

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

Бакалавр

Освітній рівень

Двodiaпазонний випромінювач WIMAX систем

Назва теми

КПТР.220890.01.03 ПЗ

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Шифр і назва

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Шифр і назва

Освітня програма «Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі»

Назва

Виконав:

здобувач 3 курсу, група TP2c-22-1



підпис

Денис НАЗАРЧУК

Ініціали, прізвище

Керівник: д-р техн. наук, професор



підпис

Юлій БОЙКО

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

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



підпис

Сергій ПІДЧЕНКО

Ініціали, прізвище

«9» 06 2025р.

Хмельницький, 2025

Хмельницький національний університет

Факультет	інформаційних технологій
Кафедра	телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій
Освітній рівень:	бакалавр
Галузь знань:	17 Електроніка та телекомунікації
Спеціальність:	172 Телекомунікації та радіотехніка
Освітня програма:	Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру ТМІТ

Сергій ПІДЧЕНКО

«10» 02 2025 р.





ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

НАЗАРЧУК Денис Федорович

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

- Тема роботи: Дводіапазонний випромінювач WiMAX систем
- Керівник роботи: БОЙКО Юлій Миколайович, д-р техн. наук, професор
- Затверджено наказом по університету від «07» лютого 2025р. № 20
- Строк подання здобувачем роботи на кафедру 02 червня 2025 року
- Вихідні дані до роботи: Частотні діапазони, характерні для WiMAX систем
- Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Аналіз сучасних широкосмугових бездротових технологій wimax. Огляд та аналіз конфігурацій антен MIMO. Проектування та моделювання антенної решітки MIMO у системах WiMAX. Характеристики дводіапазонної монопольної антенної решітки MIMO.
- Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):
 - Конструктивне креслення одноелементної антени та антенної решітки 2x1.
 - Характеристики узгодження та підсилення антенної решітки залежно від геометричних параметрів.
 - Конструкція та параметри взаємодії елементів двоелементної MIMO-антени.
 - Комплексна характеристика MIMO-антени в діапазонах WiMAX.

6 Консультанти розділів кваліфікаційного проекту

Розділ	Прізвища, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	СТЕЦЬЮК Вітор к.т.н., доцент		
Антиплагіат	ПИВОВАР Олег к.т.н., доцент		

7 Дата видачі завдання 07 лютого 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

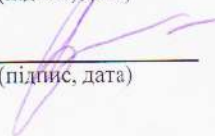
№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на кваліфікаційний проект	07.02.2025р.	виконано
2.	Складання індивідуального плану на кваліфікаційний проект	15.02.2025р.	виконано
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	10.03.2025р.	виконано
4.	Написання другого розділу	26.03.2025р.	виконано
5.	Написання третього розділу	15.04.2025р.	виконано
6.	Написання четвертого розділу	30.04.2025р.	виконано
7.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до кваліфікаційного проекту	10.05.2025р.	виконано
8.	Оформлення кваліфікаційного проекту	15.05.2025р.	виконано
9.	Рецензування кваліфікаційного проекту	20.05.2025р.	виконано
10.	Презентаційні матеріали за результатами виконання кваліфікаційного проекту	28.05.2025р.	виконано

Здобувач


(підпис, дата)

Денис НАЗАРЧУК

Науковий керівник


(підпис, дата)

Юлій БОЙКО

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційного проекту: «Дводіапазонний випромінювач WiMAX систем»

Автор проекту: НАЗАРЧУК Денис Федорович

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

Пояснювальна записка: 70 сторінок, 25 рисунків, 1 таблиця, 40 джерел.

Графічна частина: технічні креслення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МОНОПОЛЬНА АНТЕНА, АНТЕННА РЕШІТКА, ШИРОКА СМУГА ПРОПУСКАННЯ, ДВОДІАПАЗОННА АНТЕНА, WiMAX, MIMO, 5G, ПІКОВЕ ПІДСИЛЕННЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИПРОМІНЮВАННЯ.

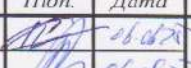
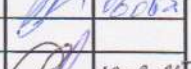

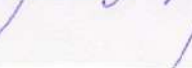
Об'єктом дослідження є дводіапазонна антена, призначена для використання у бездротових телекомунікаційних системах WiMAX.

Мета кваліфікаційного проекту полягає в удосконаленні конструкції дводіапазонного випромінювача для забезпечення ефективної роботи WiMAX систем у різних частотних діапазонах.

Кваліфікаційний проект присвячений комплексному дослідженню електромагнітних характеристик запропонованої антенної решітки, її частотної селективності, а також аналізу впливу геометричних параметрів на роботу дводіапазонного випромінювача. Особлива увага приділяється оптимізації конфігурації антени для забезпечення максимального підсилення, ізоляції між елементами та високої ефективності випромінювання.





02.06.2025 р.



