» бездротового зв'язку, здатне досягти рівня продуктивності, що значно перевищує межі поточних бездротових мереж

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

четвертого покоління (4G) довгострокової еволюції (LTE). Хоча бездротові мережі 5G ще не розроблені та не стандартизовані, більшість планувальників глобального системного рівня погоджуються з необхідністю більшої пропускної здатності для збільшення пропускної здатності даних, і очікується, що більша частина цієї додаткової пропускної здатності надходитиме від частотного діапазону mmWave, наприклад 60 ГГц для бездротові зв'язки з високою швидкістю передачі даних на короткі відстані. Використання сигналів mmWave виявилось досить успішним в автомобільних радарх 77 ГГц як частина систем безпеки для запобігання зіткненням, а широка смуга частот, доступна в діапазоні частот mmWave (від 30 до 300 ГГц), обіцяє збільшення пропускної здатності мережі в порівнянні з 4G/LTE, який швидко досягає своїх меж. Однак для побудови мереж 5G із використанням смуги пропускання mmWave потрібні сигнали mmWave достатньої потужності, що залежатиме від наявності практичних РА mmWave.

Створення mmWave РА не є тривіальним. Сигнали на цих частотах отримали таку назву через те, що їх довжина хвилі становить лише від 1 до 10 мм. Враховуючи фізичний зв'язок між частотою, довжиною хвилі та різними характеристиками схеми, необхідними для підтримки роботи на цих високих частотах, наприклад, резонаторами та структурами ліній передачі, проблеми при проектуванні виникають через надзвичайну мініатюризацію схем mmWave та необхідність зберегти потужність сигналу настільки, наскільки можливо за рахунок мінімізації втрат прямого та відбитого сигналу.

Бездротові/стільникові мережі попереднього покоління базувалися на підтримці голосового зв'язку, хоча це почало змінюватися з системами 2G і 3G. Природа сучасних комунікацій змінилася, головним чином через вплив Інтернету, і стала дуже орієнтованою на дані, а продуктивність мережі визначається з точки зору швидкості передачі даних і ємності даних.

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Наприклад, збільшення використання пристроїв Інтернету речей (IoT) створить потребу в бездротових мережах із значно більшою ємністю даних і пристроях із низьким енергоспоживанням. Багато пристроїв *se* «завжди ввімкнено» та «завжди підключені» до Інтернету через пропускну здатність бездротової мережі. Це на відміну від смартфона, який може простоювати протягом тривалого періоду часу без використання ємності мережі. Але багато пристроїв IoT повинні залишатися підключеними, наприклад, для медичного моніторингу та моніторингу охорони здоров'я, і очікувана пропускну здатність мережі повинна бути доступна в системах 5G. Прогнози різняться залежно від кількості пристроїв IoT, яким знадобиться доступ до бездротової мережі в найближчі кілька років, але цифри в кілька трильйонів пристроїв свідчать про величезні вимоги до пропускну здатності/ємності даних лише на основі пристроїв IoT, навіть не враховуючи зростання кількості смартфонів. в тих же мережах.

Неминучість бездротових мереж 5G пов'язана з тим, що поточні мережі 4G обмежені в ємності та швидкості передачі даних. Порівняно з бездротовими мережами 3G, мережі 4G досягли покращення продуктивності за рахунок підвищення ефективності використання спектру, як правило, завдяки використанню вдосконалених методів модуляції та кодування. Технології антени, такі як схеми MIMO, також допомогли підвищити ефективність спектру в системах 4G, а також використання нових радіотехнологій, таких як OFDM, щоб краще використовувати доступний спектр. Ці вдосконалення зробили можливими відносно високі швидкості передачі даних у системах 4G/LTE, до 1 Гбіт/с для стаціонарних пристроїв і близько 100 Мбіт/с для рухомих мобільних пристроїв, які спілкуються через мережу. Але прихильники бездротових мереж 5G відзначають вимоги до пропускну здатності такої кількості пристроїв IoT і зростаючі вимоги до швидкої передачі даних і потокового відео, сподіваючись,

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

що системи 5G працюватимуть у 10 разів швидше, ніж мережі 4G/LTE, або 10 Гбіт/с.

На пропускну спроможність бездротової мережі впливає низка факторів, зокрема доступна пропускна здатність, кількість каналів зв'язку, кількість комірок і рівень співвідношення сигнал/шум системи. Додавши пропускну здатність у вигляді частот mmWave, бездротові мережі 5G можуть збільшити пропускну здатність, але системні планувальники сподіваються зробити це без значного збільшення споживання енергії, вимога, яка вплине на дизайн РА для мереж 5G, будь то на mmWave або нижче частоти.

2.5 Досягнення моделювання на системному рівні для підтримки 5G

Етап дослідження високопродуктивних систем зв'язку 5G триває повним ходом, тривають дослідження сприятливих технологій, які підтримуватимуть використання більшого спектру та мм хвильових частот, менших осередків високої щільності, покращеної енергоефективності пристроїв, нових схем модуляції для співіснування різних пристроїв, а також OTA-передача високої спрямованості стала можливою завдяки реалізації масивних антенних решіток МІМО та технологій керування променем.

Цілі для зв'язку 5G дуже амбітні: у 10 000 разів більше трафіку, у 1 000 разів збільшена пропускна здатність, значно нижча затримка, дуже висока пікова та стабільна швидкість передачі даних, набагато довший час роботи батареї та менша вартість пристрою.

Для підтримки 5G діапазон частот мобільного зв'язку буде розширено, щоб включити нові розподіли спектру нижче 6 ГГц, а також більш високі діапазони частот, які доповнюватимуть нижчі діапазони, забезпечуючи додаткову пропускну здатність системи та дуже широку смугу пропускання

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

порядку 1 ГГц або більше для діапазонів вище 30 ГГц. Ці вищі частотні діапазони забезпечать дуже широку смугу пропускання, необхідну для екстремальних швидкостей передачі даних у щільних розгортаннях. Однак, оскільки частоти вище 30 ГГц мають нижчі властивості розповсюдження (більші втрати), більш широко використовуватимуться нижні діапазони, які слугуватимуть основою для мереж мобільного зв'язку 5G.

2.6 Масивні антенні решітки MIMO та формування променя

Очікується, що масивна обробка сигналу MIMO та формування променя відіграє вирішальну роль у 5G, оскільки вона значно покращує покриття та покращує роботу користувачів у всьому діапазоні діапазонів частот. Massive MIMO, термін, введений спільнотою 5G для опису антен з багатьма елементами (до 128), значно сприятиме необхідному збільшенню пропускну здатності 5G. Massive MIMO використовуватиме технологію формування променя, яка потім дозволить системам 5G точно визначати та направляти сигнали до конкретних користувачів і відстежувати цих користувачів, щоб вони завжди мали хороше покриття. Це також увімкне спрощені приймачі на стороні обладнання користувача.

Ще однією перевагою, яку пропонує формування променя, є можливість передавати значно меншу потужність завдяки посиленню масиву, що, у свою чергу, призводить до певного зниження складності апаратного забезпечення. Наприклад, підсилювачі потужності (PA) і допоміжні схеми в традиційній базовій станції домінують у споживанні електроенергії близько 1 кВт для трьох секторів через їх потребу забезпечити високу вихідну потужність РЧ і їх низьку ефективність при роботі зі значним відривом для досягнення лінійності. вимоги [1]. У Massive MIMO аналогічний діапазон може бути покритий загальним

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

споживанням електроенергії 15 Вт для 100 антен. Масивний МІМО також допомагає протидіяти впливу вищих втрат при розповсюдженні на частотах міліметрових хвиль, більш ефективно спрямовуючи енергію по каналу. Крім того, формування променя покращує радіосередовище, обмежуючи перешкоди невеликими частинами всього простору навколо передавача, а також обмежуючи вплив перешкод на приймач нечастими стохастичними подіями. Використання формування променя також буде важливою технологією для низьких частот; наприклад, щоб розширити покриття та забезпечити вищу швидкість передачі даних у розріджених розгортаннях.

Інша мета полягає в тому, щоб забезпечити в самій технології МІМО можливості просторового мультиплексування, які збільшують пропускну здатність користувача. Використовуючи решітки із сотнями антен на базових станціях, які одночасно обслуговують багато десятків терміналів низької складності в одному часовому частотному ресурсі за допомогою замкнутого просторового мультиплексування/демультиплексування (багатокористувацьке попереднє кодування/декодування МІМО), 10x або більше збільшення валової пропускну здатності можна досягти за допомогою масивного МІМО. Можливо, навіть більш важливим є значне підвищення надійності завдяки вирівнюванню глибоких завмирань, зміцненню каналу та посиленню масиву [2].

2.7 Висновки до другого розділу

Зв'язок міліметрових хвиль (мм-хвиль) був прийнятий як технологія для мобільних систем 5G. Ця технологія забезпечує швидкість передачі даних у діапазоні частот від 30 ГГц до 300 ГГц. У цьому розділі було проведено зосереджене дослідження проблем міліметрового діапазону хвиль і основних технологій, необхідних для того, щоб мобільна система 5G могла ефективно

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовувати цей діапазон. Високі втрати на трасі, атмосферне затухання, загасання дощів і обмежена продуктивність пристрою, ймовірно, є основними перешкодами для створення практичних схем і систем на частотах мм-хвиль. З іншого боку, величезна доступна смуга пропускання, менший розмір антени, краща роздільна здатність і проникаюча здатність крізь тонкі матеріали є унікальними якостями, які роблять системи мм-хвиль привабливими. Доступна велика смуга пропускання на частотах міліметрового діапазону, що сприяє дуже високій швидкості передачі даних.

					КВРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						42
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У зв'язку система є широкосмуговою, коли пропускна здатність повідомлення значно перевищує пропускну здатність когерентності каналу. Деякі канали зв'язку мають настільки високу швидкість передачі даних, що вони змушені використовувати широку смугу пропускання; інші канали можуть мати відносно низьку швидкість передачі даних, але навмисно використовувати ширшу смугу пропускання, ніж «необхідно» для цієї швидкості передачі даних, щоб отримати інші переваги; див. розширений спектр.

Широкосмугова антена – це антена з приблизно або абсолютно однаковими робочими характеристиками в дуже широкій смузі пропускання. Він відрізняється від широкосмугових антен, де смуга пропускання є великою, але коефіцієнт посилення антени та/або діаграми спрямованості не повинні залишатися незмінними в смузі пропускання.

Швидкий розвиток систем бездротового зв'язку вимагає багатодіапазонних або широкосмугових антен для підтримки різних технологій і стандартів. Бездротова локальна мережа тепер має різні стандарти, наприклад IEEE 802.11 b/g як один із стандартів WLAN, що працює на частотах від 2,4 ГГц до 2,48 ГГц, тоді як IEEE 802.11a/g використовує частоти від 5,15 ГГц до 5,35 ГГц або 5,725 ГГц до 5,825 ГГц. Ці стандарти WLAN розроблені для малого радіусу дії приблизно до однієї або двохсот метрів від передавача (стандарт WiFi). Інші стандарти, такі як IEEE 802.16 d/e, призначені для отримання ширшого покриття, що працюють на інших частотах, і відомі як технологія WiMax. WiMax має різні розподіли частот і відрізняється від країни до країни. В Індонезії смуги частот 2,3 ГГц і 3,3 ГГц були призначені для підтримки технології WiMax. Тому існує потреба у виробництві антен, які можуть працювати з різними діапазонами частот для підтримки різних технологій і стандартів.

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

3.1 Конструкція широкосмугової антени

Запропонована антена надрукована на підкладці Rogers 4003C з відносною діелектричною проникністю $\epsilon = 3,4$. Габаритний розмір запропонованої антени становить 14 мм x 14 мм x 0,8 мм. Вид зверху та вид знизу антени показано на рисунках 3.1,а та 3.1,б відповідно. Детальні розміри запропонованої антени представлено в таблиці 3.1.

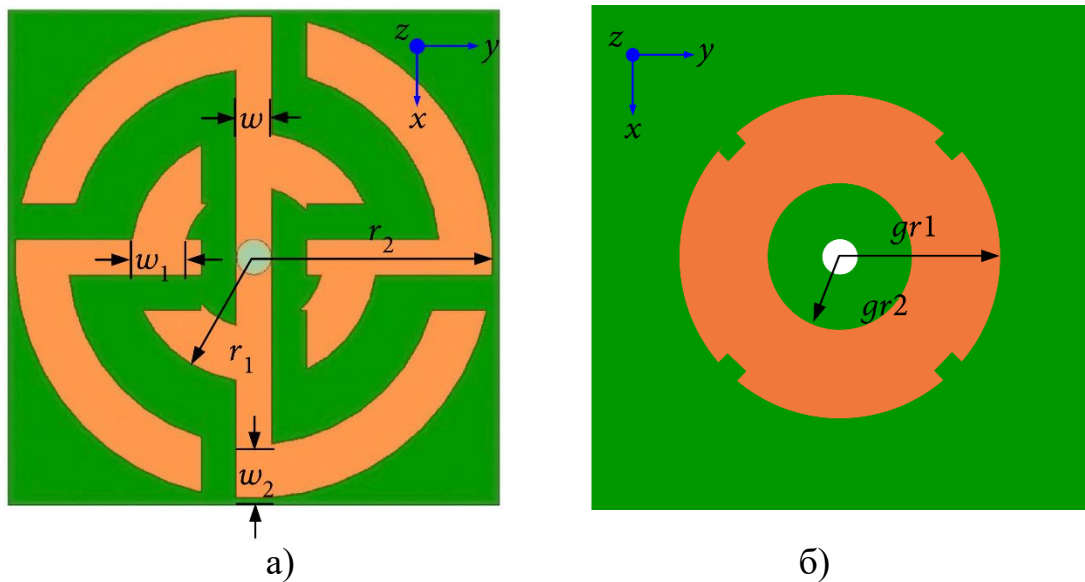


Рисунок 3.1 – Верхня (а) і нижня частина (б) запропонованої антени

Таблиця 3.1 – Розміри запропонованої антени (мм)

w	w_1	w_2	r_1	r_2	gr_1	gr_2
1	1.5	1.5	3.5	6.8	4.5	2

Запропонована антена розроблена на основі звичайної монопольної (однополюсної) антени. Радіус зовнішнього кола дорівнює 6,8 мм. Таким чином, довжина найдовшої гілки становить 11,1 мм, що близько до довжини хвилі у

вільному просторі на частоті 26 ГГц. Зігнута конструкція використовується для мінімізації загального розміру антени. На найдовшій гілці додається внутрішня дуга радіусом 3,5 мм; отже, довжина внутрішньої дуги становить 8,9 мм, що близько до довжини хвилі у вільному просторі на частоті 32,5 ГГц. Напрямки внутрішньої та зовнішньої дуг протилежні, що може послабити прихильність між двома дугами. Крім того, додається інша така ж структура, оскільки симетрична структура може сприяти таким характеристикам випромінювання, як діаграма спрямованості та пікове підсилення. Для підсилення резонансу на високих частотах на гілках внутрішнього кола додані прорізи шириною 0,2 мм. Як показано на рисунку 3.2, дві основні резонансні частоти з'являються приблизно на 26 ГГц і 32,5 ГГц.

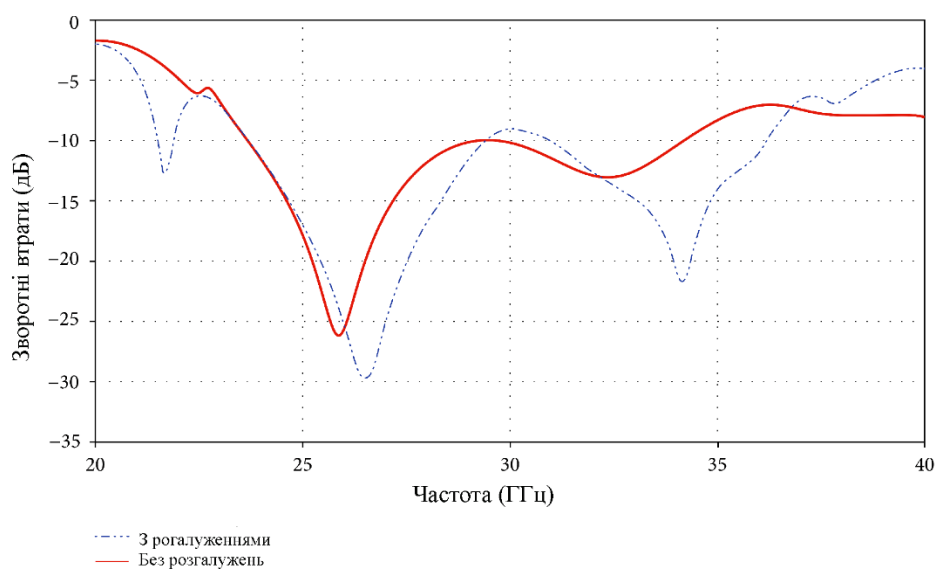


Рисунок 3.2 – Зворотні втрати запропонованої широкопasmової антени з відгалуженнями та без них

Оскільки параметр S_{11} є незадовільним на високих частотах, дві чергувані гілки додаються як паразитні елементи з обох сторін антени для введення резонансів на високих частотах. Відстань між паразитними елементами та

основною структурою встановлюється як 1 мм, щоб переконатися, що паразитні гілки можуть передавати енергію з порту. Довжина найдовшої гілки паразитних елементів становить 9,1 мм, що близько до довжини хвилі у вільному просторі на частоті 33 ГГц.

Основна площина запропонованої антени виконана у вигляді кільця. Це тому, що структури на верхній стороні здебільшого круглі; інші геометрії введуть непотрібні ємності та індуктивності, що призведе до погіршення пропускної здатності. У центрі підкладки додається отвір для подачі. Враховуючи розміри роз'єму 2,92 мм, з'єднувач К, який може працювати на частоті до 40 ГГц, радіус прохідного отвору встановлюється рівним 0,5 мм, а внутрішній радіус площини заземлення – 2 мм.

Крім того, слоти вигравірувані на площині заземлення для покращення узгодження імпедансу. Після параметричного дослідження, показаного на рисунку 3.3, ширина та довжина прорізів становлять 0,4 мм та 0,7 мм відповідно.