Поз.	Формат	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка		
			<u>Документація загальна</u>				
1	A4	КПТР.220890.01.03 ПЗ	Пояснювальна записка	1	69 арк.		
			<u>Документація графічна</u>				
2	A3	Плакат	Дводіапазонний випромінювач WiMAX систем				
			Конструктивне креслення одноеlementної антени	1			
3	A3	КПТР.220890.01.03 ЕЗ	Дводіапазонний випромінювач WiMAX систем				
			Характеристики узгодження та підсилення антенної решітки залежно від геометричних параметрів	1			
4	A3	КПТР.220890.01.03 ЕЗ	Дводіапазонний випромінювач WiMAX систем				
			Конструкція та параметри взаємодії елементів двоелементної MIMO-антени	1			
5	A3	КПТР.220890.01.03 ЕЗ	Дводіапазонний випромінювач WiMAX систем				
			Комплексна характеристика MIMO-антени в діапазонах WiMAX	1			
			КПТР.220890.01.03 ВП				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
Розроб.		Назарчук Д.Ф		26.06.25	Дводіапазонний випромінювач WiMAX систем		
Перевір.		Бойко Ю. М.		05.06.25			
Н. контр.		Стецюк В.І.		12.06.25	Відомість проекту		
Затв.		Підченко С.К.		25.06.25			
					Літ.	Аркуш	Аркушів
						1	1
					ХНУ, гр. TP2c-22-1		

ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ШИРОКОСМУГОВИХ БЕЗДРОТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ WiMAX	7
1.1 Історія бездротового зв'язку	10
1.2 Фіксовані та локальні широкосмугові бездротові мережі	11
1.3 Аналіз технологій WiMAX	16
1.4 Постановка проблеми	18
1.5 Майбутні перспективи та інтеграція	19
1.6 Висновок до першого розділу	20
2 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ КОНФІГУРАЦІЙ АНТЕН MIMO	21
2.1 Чотирипортова двоелементна F-антена MIMO	23
2.2 Широкосмугова антенна система MIMO для мобільних телефонів	24
2.3 Компактний високоізолюваний антенний модуль MIMO з ємнісним роз'єднувачем мікросхеми для мобільних терміналів 5G	26
2.4 Широкосмугова антена MIMO для систем 5G	27
2.5 Фрактальна дво- та восьмиелементна антена MIMO для систем на частотах нижче 6 ГГц і WLAN	29
2.6 Чотирьохпортова антена MIMO з високими характеристиками ізоляції для зв'язку 5G	31
2.7 Висновок до другого розділу	33
3 ПРОЕКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ MIMO У СИСТЕМАХ WiMAX	35

					КПТР.220890.01.03					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Двodiaazonний випромінювач WiMAX систем Пояснювальна записка					
Розроб.		Назарчук Н.Ф.		18.06				Лім.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Бойко Ю.М.		18.06					2	70
Реценз.								ХНУ, гр. TP2c-22-1		
Н. Контр.		Стецюк В.І.		12.06.25						
Затверд.		Підченко С.К.		18.06						

3.1 Конфігурація однієї антени	35
3.2 Конфігурація антенної решітки	41
3.3 Конфігурація МІМО.....	48
3.4 Висновок до третього розділу.....	51
4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВОДІАПАЗОННОЇ МОНОПОЛЬНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ МІМО.....	52
4.1 S-параметри.....	52
4.2 Коефіцієнт кореляції огинаючої.....	55
4.3 Підсилення рознесеності	57
4.4 Втрати пропускної здатності каналу	58
4.5 Загальний коефіцієнт активного відбиття	60
4.6 Середнє ефективне підсилення.....	61
4.7 Висновок до четвертого розділу	64
ВИСНОВКИ.....	65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	67

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

CCL	Пропускна здатність каналу
CDMA	Code Division Multiple Access
DG	Підсилення рознесеності
ECC	Коефіцієнт кореляції огинаючої
MEG	Середнє ефективне підсилення
MIMO	Multiple Input Multiple Output
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
TARC	Загальний коефіцієнт активного відбиття
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WWANs	wireless wide area networks

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						4
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

У сучасному світі бездротові комунікаційні системи відіграють надзвичайно важливу роль, забезпечуючи швидкий доступ до інформації, підвищуючи ефективність роботи різних галузей та сприяючи розвитку цифрової економіки. Зростаючий попит на високошвидкісний інтернет і надійний зв'язок стимулює розвиток нових технологій передачі даних. Однією з ключових технологій, що відповідають цим вимогам, є WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) – стандарт бездротового доступу до Інтернету, який забезпечує широкосмугове покриття на великі відстані.

Для підвищення продуктивності та якості передачі даних у сучасних бездротових мережах широко використовується технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output), яка базується на застосуванні множини антен як на передавальній, так і на приймальній стороні. MIMO дозволяє значно збільшити пропускну здатність каналів, покращити стійкість сигналу до завад і зменшити кількість помилок при передачі, що робить її невід'ємною частиною сучасних стандартів бездротового зв'язку.

Важливим елементом для реалізації потенціалу MIMO систем є розробка високоефективних антенної решіток, здатних забезпечити широкосмугову роботу, високе підсилення та добру ізоляцію між елементами. Особливо актуальним є створення антенної структури, що відповідає б вимогам сучасних стандартів WiMAX, а також перспективних систем LTE та 5G.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка та оптимізація монопольної антенної решітки з унікальним дизайном, яка забезпечить ефективну роботу в системах MIMO для WiMAX, зокрема шляхом покращення параметрів підсилення, ізоляції та ефективності випромінювання. Особливу

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

увагу приділено впровадженню дефектної заземлюючої структури (DGS) для зниження взаємних завад між антенними елементами.

У роботі також проведено аналіз існуючих технологій антенної розробки, моделювання параметрів антени в діапазоні частот від 2 до 7,62 ГГц та експериментальне дослідження двоелементної конфігурації МІМО. Отримані результати сприяють підвищенню ефективності бездротових комунікаційних систем та відкривають можливості для подальшого впровадження розроблених антен у сучасні стандарти зв'язку.

Таким чином, актуальність роботи зумовлена необхідністю вдосконалення антенної інфраструктури для підтримки зростаючих потреб у високошвидкісному та якісному бездротовому зв'язку, що є ключовим фактором розвитку сучасних інформаційних технологій.

					КІПТР.220890.01.03	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ШИРОКОСМУГОВИХ БЕЗДРОТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ WiMAX

Бездротовий зв'язок є одним із найважливіших досягнень в історії науки та комунікацій. Ці мережі бездротового зв'язку є основою стільникових мереж, радіо- та телевізійних каналів, передачі та прийому даних через супутники та багатьох інших. Завдяки цим бездротовим комунікаційним мережам зв'язок став надзвичайно швидким, а послуги залишаються доступними для користувача майже куди б він не пішов. Майбутнє бездротових технологій виглядає дуже яскравим. Всесвітня сумісність для мікрохвильового доступу (WiMAX) – це найновіша технологія зв'язку для бездротової передачі, яка стандартизована як IEEE 802.16-2004 і IEEE 802.16-2005 або IEEE 802.16e.

Система WiMAX складається з 2 основних частин:

1) WiMAX: Концепція така ж, як і вишки інших стільникових мереж, але її зона покриття значно більша (близько 8000 квадратних кілометрів).

2) Приймач WiMAX: він має маленьку антену і може бути у формі карти PCMCIA або в невеликій коробці. Зараз ноутбуки також мають вбудований приймач WiMAX.

На рисунку 1.1 показана проста робота мережевої системи WiMAX. Баштові станції WiMAX можна безпосередньо підключати до магістралі Інтернету за допомогою високошвидкісних кабелів, таких як оптичні волокна. І вежа також може бути з'єднана з іншими вежами за допомогою мікрохвильових каналів прямої видимості (LOS), і такий тип з'єднань називається зворотним зв'язком [1].

Технологія стільникового зв'язку була розділена на три покоління:

1. Мобільні системи першого покоління. У першому поколінні бездротового зв'язку аналогові системи були головними досягненнями для передачі аудіоданих за допомогою радіохвиль. Мобільні телефони, що використовувалися на той час, використовували аналогові радіотехнології, і їх

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

трьома основними компонентами були мобільний телефон, стільникові станції та центри комутації мобільного зв'язку (MSC). Ця аналогова система використовувала два радіоканали, один як канал керування, а інший як голосовий канал. Канал управління містить цифрові повідомлення. Ці цифрові повідомлення допомагають телефону отримувати керуючу інформацію про систему та змагаються за доступ до системи за допомогою схеми модуляції частотної маніпуляції (FSK). З іншого боку, голосові канали відповідають за надсилання голосових даних за допомогою частотної модуляції (FM) у формі аналогового сигналу.



Рисунок 1.1 – Проста система мережі WiMAX

2. Мобільні системи другого покоління. Мобільні системи другого покоління (2G) використовували цифрові технології множинного доступу, такі як множинний доступ з тимчасовим поділом (TDMA) і множинний доступ з кодовим поділом (CDMA). Основним досягненням цього покоління є GSM, який використовує TDMA для підтримки кількох користувачів. Інші приклади систем

2G включають бездротові телефони (CT2), системи зв'язку персонального доступу (PACS) і цифрові європейські бездротові телефони (DECT) [3].

У системах 2G інший підхід до проектування використовувався в MSC. Відповідно до цього нового дизайну, було введено контролери базових станцій (BSC) для розподілу навантаження з MSC, а інтерфейс між ними був стандартизований. У цій конструкції також був представлений мобільний механізм перемикавання. Відповідно до цього, мобільний пристрій може перемикатися з однієї базової станції на наступну за допомогою цих передачі обслуговування, і все це відбувається плавним способом, не даючи користувачеві жодної підказки. Протоколи, які використовуються в 2G, використовували цифрове кодування, і ці протоколи були GSM, D-AMPS (TDMA) і CDMA (IS-95). Мережі 2G підтримували такі послуги, як голосовий зв'язок, факс і служба коротких повідомлень (SMS) [3].

Мобільні системи 2.5G. Основною метою цього покоління було забезпечення належного підключення до даних без внесення серйозних змін у існуючі технології 2G. Деякі з клітинних технологій, які здатні досягти цієї мети:

- високошвидкісна передача даних з комутацією каналів (HSCSD): HSCSD розроблено для забезпечення в чотири рази більшої швидкості передачі даних у GSM;

- загальна пакетна радіопередача (GPRS): це радіотехнологія для мереж GSM. Він надає такі послуги, як протоколи комутації пакетів, менший час для налаштування підключень постачальника послуг Інтернету (ISP) і високі швидкості передачі даних. На основі GPRS, вищі швидкості передачі даних і підтримка мультимедійних програм породили нову технологію під назвою Enhanced Data Rate for GSM Evolution (EDGE).