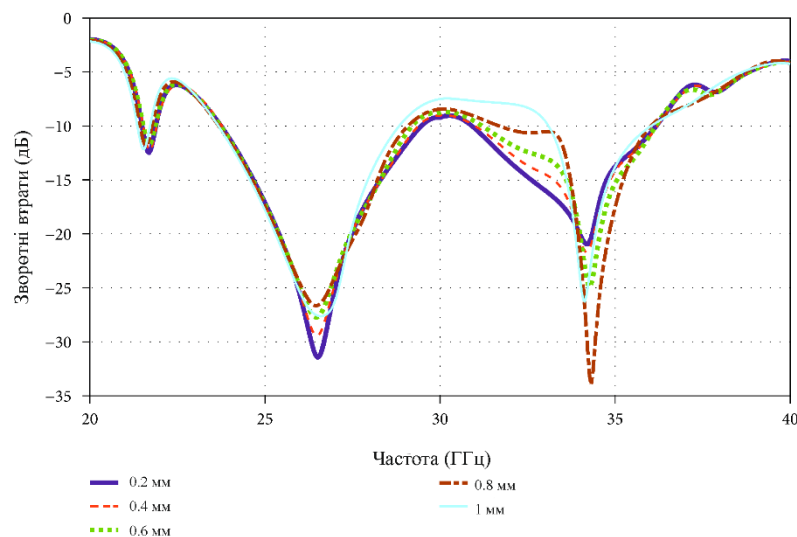


Рисунок 3.3 – Параметричне дослідження малих надрізів на заземленій площині

Використовуючи HFSS, зворотні втрати запропонованої антени з і без відгалужень представлені на рисунках 3.2 та 3.3, де видно, що гілки з

чергуванням можуть розширити робочу смугу пропускання та зменшити зворотні втрати. Також видно, що два сильні резонанси з'являються приблизно на частотах 27 ГГц і 34 ГГц. Діапазон робочих частот становить від 23,5 ГГц до 36 ГГц, що охоплює більшу частину потенційного діапазону зв'язку 5G у міліметровому діапазоні.

Змодельовані діаграми спрямованості наведені на рисунку 3.4.

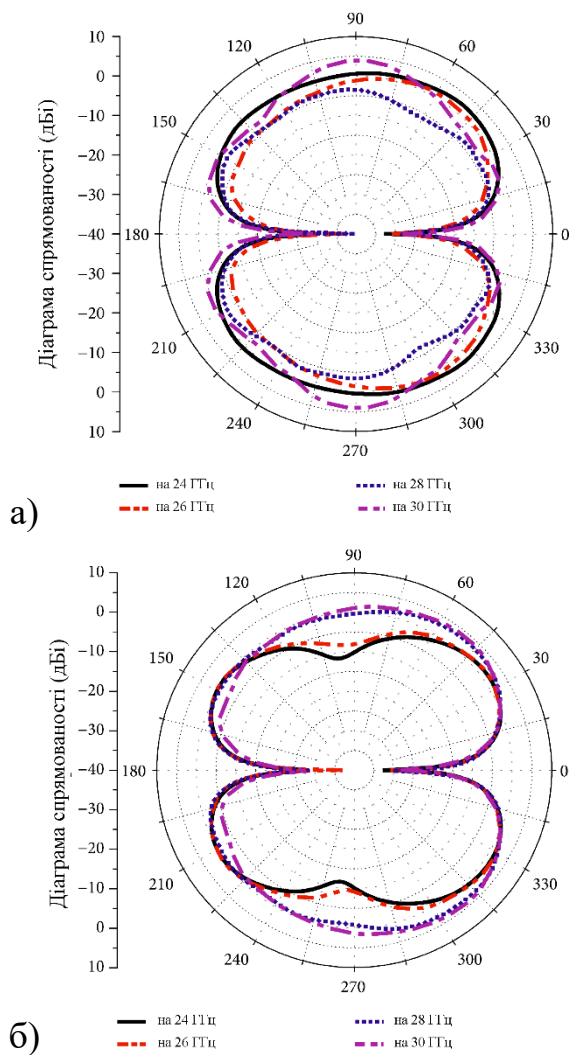


Рисунок 3.4 – Змодельовані діаграми спрямованості запропонованої антени на площині-хоз (а) і площині-уоз (б)

Діаграми спрямованості показують, що запропонована надширокосмугова антена МІМО має приблизне всепрямоване випромінювання. Крім того, зміна

діаграм спрямованості незначна в такому широкому робочому діапазоні частот. Змодельоване підсилення запропонованої антени представлено на рисунку 3.5. Можна виявити, що максимальне підсилення запропонованої антени може досягати 5 дВі на кількох частотах.

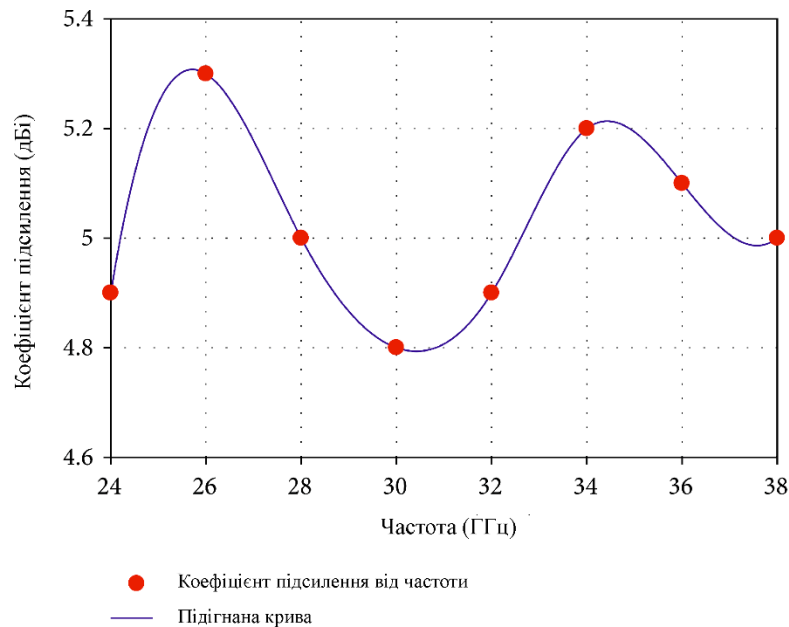


Рисунок 3.5 – Змодельований коефіцієнт підсилення запропонованої антени

3.2 Конструкція антен МІМО

Щоб дослідити потенціал застосування в різних випадках, розглядаються антени МІМО з різним розподілом. Геометрія та змодельовані активні S-параметри представлені на рисунках 3.6 та 3.7. Можна чітко побачити, що активні S-параметри запропонованої антени демонструють стабільну роботу, яка вказує на те, що взаємний зв'язок підтримується на досить низькому рівні при зміні положення елемента антени. Цей факт означає, що геометрію запропонованої антени МІМО можна вільно налаштовувати за потреби.