Підвищена швидкість передачі даних для GSM Evolution (EDGE): за допомогою EDGE оператори GSM надають мультимедійні послуги та програми на основі Інтернет-протоколу (IP). Ці послуги надаються з максимальною теоретичною швидкістю від 384 до 554 Кбіт/с із швидкістю передачі даних від

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

48 до 69,2 Кбіт/с на часовий інтервал за сприятливих умов радіозв'язку. EDGE також надає можливість операторам GSM працювати без ліцензії 3G. Впровадження EDGE не потребує особливих зусиль, оскільки потрібні незначні зміни в апаратному та програмному забезпеченні. EDGE використовує ту саму структуру кадру TDMA, логічний канал і смугу пропускання 200 кГц, що й мережі GSM. EDGE здатний забезпечити швидкість передачі даних до 2 Мбіт/с, що дорівнює ATM [4].

3. Мобільні системи третього покоління. Мобільні системи 3-го покоління стикаються з багатьма технічними проблемами, такими як забезпечення безперебійних послуг як для дротових, так і для бездротових мереж. Зараз проводяться дослідження універсальних мобільних телекомунікаційних систем (UMTS), мобільних широкосмугових систем (MBS) і WiMAX. Наразі найвідомішим стандартом мобільної телефонії є глобальна система мобільного зв'язку (GSM), яка є мережею передачі даних із комутацією пакетів із кращою спектральною ефективністю та більшою пропускну здатністю. Мережі 3G забезпечують хороший рівень безпеки порівняно з мережами 2G. Дана мобільна система пропонує наскрізну безпеку під час доступу до фреймворків додатків.

1.1 Історія бездротового зв'язку

Шлях до бездротового зв'язку розпочався з винаходу рівнянь Максвелла в кінці 19 століття. Ці рівняння дали концепцію передачі даних без необхідності будь-якого дроту. Через кілька років Марконі своїми експериментами довів, що дані можуть переміщатися на великі відстані. У 1970-х роках лабораторії Белла придумали використовувати фіксовану смугу частот для стільникових мереж. Після цього з'явилося багато бездротових технологій для стільникового зв'язку, таких як Advanced Mobile Phone System (AMPS), Multiple Access (CDMA), Time Division Multiple Access (TDMA), Frequency Division Multiple Access (FDMA),

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Global System for Mobile (GSM), Покращена швидкість передачі даних для GSM Evolution (EDGE) і тепер WiMAX [6].

Починаючи з 1990-х років індустрія бездротового зв'язку переживає величезне зростання та все ще зростає в геометричних пропорціях. Бачення комунікацій у будь-який час, у будь-якому місці та постійних послуг передачі даних пропагувалося на майбутнє. Інтернет, який тоді тільки розвивався, зараз є головною силою в комунікації з даними, голосом і графікою та розвагах. Точки доступу Wireless Fidelity (Wi-Fi) інтегруються в мобільний WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), який, у свою чергу, буде сумісний із технологією широкосмугової бездротової мережі 4G (четвертого покоління), що розвивається. Мобільні бездротові мережі першого та другого покоління (1G і 2G) поступилися місцем мобільним широкосмуговим бездротовим мережам третього покоління (3G), які базувалися на одній із найуспішніших технологій мобільного бездротового зв'язку останніх десятиліть – Code Division Multiple. Доступ (CDMA), для цифрового мобільного радіозв'язку [7,8]. У цьому документі розглядаються різні стандарти та продуктивність технологій фіксованого широкосмугового зв'язку Wi-Fi та бездротових мереж WiMAX, причому мобільні мережі Wi-Fi інтегруються з технологіями мобільних мереж WiMAX, що розвиваються, які, як очікується, будуть сумісні з всеохоплюючими мережами, що ще розвиваються. мережі 4G. Обговорюється дослідження еволюції технологій мобільних широкосмугових бездротових мереж 1G, 2G і 3G до мереж 4G, що розвиваються, досліджуючи їх походження, теперішні та майбутні перспективи.

1.2 Фіксовані та локальні широкосмугові бездротові мережі

Стаціонарний бездротовий зв'язок – це робота бездротових пристроїв або систем, які використовуються для з'єднання двох фіксованих місць; наприклад, будівлі, з радіо або іншим бездротовим зв'язком. Зазвичай фіксований

					КПТР.220890.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

бездротовий зв'язок є частиною інфраструктури бездротової локальної мережі (LAN). Метою фіксованого бездротового з'єднання є забезпечення передачі даних між об'єктами або будівлями. Стаціонарні бездротові канали передачі даних часто є економічно ефективною альтернативою оренді оптоволокна або прокладці кабелів між будівлями. Передача сигналу «точка-точка» відбувається по повітрю через наземну мікрохвильову платформу, а не через мідне або оптичне волокно; тому для фіксованого бездротового зв'язку не потрібні супутникові канали чи місцеві телефонні послуги. Переваги фіксованого бездротового зв'язку включають можливість з'єднуватися з користувачами у віддалених районах без необхідності прокладання нових кабелів і широку смугу пропускання, якій не перешкоджають можливості оптоволокна чи кабелю. Стаціонарні бездротові послуги зазвичай використовують спрямовані радіоантени на кожному кінці сигналу, наприклад; на кожній будівлі. Доступно декілька типів радіоантен, які адаптуються до різних погодних умов, відстані сигналу та смуги пропускання. Фіксовані широкосмугові бездротові технології можна визначити як високошвидкісні бездротові мережі, які підключаються до стаціонарних місць і призначені для обслуговування кочових користувачів [9, 10]. Технології широкосмугової фіксованої бездротової мережі, що представляють інтерес, це Wi-Fi, який є стандартом IEEE 802.11, і Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX), який є стандартом IEEE 802.16.

Бездротова мережа точності (Wi-Fi – Wireless Fidelity) – це технологія фіксованої високошвидкісної широкосмугової бездротової мережі, яка базується на стандарті IEEE 802.11 і еволюціонувала від IEEE 802.11b до вдосконалених стандартів IEEE 802.11a та g. Розробка Wi-Fi почалася в 1997 році, а її впровадження почалося в 2001. Він використовує неліцензовані частоти 2,5 і 5 ГГц для програм бездротової локальної мережі (WLAN) і доступу до Інтернету зі швидкістю передачі даних до 54 мегабіт на секунду (Мбіт/с). Технологія Wi-Fi обмежена в радіусі 100 метрів, що обмежує рівень мобільності, але останні розробки дозволили збільшити діапазон до понад одного кілометра на

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відкритому повітрі за допомогою спрямованих антен. Цікавим є застосування Wi-Fi з OFDM (мультиплексування з ортогональним частотним поділом), який пропонує переваги множинного доступу та обробки сигналів, які не були доступні в попередніх методах модуляції Wi-Fi, і дозволяє бездротовим мережам використовувати високу спектральну ефективність у відносно малих смугах пропускання. Це покращило мобільний Wi-Fi із розгортанням мобільних мереж стандарту IEEE 802.11n [11, 12]. Головною перевагою Wi-Fi є його простота та легкість розгортання. Це так само економічно ефективно, як і високошвидкісна бездротова технологія з широким розгортанням у гарячих точках, які дуже популярні для доступу до даних в офісах, будинках, кафе, готелях та аеропортах по всьому світу. Гарячі точки забезпечують миттєвий доступ до Інтернету та спільне використання мережевих ресурсів для користувачів у зоні покриття. Точка доступу складається з базової станції, до якої підключаються бездротові хости для доступу до мережі та Інтернет-ресурсів. Базова станція відповідає за надсилання та отримання даних до та від бездротового хосту, який пов'язаний з нею. Для ширшого охоплення та застосування мобільні точки доступу Wi-Fi наразі інтегровані в мобільний WiMAX для мереж Wi-Fi/WiMAX, де неліцензовані мережі Wi-Fi спільно використовують ресурси з ліцензованим спектром WiMAX [13, 14].

Технологія бездротового зв'язку для забезпечення високошвидкісного широкосмугового підключення WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) – це технологія фіксованої широкосмугової бездротової мережі, яка забезпечує широкосмугове підключення у більшій географічній зоні, ніж Wi-Fi. На даний момент він забезпечує покриття в радіусі від 10 до 50 км для фіксованого та мобільного широкосмугового бездротового підключення залежно від стандарту IEEE 802.16, що використовується, без обов'язкової лінії зв'язку з базовою станцією. Розробка WiMAX почалася в 1999 році, а її розгортання/впровадження почалося в 2004 році. Стандарти WiMAX IEEE 802.16a і 802.16d були в основному адаптовані до бездротових глобальних мереж

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(WWAN). Наразі існують специфікації IEEE 802.16e та 802.16m для використання в основному для мобільних бездротових міських мереж (WMAN та WWAN). Ці архітектури WiMAX забезпечують ідеальні широкосмугові мережі для послуг Інтернету, базових станцій стільникового зв'язку, точок доступу та корпоративних мереж [15, 16]. WiMAX має високі частоти смуги пропускання 2 ГГц і 11 ГГц, що ідеально підходить для передачі даних зі швидкістю від 75 до 100 Мбіт/с і загальною дальністю покриття до 50 км. Ще одним плюсом для WiMAX є використання мультиплексного доступу з кодовим поділом (CDMA) і мультиплексування з ортогональним частотним поділом (OFDM) для модуляції. Мобільний WiMAX IEEE 802.16m має швидкість передачі даних близько 100 Мбіт/с для високомобільного доступу на швидкості до 250 км/год. Переваги WiMAX полягають у підтримці вищої пропускну здатності, швидкості передачі даних і ширшого робочого діапазону. Це робить технологію дуже корисною для розгортання в районах із поганим рельєфом або в середовищах з обмеженою дротовою інфраструктурою. WiMAX також підтримує та легко взаємодіє з іншими дротовими та бездротовими технологіями, такими як Ethernet, PDA (Personal Digital Assistant), VLAN (віртуальні локальні мережі) та Wi-Fi. Він забезпечує мережеве підключення, яке досліджує багатопроменеві сигнали без суворої вимоги прямої видимості. Нарешті, WiMAX забезпечує кращу якість обслуговування (QoS), використовуючи переваги технології розумної антени, яка ефективніше використовує спектр. Головним недоліком розгортання WiMAX є фірмове обладнання. Обладнання WiMAX повинно мати можливість ефективно використовувати потужність, щоб забезпечити оптимальну функціональність. Для WiMAX використання вихідної потужності базується на процесі визначення діапазону, який визначає правильний часовий зсув і налаштування потужності. Передачі для кожної абонентської станції повинні бути такими, щоб вони надходили на базову станцію в належний час і з однаковим рівнем потужності [13, 17]. На рисунку 1.2 представлено конфігурацію мережі WiMAX.