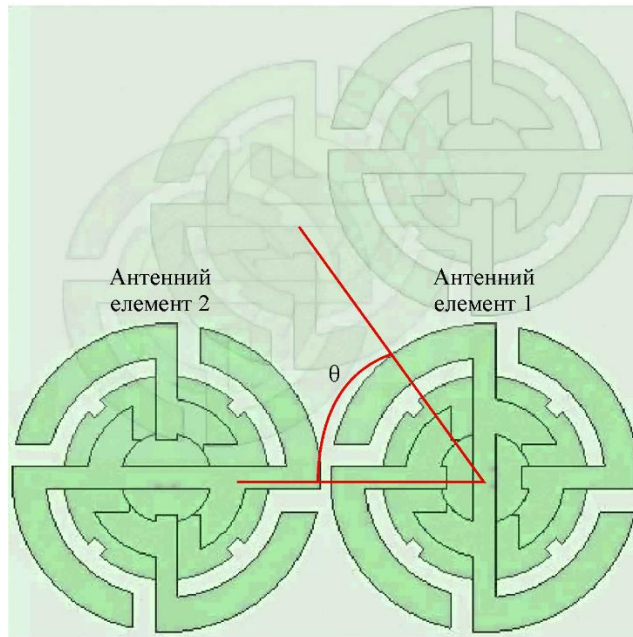


Рисунок 3.6 – Геометрія антени МІМО

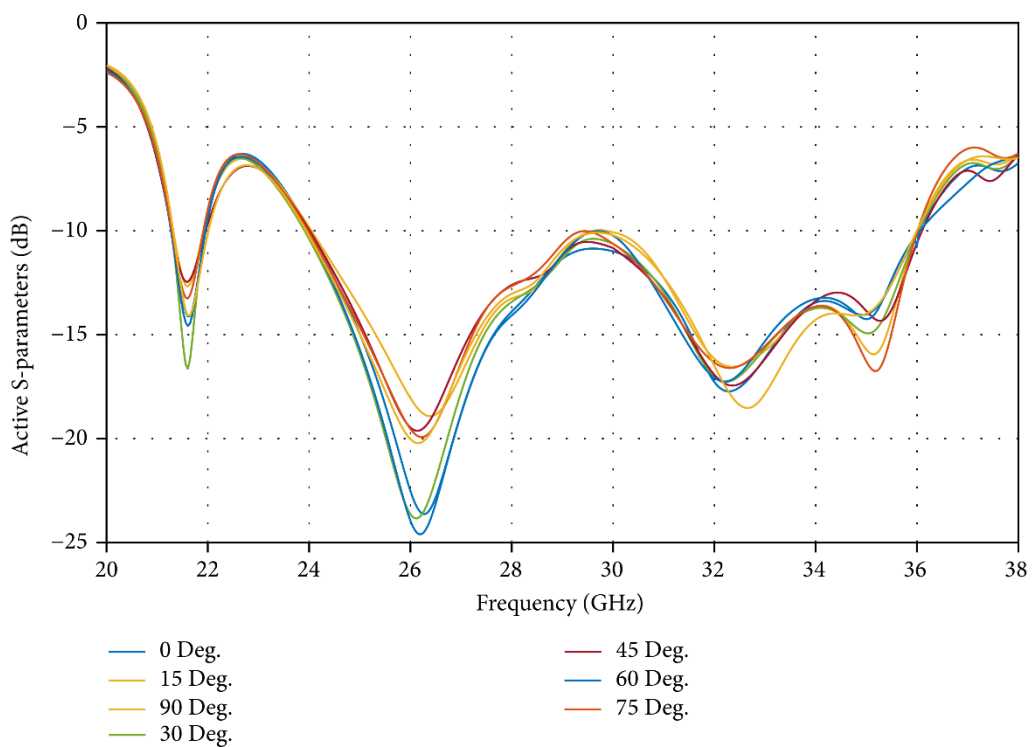


Рисунок 3.7 – Змодельовані активні S-параметри антени МІМО з різним кутом між двома елементами

Для подальшого дослідження взаємного зв'язку між елементами антени було змодельовано розподіл струму на антені МІМО (рисунок 3.8). Перевага від перехресної структури запропонованої антени полягає в тому, що напрямки

спрямованості, сполучена з ними енергія набагато нижча. Так само, як показано на рисунку 3.8, б, випромінювання в основному забезпечується паразитними гілками на частоті 34 ГГц. Енергія, що подається на елементи 4 і 6 антени, дуже низька, і енергія, що подається на елементи 2 і 8 антени, поглинається довгими гілками.

На основі вищезазначеної антени розроблена антена МІМО, яка зображена на рисунку 3.9. Елементи окремої антени МІМО такий, як показано на рисунку 3.1. Відстань між елементами антени становить лише 0,4 мм, що становить $0,03 \lambda_0$ (λ_0 – довжина хвилі у вільному просторі на частоті 24 ГГц). На рисунку 3.10 представлені S-параметри МІМО 9 x 9. Можна побачити, що антена МІМО все ще резонує від 24 ГГц до 37 ГГц, а ізоляція між елементами антени підтримується на високому рівні (коефіцієнт передачі менше -20 дБ) у робочому діапазоні.

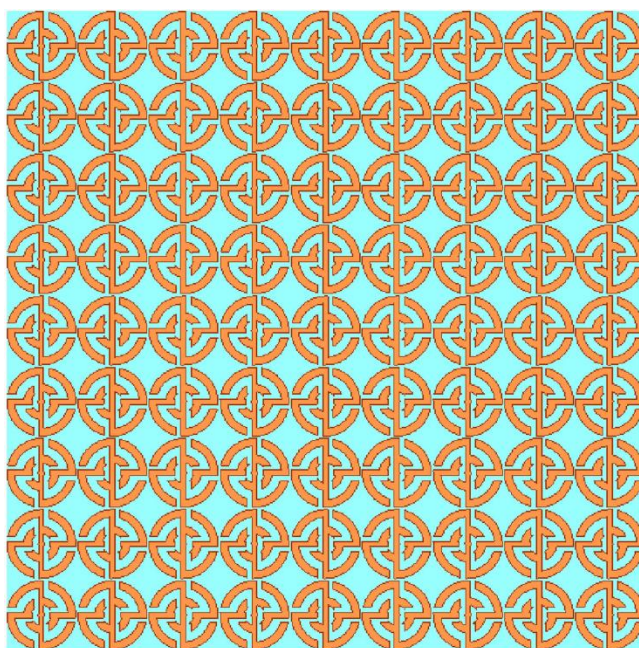


Рисунок 3.9 – Геометрія антени МІМО

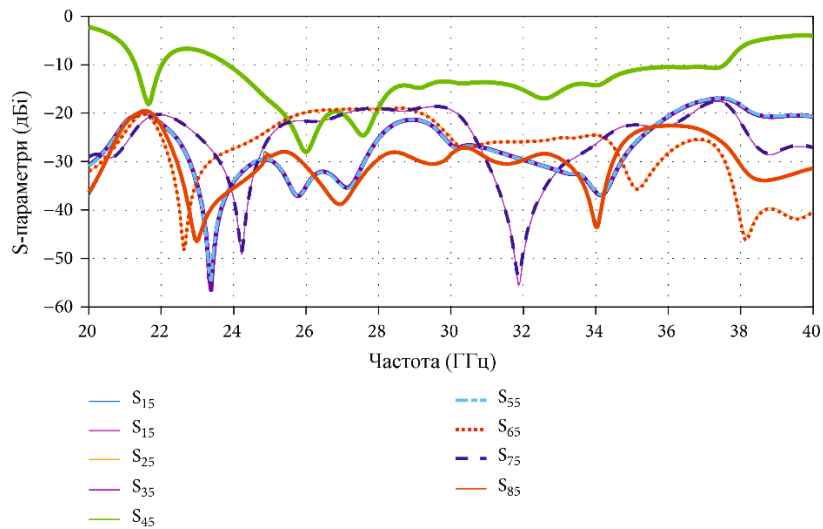


Рисунок 3.10 – S-параметри антени МІМО

На рисунку 3.11 показані змодельовані тривимірні (3-D) діаграми спрямованості. З рисунка 3.11 видно, що випромінювання запропонованої антени набагато сильніше в напрямку z завдяки її унікальній структурі. Ця характеристика забезпечує високу ізоляцію в такому замкнутому просторі без введення зовнішньої роз'єднувальної структури. Змодельоване підсилення одного антенного елемента антени МІМО представлено на рисунку 3.12. У порівнянні з рисунком 3.5 можна побачити, що завдяки перевагам інших елементів максимальне підсилення одного елемента досягає 7,5 dBi на 24 ГГц.

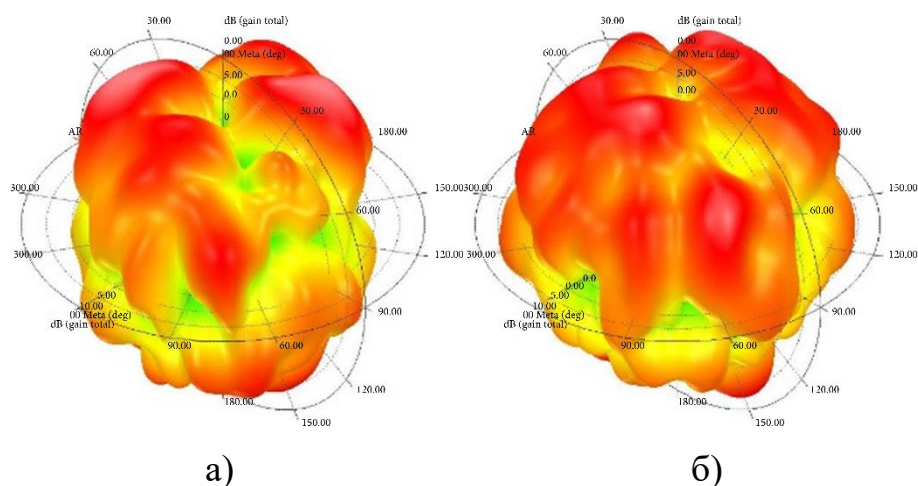


Рисунок 3.11 – Змодельовані тривимірні діаграми спрямованості антени 3 x 3 МІМО на а) 28 ГГц та б) 32 ГГц

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

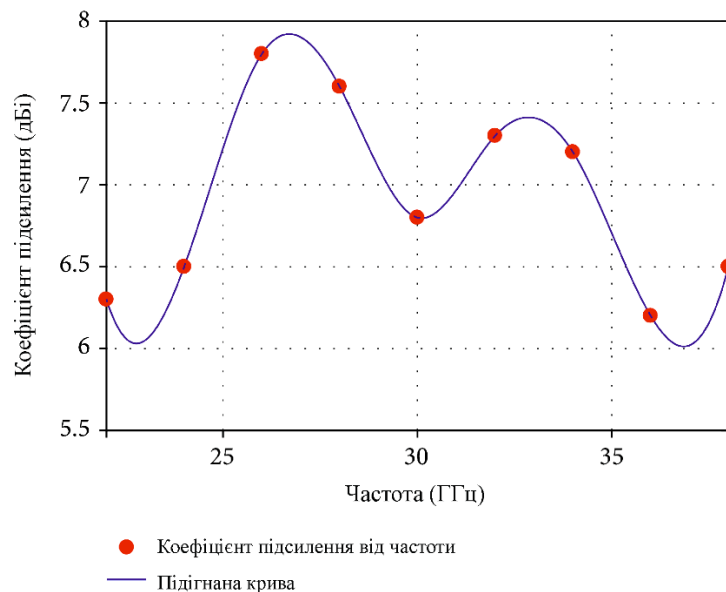


Рисунок 3.12 – Змодельоване підсилення одного елемента запропонованої антени МІМО

3.3 Результати дослідження запропонованої антени МІМО

Щоб перевірити розроблені підходи, розроблена антена МІМО представлено на рисунках 3.13.

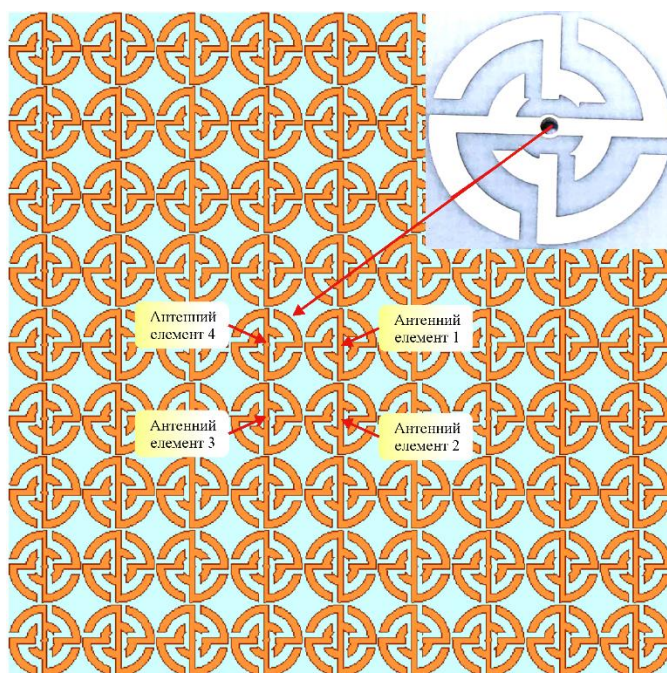


Рисунок 3.13 – Змодельована конструкція антени МІМО 9 x 9

Виміряні S-параметри представлені на рисунку 3.14, де експериментальні результати добре узгоджуються з змодельованими. В експерименті, враховуючи вартість і симетричність всієї конструкції, використано роз'єми 9 К і з'єднували їх з центральними. Потім знято їх і підключено кінцеві кінці до портів на краю. Порівнюючи S_{13} з S_{12} , видно, що взаємозв'язок значно зменшується, коли відстань між елементами антени збільшується.

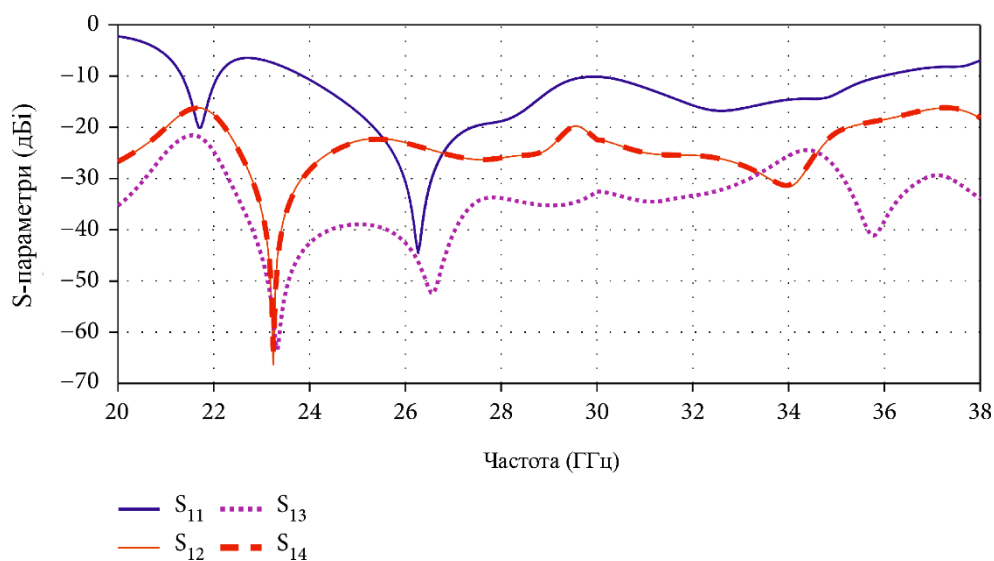


Рисунок 3.14 – Виміряні S-параметри антени МІМО

Під час вимірювання діаграми спрямованості одна антена збуджена, а інші підключені до навантаження 50Ω . Виміряні діаграми спрямованості представлені на рисунку 3.15, де видно, що запропонована антена МІМО 9×9 має приблизне всенаправлене випромінювання, і діаграма спрямованості незначно змінюється в такому широкому робочому діапазоні.

На рисунку 3.16 показано ефективність випромінювання антени, де видно, що в робочому діапазоні ефективність випромінювання перевищує 65%. Тому запропонована антена МІМО 9×9 підходить для мобільних телефонів, ноутбуків та інших мобільних пристроїв.

Завдяки унікальній структурі запропонована антена може забезпечити високу ізоляцію в набагато меншому просторі. Таким чином, розмір окремого елемента антени набагато менший інших. Крім того, запропонована антена також демонструє перевагу в широкій смузі пропускання та великомасштабних решітках. Однак через обмеження загального розміру пікове підсилення нижче, ніж в інших дослідженнях.

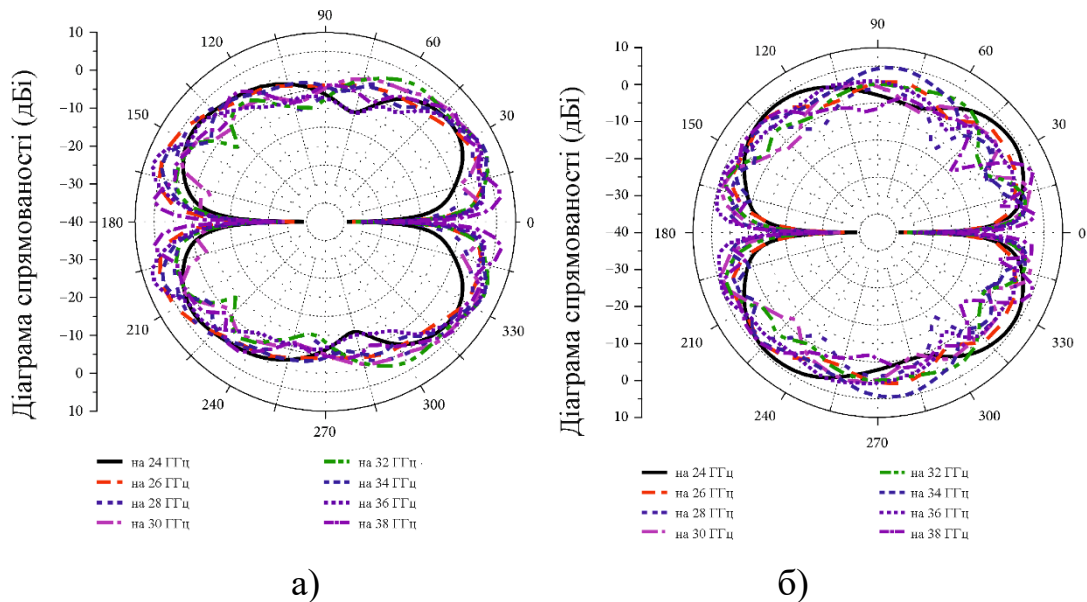


Рисунок 3.15 – Виміряні діаграми спрямованості запропонованої антени на а) хоз-площині та б) уоз-площині

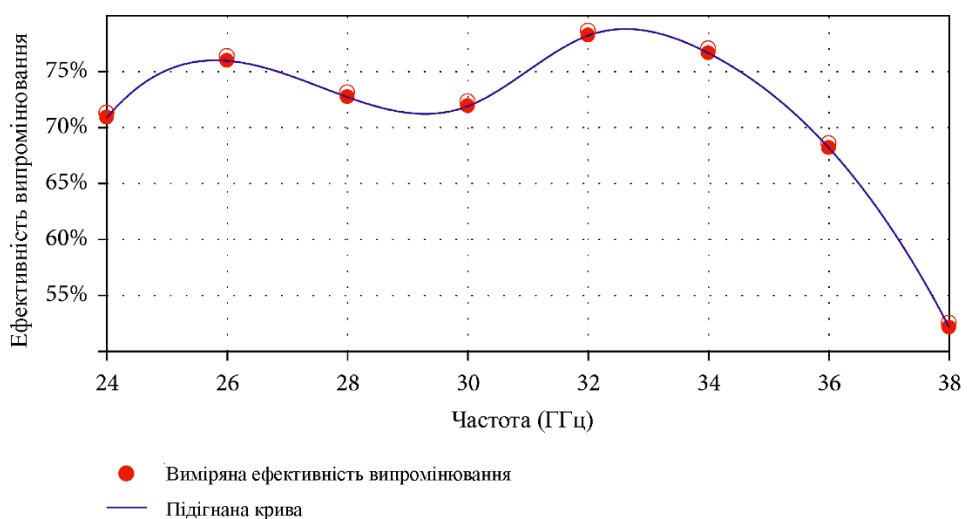


Рисунок 3.16 – Виміряна ефективність випромінювання та підігнана крива антени

Також, важливим параметром антени МІМО є коефіцієнт кореляції огиначаючої, який обчислюється для кількісної оцінки ізоляції між елементами антени МІМО:

$$p_e = \frac{\iint_{4\pi} [\bar{E}_1(\theta, \phi) \cdot \bar{E}_2(\theta, \phi)]}{\iint_{4\pi} |\bar{E}_1(\theta, \phi)|^2 d\Omega \iint_{4\pi} |\bar{E}_2(\theta, \phi)|^2 d\Omega}, \quad (3.2)$$

де $E_i(\theta, \phi)$ відноситься до електричного поля, випромінюваного елементом антени i з іншим елементом антени, закінчується навантаженням 50Ω . Результати розрахунків наведено на рисунку 3.6, де видно, що менше $0,005$ у робочому діапазоні, що вказує на високу ізоляцію між елементами антени.