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.2 – Конфігурація мережі WiMAX

Ширококутові бездротові мережі доступу на основі WiMAX можуть забезпечити підтримку зворотного зв'язку для мобільних точок доступу Wi-Fi. Інтегрована мережа WiMAX/Wi-Fi для такої програми – це те, де ліцензований спектр WiMAX використовується спільно з точками доступу/маршрутизаторами Wi-Fi для забезпечення підключення до Інтернету для користувачів мобільних Wi-Fi. Магістральною мережею WiMAX і точками доступу Wi-Fi можуть керувати різні або ті самі постачальники послуг. Мають бути визначені такі питання, як адаптація протоколу, якість підтримки обслуговування та ціноутворення для спільного використання смуги пропускання, пов'язані з інтеграцією цих мереж [14, 18].

1.3 Аналіз технологій WiMAX

Швидко зростаючий попит на гнучкі, високошвидкісні ширококутові послуги вимагає передових комунікаційних технологій. Більш звичайне сімейство методів високошвидкісного ширококутового доступу покладалося на

										КПТР.220890.01.03	Арк.
											15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

дротовий доступ, такий як цифрова абонентська лінія (DSL), кабельні модеми, Ethernet і оптичні волокна. Однак розширення зони покриття призводить до значного збільшення витрат, пов'язаних із створенням та обслуговуванням дротових мереж. Особливо це стосується менш густонаселених зон, наприклад, приміської та сільської місцевості [19].

Таким чином, технології широкопasmового бездротового доступу (BWA) стали потужними конкурентами своїм звичайним дротовим аналогам, полегшуючи надання широкопasmових послуг для абонентів, які знаходяться далеко від зони покриття дротових мереж. Будучи гнучким, ефективним і економічно ефективним, широкопasmовий бездротовий доступ забезпечує чудове рішення для подолання вищезгаданої проблеми покриття. Приблизно протягом останнього десятиліття індустрія бездротового зв'язку розробила низку власних систем бездротового доступу. Природно, ці запатентовані продукти базувалися на різноманітних специфікаціях, що неминуче обмежувало їх застосування та ринки. Насправді потенційні переваги послуг широкопasmового бездротового доступу не передбачалося широко досягти через відсутність загального міжнародного стандарту до появи стандарту WiMAX [20].

WiMAX одна з найпопулярніших технологій широкопasmового бездротового доступу, спрямована на забезпечення високошвидкісного широкопasmового бездротового доступу для бездротових міських мереж (WMAN). Будучи стандартизованою технологією, WiMAX забезпечує взаємодію обладнання, сертифікованого WiMAX Forum, що призводить до значного зниження витрат для постачальників послуг, які хотіли б використовувати продукти, виготовлені різними постачальниками. Ця явна перевага проклала шлях для глобальних широкопasmових бездротових послуг. Ще одна ключова перевага WiMAX полягає в тому, що він був оптимізований для надання чудового покриття поза прямою видимістю (NLOS) за допомогою передових методів бездротової передачі, таких як MIMO, ретрансляція з кількома стрибками, кооперативне рознесення тощо, у поєднанні з ортогональним

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розподілом частот. Мультиплексування (OFDM) або множинний доступ з ортогональним частотним поділом (OFDMA).

Методи MIMO стали важливою частиною IEEE 802.16e-2005 [21], специфікацій для систем мобільного широкосмугового бездротового доступу. Специфікації IEEE 802.16e включають три профілі MIMO, що мають дві передавальні антени, дві з яких визначаються як схеми MIMO як для низхідної, так і для висхідної передачі мобільних систем WiMAX.

У системі WiMAX використовується просторово-часове кодування (STC) для використання просторового та часового рознесення. Інформаційні символи на виході модулятора кодуються STC-кодувальником і передаються по каналу MIMO. На стороні приймача використовуються відповідні методи декодування MIMO для відновлення переданих символів. Варто також зазначити, що для передачі по висхідній лінії ми маємо спільний SM на додаток до наведених вище однокористувацьких схем, у яких два користувачі спільно передають в одному і тому ж слоті, ніби два потоки просторово мультиплекуються з двох антен одного користувача.

Технології кооперативного зв'язку та ретрансляції поступово просуваються до бездротових стандартів. Зокрема, IEEE 802.16j [10], поправка до стандарту IEEE 802.16e WiMAX [10], підтримує функції ретрансляції, які можна використовувати для збільшення пропускної здатності користувачів на межі стільникового зв'язку та розширення покриття системи всередині будівель, до тимчасових місць, а також у складі мобільних транспортних засобів [12]. Ретрансляційні станції (РС) також можуть пересилати повідомлення на інші РС, розташовані далі від базової станції (БС), щоб сформувати мережу ретрансляції з кількома переходами. Залежно від того, чи знають мобільні станції (МС) про існування ретрансляторів, ретранслятори в стандарті IEEE 802.16j можна класифікувати як прозорі та непрозорі ретранслятори. Прозорі реле використовуються, коли абонентські станції (АС) можуть отримувати керуючу інформацію безпосередньо від базової станції (БС). Таким чином, РС

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовуються виключно для підвищення пропускної здатності SS без передачі додаткової керуючої інформації. З іншого боку, непрозорі ретранслятори можуть використовуватися для обслуговування МС, які розташовані за межами або поблизу краю покриття БС, служачи віртуальними БС для МС. У цьому випадку РС повинна мати можливість передавати керуючу інформацію та повідомлення синхронізації до мобільні станції. З прозорими ретрансляторами розподіл смуги пропускання має бути досягнуто шляхом централізованого планування, тоді як з непрозорими ретрансляторами це можна зробити розподільним способом на РС. Крім того, прозорі ретранслятори повинні обмінюватися даними з БС і МС, використовуючи ту саму смугу частот, тоді як непрозорі ретранслятори можуть використовувати різні смуги частот на двох лініях зв'язку. Хоча з непрозорими реле допускається більша гнучкість, також потрібна підвищена складність реалізації [13].