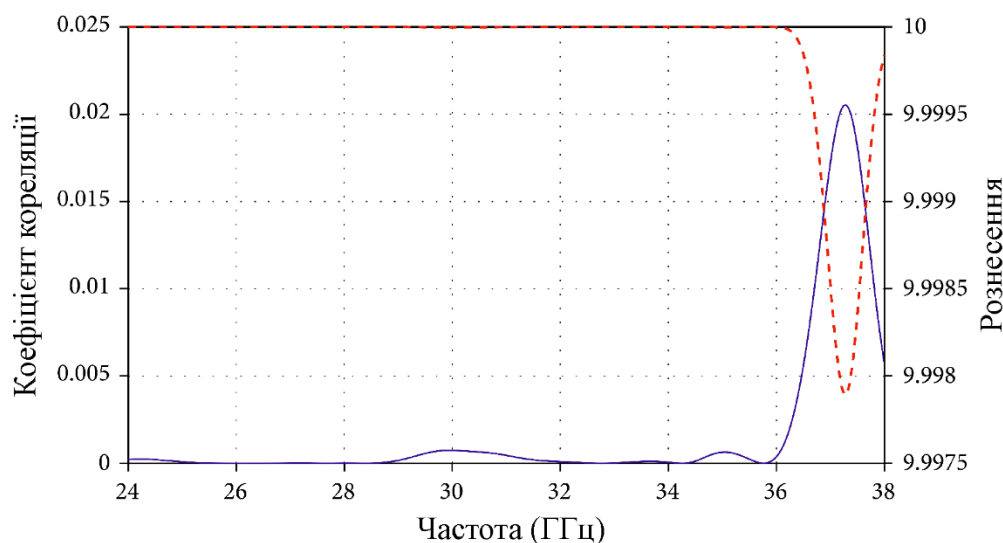


Рисунок 3.18 – Коефіцієнт кореляції та підсилення рознесеності запропонованої ультраширокодіапазонної антени МІМО

Крім того, коефіцієнт рознесення запропонованої антени МІМО розраховано та представлено на рисунку 3.18. Коефіцієнт рознесення можна розрахувати за допомогою наступного виразу:

$$DG = 10\sqrt{1 - |\rho_e|^2} \quad (3.3)$$

На рисунку 3.18 видно, що приріст рознесеності близький до ідеального значення (10) у всьому робочому діапазоні, що також доводить перевагу даної конструкції.

Ще один важливий параметр для оцінки продуктивності антени МІМО є ефективність мультиплексування розраховується за наступною формулою:

$$\eta = \sqrt{(1 - |\gamma|^2)} \eta_1 \eta_2 \quad (3.4)$$

де η_1 і η_2 відносяться до вимірної ефективності випромінювання двох елементів антени відповідно. γ відноситься до кореляції між елементами антени. Розрахована ефективність мультиплексування показана на рисунку 3.19, де видно, що ефективність мультиплексування вище -4 dB у робочому діапазоні.

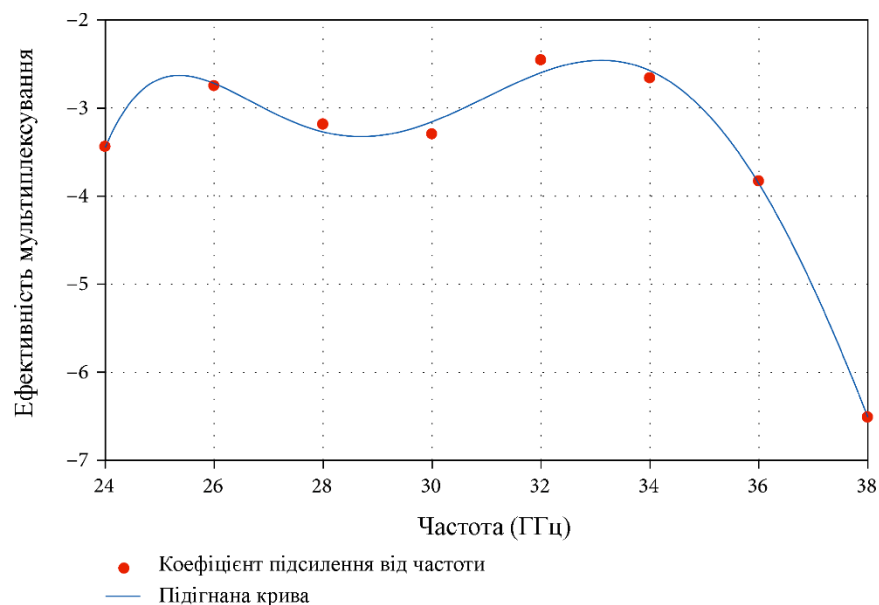


Рисунок 3.19 – Ефективність мультиплексування запропонованої надширокодіапазонної антени МІМО

3.4 Висновки до третього розділу

У даному розділі розглянуто конструкцію та методи дослідження антен МІМО. Було досліджено потенціал застосування в різних випадках і з різним розподілом. Геометрія та змодельованих активних S-параметрів демонструють стабільну роботу, яка вказує на те, що взаємний зв'язок підтримується на досить низькому рівні при зміні положення елемента антени. Цей факт означає, що геометрію запропонованої антени МІМО можна вільно налаштовувати за потреби.

Також було досліджено взаємозв'язок між елементами антени та змодельовано розподіл струму на антені МІМО. В результаті напрямки струму зв'язку на сусідніх гілках різні, що і є перевагою від перехресної структури запропонованої антени. Таким чином, прямий і зворотний струми зв'язку можуть впливати один на одного, і потужність, що передається на порт, значною мірою усувається. Це призводить до низького взаємозв'язку, і енергія, пов'язана з іншими елементами, значно зменшується.

Змодельовані тривимірні (3-D) діаграми спрямованості показали, що випромінювання запропонованої антени набагато сильніше в напрямку z завдяки її унікальній структурі. Ця характеристика забезпечує високу ізоляцію в замкнутому просторі без введення зовнішньої роз'єднувальної структури. Змодельоване підсилення одного антенного елемента антени МІМО досягає 7,5 dBi на 24 ГГц.

Представлено експериментальне дослідження широкопasmової МІМО-антени з високою ізоляцією. Результати експериментів показують, що запропонована антена має певні переваги, а саме: стабільна діаграма спрямованості, широка робоча смуга пропускання та висока ізоляція.

					КвРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі запропоновано та досліджено широкосмугову МІМО-антену з високою ізоляцією. Завдяки своїй унікальній структурі запропонована антена може досягти високої ізоляції (нижче -20 дБ) у замкнутому просторі (0,4 мм) без будь-якої додаткової структури розв'язки. Крім того, змодельовані результати показують, що запропонована структура антени може бути складена в іншу структуру антени МІМО, якщо це необхідно.

Результати експериментів показують, що запропонована антена має очевидні переваги, такі як стабільна діаграма спрямованості, широка робоча смуга пропускання та висока ізоляція. Запропонована антена має потенційні можливості застосування в зв'язку наступного покоління 5G.

					КВРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. W. Roh, J. Y. Seol, J. Park et al., “Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 106–113, 2014.
2. J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi et al., “What will 5G be?” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, 2014.
3. P. Wang, Y. Li, L. Song, and B. Vucetic, “Multi-gigabit millimeter wave wireless communications for 5G: from fixed access to cellular networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 1, pp. 168–178, 2015.
4. T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney, A. F. Molisch, E. Mellios, and J. Zhang, “Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks-with a focus on Propagation Models,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. No. 12, pp. 6213–6230, 2017.
5. J. R. Costa, E. B. Lima, C. R. Medeiros, and C. A. Fernandes, “Evaluation of a new wideband slot array for MIMO performance enhancement in indoor WLANs,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 4, pp. 1200–1206, 2011.
6. A. Mchbal, N. Amar Touhami, H. Elftouh, and A. Dkiouak, “Mutual coupling reduction using a protruded ground branch structure in a compact UWB owl-shaped MIMO antenna,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2018, Article ID 4598527, 10 pages, 2018.
7. Z. Y. Li, Z. W. Du, M. Takahashi, K. Saito, and K. Ito, “Reducing mutual coupling of MIMO antennas with parasitic elements for mobile terminals,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 2, pp. 473–481, 2012.
8. S. Assimonis, T. Yioultsis, and C. Antonopoulus, “Design and optimization of uniplanar EBG structures for low profile antenna applications and mutual coupling reduction,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 10, pp. 4944–4949, 2012.

					КВРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

9. Y. Lee, D. Ga, and J. Choi, "Design of a MIMO antenna with improved isolation using MNG metamaterial," International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2012, Article ID 864306, 7 pages, 2012.

10. N. K. Kiem, H. N. B. Phuong, Q. N. Hieu, and D. N. Chien, "A novel metamaterial MIMO antenna with high isolation for WLAN applications," International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2015, Article ID 851904, 9 pages, 2015.

11. J. Liu, K. P. Esselle, S. G. Hay, Z. Sun, and S. Zhong, "A compact super-wideband antenna pair with polarization diversity," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 12, pp. 1472–1475, 2013.

12. M. S. Sharawi, S. K. Podilchak, M. T. Hussain, and Y. M. M. Antar, "Dielectric resonator based MIMO antenna system enabling millimetre-wave mobile devices," IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 11, no. 2, pp. 287–293, 2017.

13. Y. W. Hsu, T. C. Huang, H. S. Lin, and Y. C. Lin, "Dual-polarized quasi Yagi-Uda antennas with endfire radiation for millimeter-wave MIMO terminals," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 12, pp. 6282–6289, 2017.

14. S. Gupta, Z. Briqech, A. R. Sebak, and T. A. Denidni, "Mutual-coupling reduction using metasurface corrugations for 28 GHz MIMO applications," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 2763–2766, 2017.

15. Z. Wani, M. P. Abegaonkar, and S. K. Koul, "A 28-GHz antenna for 5G MIMO applications," Progress In Electromagnetics Research Letters, vol. 78, pp. 73–79, 2018.

16. Комп'ютерні мережі з бездротовим доступом [Текст] : навчальний посібник / В. Ф. Олійник [та ін.] ; Державний ун-т інформаційно-комунікаційних технологій. - К. : Ніка-Центр, 2007. - 296 с.: рис. - Бібліогр.: с. 285-291.

17. Методи і моделі оцінки ефективності застосування бездротових сегментів в інформаційних системах: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Мохаммед К. Мохаммед ; Харк. нац. ун-т радіоелектрон. - Х., 2011. - 17 с.

					КВРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

18. Метод стійких до дешифрування перетворень для підвищення захисту оперативної відеоінформації в бездротових каналах зв'язку [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.21 / Ларін Володимир Валерійович ; Нац. авіац. ун-т. - К., 2011. - 20 с.

19. Кременецька Я. А. Методи підвищення ефективності телекомунікаційних систем в міліметровому діапазоні хвиль на основі гібридних технологій: автореф. дис. ... д. т. н. : 05.12.02 - Телекомунікаційні системи та мережі. – 2021/

20. Зінченко А. О. Рекомендації щодо побудови мережі широкосмугового бездротового доступу тактичної ланки управління на основі технології МІМО [Електронний ресурс] / А. О. Зінченко // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. - 2012. - № 1. - С. 33-36.

21. Зінченко А. О. Визначення відстаней в МІМО-системах зв'язку та радіолокації на основі фазових вимірів / А. О. Зінченко, В. І. Слюсар // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. - 2012. - № 2. - С. 26-30.

22. Чумак В. К. Можливість використання технології МІМО для підвищення ефективності передачі даних каналами короткохвильового радіозв'язку [Електронний ресурс] / В. К. Чумак, Д. М. Руденко, О. В. Залужний // Збірник наукових праць [Військового інституту телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"]. - 2013. - Вип. 2. - С. 96-102.

23. Зінченко А. О. Модель функціонування багатопозиційної інтегрованої системи зв'язку і радіолокації у режимі МІМО радіолокації [Електронний ресурс] / А. О. Зінченко, В. І. Слюсар // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. - 2014. - № 2. - С. 49-55.

24. Восколович О. І. Метод ітеративної оцінки стану каналів зв'язку системи МІМО [Електронний ресурс] / О. І. Восколович, О. В. Кувшинов // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки. - 2011. - Вип. 26. - С. 4-10.

					КВРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

25. Soltani, M.; Pourahmadi, V.; Mirzaei, A.; Sheikhzadeh, H. Deep learning-based channel estimation. *IEEE Commun. Lett.* 2019, 23, 652–655.
26. Dorner, S.; Cammerer, S.; Hoydis, J.; ten Brink, S. Deep learning based communication over the air. *IEEE J. Sel. Top. Signal Process* 2018, 12, 132–143.
27. Qiang, H.; Feifei, G.; Hao, Z.; Shi, J.; Ye, L. Deep Learning for MIMO Channel Estimation: Interpretation, Performance, and Comparison. *arXiv* 2019, arXiv:1911.01918.
28. Lin, T.; Horne, B.G.; Tino, P.; Giles, C.L. Learning long-term dependencies in NARX recurrent neural networks. *IEEE Trans. Neural Netw.* 1997, 7, 1329–1338.
29. Hochreiter, S.; Schmidhuber, J. Long short-term memory. *Neural Comput.* 1997, 9, 1735–1780.
30. Yuan, J.; Ngo, H.Q.; Matthaiou, M. Machine Learning-Based Channel Prediction in Massive MIMO with Channel Aging. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2020, 19, 2960–2973.
31. Shi, J.; Wang, W.; Wang, J.; Gao, X. Machine Learning Assisted User-scheduling Method for Massive MIMO System. In *Proceedings of the 2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Hangzhou, China, 18–20 October 2018; pp. 1–6.
32. Alrabeiah, M.; Alkhateeb, A. Deep Learning for TDD and FDD Massive MIMO: Mapping Channels in Space and Frequency. In *Proceedings of the 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, 3–6 November 2019; pp. 1465–1470.
33. Ma, W.; Qi, C.; Li, G.Y. Machine Learning for Beam Alignment in Millimeter Wave Massive MIMO. *IEEE Wirel. Commun. Lett.* 2020.
34. Kim, S.; Chae, J.; Hong, S. Machine Learning Detectors for MU-MIMO Systems with One-bit ADCs. *IEEE Access* 2020.
35. Kim, S.; Hong, S.-N. A supervised-learning detector for multihop distributed reception systems. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2019, 68, 1958–1962.

36. Ma, X.; Gao, Z. Data-Driven Deep Learning to Design Pilot and Channel Estimator for Massive MIMO. IEEE Trans. Veh. Technol. 2020.

37. Ye, H.; Gao, F.; Qian, J.; Wang, H.; Li, G.Y. Deep Learning based Denoise Network for CSI Feedback in FDD Massive MIMO Systems. IEEE Commun. Lett. 2020.

38. Zhang, Y.; Alrabeiah, M.; Alkhateeb, A. Deep Learning for Massive MIMO with 1-Bit ADCs: When More Antennas Need Fewer Pilots. IEEE Wirel. Commun. Lett. 2020.

39. Han, Y.; Rao, B.D.; Lee, J. Massive Uncoordinated Access with Massive MIMO: A Dictionary Learning Approach. IEEE Trans. Wirel. Commun. 2020, 19, 1320–1332.

40. Waseem, A.; Naveed, A.; Ali, S.; Arshad, M.; Anis, H.; Qureshi, I.M. Compressive Sensing Based Channel Estimation for Massive MIMO Communication Systems. Hindawi Wirel. Commun. Mob. Comput. 2019, 764.

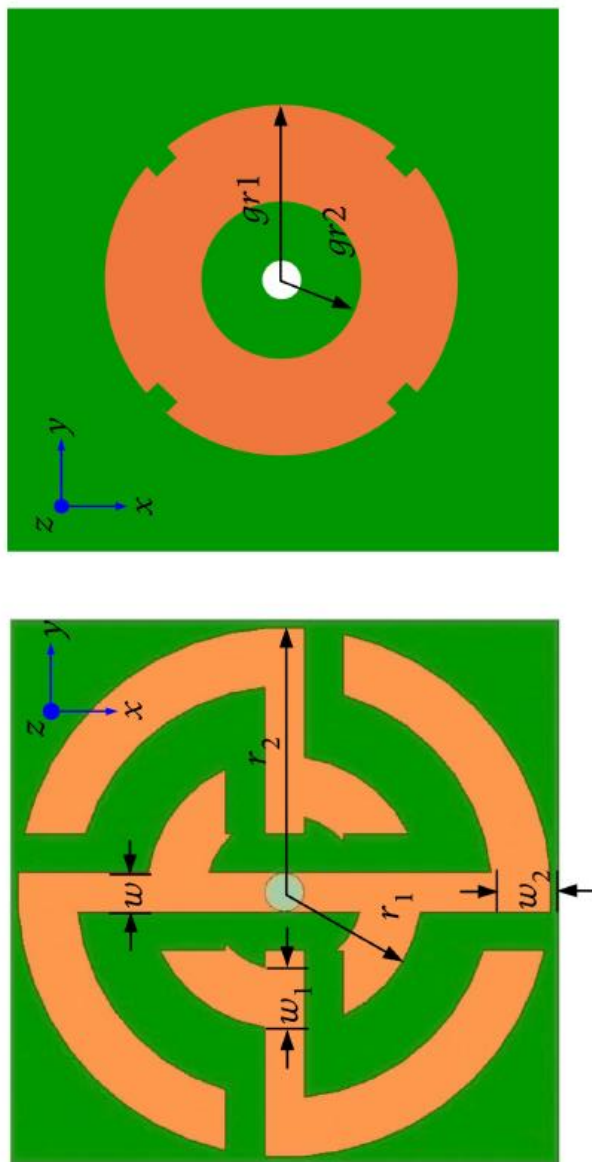
					КВРТР.2019008.01.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

ДОДАТКИ

Додаток А

Конструкція ширококугової антени

КвРГР.2019008.01.07 E8



Таблиця А.1 – Розміри запропонованої антени (мм)

w	w_1	w_2	r_1	r_2	gr_1	gr_2
1	1.5	1.5	3.5	6.8	4.5	2

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.	Кукуєв Н.Р.			
Перевір.	Сельський А.А.			
Н. контр.	Корчак Л.О.			
Заст.	Мартинюк В.В.			