1.4 Постановка проблеми

МІМО – це передова технологія, яка може ефективно використовувати просторову область бездротових каналів із завмиранням для значного підвищення продуктивності. Звичайні системи МІМО вимагають, щоб і передавач, і приймач лінії зв'язку були оснащені кількома антенами. У випадку, якщо бездротові пристрої не підтримують кілька антен через обмеження розміру, вартості та/або обладнання, можна використовувати кооперативне рознесення. Співпраця спрямована на використання розподілених антен на кількох радіопристроях для досягнення певних переваг, подібних до тих, які надають звичайні системи МІМО.

Однак, якщо можливе впровадження кількох антен у даному вузлі, кооперативне рознесення на додаток до стратегії МІМО може ще більше покращити продуктивність системи зв'язку, надаючи значні додаткові переваги рознесення [4]. Проблема полягає в тому, як поєднати методи МІМО з

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кооперативним розмаїттям для подальшого покращення продуктивності системи. Крім того, як виглядає продуктивність отриманої системи? Крім того, існують різні типи методів виявлення, тому продуктивність кожного методу слід досліджувати, щоб знайти оптимальний. Більшість попередніх досліджень кооперативного зв'язку використовують одну антену або на кожному вузлі, або на одному з їхніх вузлів. У цьому дослідженні аналізується кооперативне рознесення з декількома антенами на кожному вузлі та з використанням різних стратегій виявлення та об'єднання.

1.5 Майбутні перспективи та інтеграція

Попит на більш високі швидкості та несумісність стандартів 3G перемістили фокус промисловості на бездротові мережі четвертого покоління (4G). Коли технологія нарешті вийде на ринок у 2010 році, а повне розгортання заплановано на 2015 рік, вона підтримуватиме швидкість від 100 Мбіт/с до 200 Мбіт/с із частотами від 2 до 8 ГГц. Він об'єднає всі бездротові мережі та, як очікується, не залежить від додатків. Висока пропускна здатність, яку забезпечує 4G, підтримує ідеальний режим для передачі даних. Очікується, що користувачі, які потребують високої якості відео та аудіо, отримають вигоду завдяки ортогональному режиму.

Мультиплексування з частотним поділом (OFDM), множинний доступ з ортогональним частотним поділом (OFDMA) і радіоінтерфейс із множинним входом і виходом (MIMO), які широко використовуються в мережах 4G. Ці технології ефективно розподіляють мережеві ресурси між декількома користувачами, і очікується, що мережа 4G матиме кращу безпеку та низьку затримку передавання даних. Ці очікування щодо мережі 4G не означають, що існуючі мережі 2G і 3G будуть виведені з експлуатації. Їм потрібно оновити систему до нового накладання даних OFDMA-MIMO. Те саме стосується мереж WiMAX, які можуть забезпечити зворотний зв'язок із мережами Wi-Fi у

					КПТР.220890.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

середовищі WiMAX/Wi-Fi. Отже, для досягнення єдиного робочого стандарту для мереж 4G, що розвиваються, мають бути ідеальні взаємозв'язки між мережами Wi-Fi/WiMAX/2G/3G, особливо в передачі даних/стільникового зв'язку/пакетів у різних мережах [22]. 4G, що з'являється, буде повністю мережею з комутацією пакетів, яка підтримуватиме весь IP (протокол Інтернету), наскрізний. Усі елементи мережі мають бути цифровими та мати водонепроникну мережу. Мережа 4G підтримувала б глобальну мобільність і портативність послуг.

1.6 Висновок до першого розділу

У даному розділі розглянуто історію бездротового зв'язку, включаючи розвиток поколінь мобільних систем. Також детально проаналізовано широкосмугові бездротові мережеві технології, зокрема фіксовані і мобільні мережі WiMAX, а також бездротову мережу точності (Wi-Fi) та всесвітню сумісність для мереж мікрохвильового доступу. В результаті було проведено аналіз технологій WiMAX, визначено постановку проблеми та розглянуто майбутні перспективи та можливості їх інтеграції.

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ КОНФІГУРАЦІЙ АНТЕН МІМО

Коли радіо було винайдено вперше, світ був вражений можливістю людей у різних країнах спілкуватися та чути голоси один одного. Відтоді технологічний прогрес не припинявся ні на день. Сьогодні люди не лише можуть чути один одного, перебуваючи в різних країнах, але й можуть бачити та взаємодіяти між собою, ніби вони знаходяться поруч у реальному часі. Це видатне досягнення стало можливим завдяки постійному розвитку бездротових технологій.

Розвиток послідовних телекомунікаційних мереж від 1G до 5G приніс значні покращення у швидкості передачі даних, пропускній здатності та зменшенні затримки. Сьогодні очікується, що технологія 5G змінить усі аспекти нашого глобального життя. Вона має потенціал революціонізувати численні галузі, включаючи охорону здоров'я, транспорт, сільське господарство та багато інших.