КвРГР.2019008.01.07 E8

Конструкція
ширококугової антени

ХНУ, гр. ТР1-19-1

Додаток Б

Результати досліджень запропонованої антени МІМО

КвРТР.2019008.01.07 E8

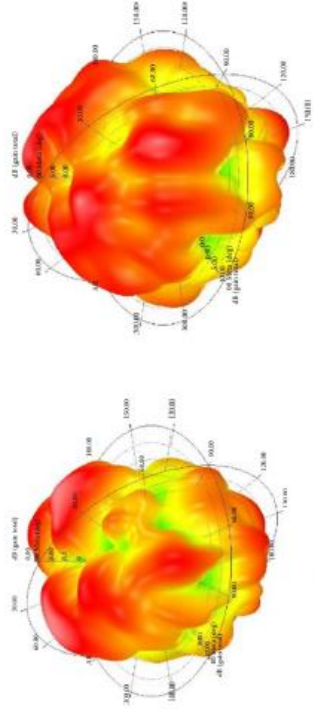
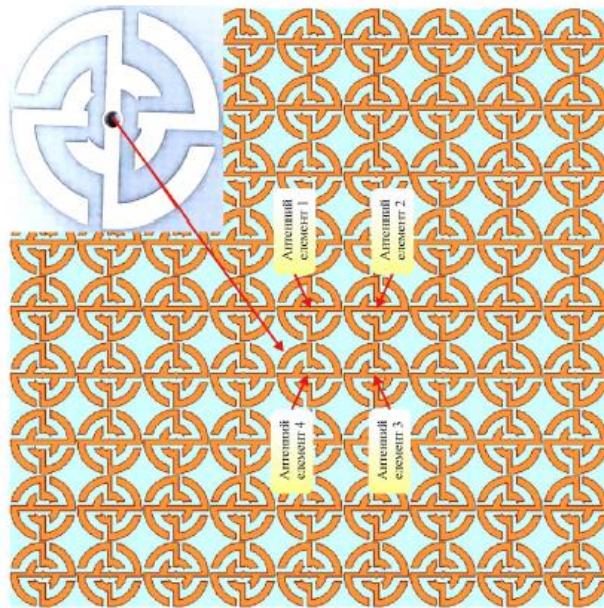


Рисунок Б.2 – Змодельоване підсилення одного елемента запропонованої антени МІМО

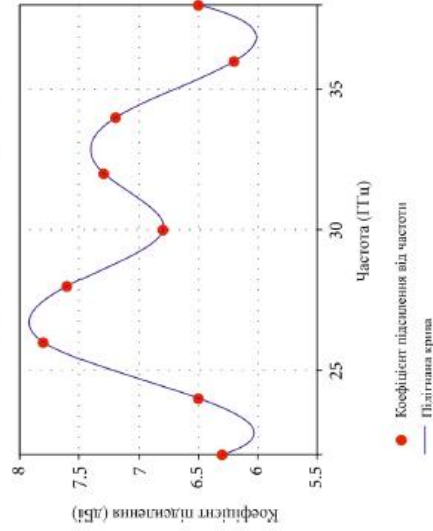


Рисунок Б.3 – Змодельоване підсилення одного елемента запропонованої антени МІМО

КвРТР.2019008.01.07 E8		Лист	Лист	Листів
Зм.	Лит	№ докум	Підпис	Дата
Розроб.	Корчак Н.Р.			
Перевір.	Сельська А.А.			
Н. консульт.	Корчак Л.О.			
Затв.	Мартишок В.В.			
Результати дослідження запропонованої антени МІМО				ХНУ, гр. ТР1-19-1

Ім'я користувача:
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:
1015679905

Дата перевірки:
22.06.2023 22:57:32 EEST

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
22.06.2023 23:05:59 EEST

ID користувача:
100005862

Назва документа: Кукуєв

Кількість сторінок: 64 Кількість слів: 11726 Кількість символів: 86534 Розмір файлу: 6.60 MB ID файлу: 1015324226

1423 слова позначені як "вилучені" та не враховуються у підрахунку слів

1.24% Схожість

Найбільша схожість: 0.33% з Інтернет-джерелом (<http://journals.dut.edu.ua/index.php/sciencenotes/article/view/2368>)

1.24% Джерела з Інтернету

98

Сторінка 66

0.16% Джерела з Бібліотеки

2

Сторінка 66

0% Цитат

Не знайдено жодних цитат

Не знайдено жодних посилань

0.01% Вилучень

Деякі джерела вилучено автоматично (фільтри вилучення: кількість знайдених слів є меншою за 8 слів та 0%)

Немає вилучених Інтернет-джерел

0.01% Вилученого тексту з Бібліотеки

12

Сторінка 66

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи

3

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 12%

ID: 117821 Назва: БКР Широкопугова МІМО-антена міліметрового діапазону для бездротового зв'язку Додано в БД: 2023-06-22 Автора: Назар КУКУЄВ Керівники: Андрій СЕЛЬСЬКИЙ Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	79607	564	1162 (1%)	13 (2%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

МІНІСТЕРСТВО ОВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Кукуєв Назар Романович

Тема роботи: Широкосмугова МІМО-антена міліметрового діапазону для бездротового зв'язку

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 64

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ізоляції між антенними елементами широкосмугової МІМО-антени міліметрового діапазону для бездротового зв'язку. У кваліфікаційній роботі представлено широкосмугову антену для зв'язку 5G. Діапазон роботи запропонованої антени становить від 24 ГГц до 39 ГГц. Використовуючи симетричну структуру, запропонована антена реалізує стабільну діаграму спрямованості в такій широкій смузі. На її основі запропоновані та досліджені антени МІМО. Завдяки своїй унікальній структурі висока ізоляція між антенними елементами зберігається при застосуванні великомасштабної решітки.

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

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: У відповідності до технічного завдання у даній кваліфікаційній роботі подано широкосмугову антену міліметрового діапазону для застосувань 5-го покоління. Діапазон робочих частот становить від 24 ГГц до 39 ГГц, що покриває більшу частину діапазону. Крім того, розроблено антену 9x9 із декількома входами та декількома виходами (МІМО). Висока ізоляція досягається без введення зовнішніх роз'єднувальних структур. Коефіцієнт передачі становить менше -20 дБ у межах лише 0,4 мм простору між елементами антени. Діаграма спрямованості також показує стабільність в широкому робочому діапазоні. Результати моделювання та вимірювання показують, що запропонована антена МІМО підходить для майбутнього бездротового зв'язку.

4. Позитивні сторони роботи: Результати виконаної роботи показали, що необхідно проводити подальші дослідження в даному напрямку та рухатися шляхом удосконалення широкосмугової МІМО-антени. Напрямок досить перспективний і попит на дані компоненти з кожним днем тільки зростатиме.

5. Негативні сторони роботи: У роботі бажано було б більш детально розглянути методи ізоляції. 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

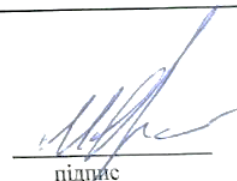
7. Відгук про роботу в цілому: В цілому кваліфікаційно робота виконано на високому технічному рівні, вона має безперечну актуальність в області сучасних технологій телекомунікацій

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка кваліфікаційної роботи: Кваліфікаційна робота відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки добре (3.25/D), а її автору Кукучеву Н.Р., присвоєння кваліфікації бакалавра зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка»

10. Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, місце роботи) Мішан Віктор Володимирович – к.т.н., доцент кафедри ТМІТ

«15» червня 2023р.



підпис

Завідувачу кафедри АКІТтаР
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Кукуєва Н.Р.

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи ТР1-19-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї 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.

29 травня 2023 р.

дата



підпис

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

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

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

Назва Широкопasmова МІМО-антена міліметрового діапазону для бездротового зв'язку

Автор Кукуся Назар Романович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: к.ф.м.н., доцент Сельський Андрій Анатолійович

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.	<u>Відповідає</u>
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укривтя запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

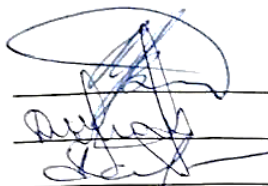
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 1,24% і адресується до 40 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

В.М.М.М.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи



Валерій МАРТИНЮК

Денис МАКАРИШКІН

Андрій СЕЛЬСЬКИЙ