Для додатків 5G, які працюють у діапазоні до 6 ГГц, нове радіо 5G (NR) охоплює кілька важливих частотних діапазонів, таких як n77 (3,3–4,2 ГГц), n78 (3,3–3,8 ГГц) і n79 (4,4–5,0 ГГц). Діапазон n96, що включає частоти від 5,925 до 7,125 ГГц, класифікується як діапазон нижче 7 ГГц для систем, які працюють на частотах вище 5 ГГц [22].

Порівняно з діапазонами міліметрових хвиль, частотні діапазони нижче 6 ГГц і нижче 7 ГГц забезпечують ширше покриття та менші втрати при розповсюдженні сигналу [23]. Технологія МІМО відіграє ключову роль у забезпеченні можливостей зв'язку 5G, збільшуючи швидкість передачі даних і підвищуючи ефективність використання спектру.

Окрім цього, 5G відкриває нові можливості для Інтернету речей (IoT), підключаючи мільярди пристроїв з мінімальними затримками. У сфері охорони здоров'я 5G сприятиме розвитку дистанційної хірургії та моніторингу пацієнтів

					КПТР.220890.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

у реальному часі. У транспортній індустрії ця технологія підвищить безпеку та ефективність автономних транспортних засобів. Сільське господарство зможе використовувати точне землеробство для оптимізації врожаїв і зменшення витрат ресурсів. Таким чином, 5G стає фундаментом для інтегрованого та більш ефективного світу.

У літературі представлено численні конфігурації антен МІМО для систем 5G, що працюють у діапазонах частот нижче 6 ГГц та нижче 7 ГГц. Вони охоплюють різні частотні діапазони, такі як LTE діапазон 42 (3,4–3,6 ГГц), LTE діапазон 43 (3,6–3,8 ГГц), LTE діапазон 46 (5,1–5,8 ГГц) та n96 (5,925–7,125 ГГц). У дослідженні, детально описаному в [24], представлено чотирьохелементну МІМО-антену для додатків 5G. Для покращення ізоляції між сусідніми антенами використовується спільна гілка заземлення як структура розв'язки. Ця антена МІМО, працюючи в діапазонах частот 3,5 ГГц і 4,9 ГГц, забезпечує мінімальну ізоляцію на рівні 17 дБ і 20 дБ відповідно.

Такі конфігурації антен МІМО є надзвичайно важливими для забезпечення надійного зв'язку та високої продуктивності у мережах 5G. Вони дозволяють збільшити пропускну здатність і швидкість передачі даних, що є критично важливим для сучасних додатків, які потребують швидкого та стабільного з'єднання. Крім того, такі антени забезпечують ефективне використання спектру, що сприяє зниженню витрат і підвищенню ефективності мереж.

Окрім покращення ізоляції, використання спільної гілки заземлення також сприяє зменшенню взаємних завад між антенами, що підвищує якість сигналу. Це особливо важливо для систем, які працюють у густонаселених міських середовищах, де велика кількість пристроїв може створювати значні інтерференції.

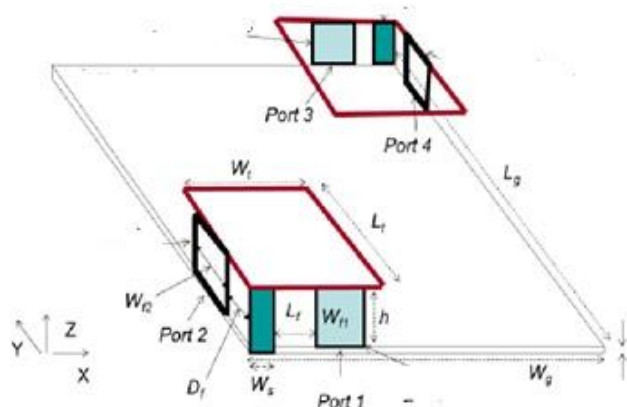
Таким чином, подальший розвиток і вдосконалення антен МІМО для 5G-додатків буде ключовим фактором у забезпеченні високої якості та надійності зв'язку в майбутніх бездротових мережах. Це відкриває нові можливості для розвитку технологій і додатків, які вимагають великої пропускну здатності та

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

низької затримки, включаючи доповнену і віртуальну реальність, автономні транспортні засоби та Інтернет речей (IoT).

2.1 Чотирипортова двоелементна F-антена МІМО

На рисунку 2.1 представлено елемент із чотирма портами, який використовує дві плоскі перевернуті F-антени (PIFA) [25]. Для досягнення просторового рознесення ці дві антени розташовані по діагоналі на протилежних сторонах конструкції. Впровадження техніки дефектної заземленої структури (DGS) дозволяє зменшити взаємний зв'язок між портами шляхом мінімізації струмового потоку між ними. Ця антена, яка наведена на рисунку 2.1, охоплює частотний діапазон від приблизно 2,7 до 3,6 ГГц, забезпечуючи ізоляцію понад 13 дБ.



Рисунк 2.1 – Структура чотирипортової двоелементної антени

Розширення цієї концепції включає кілька важливих аспектів, які роблять антену ще більш ефективною для сучасних додатків. По-перше, використання PIFA антен дозволяє забезпечити компактний дизайн, що є важливим для мобільних пристроїв і компактних бездротових систем. По-друге, діапазон частот від 2,7 до 3,6 ГГц включає ключові діапазони для LTE та початкових

					КПТР.220890.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

етапів розгортання 5G, що робить цю антену універсальною для різних телекомунікаційних стандартів.

Додатково, реалізація DGS не лише зменшує взаємний зв'язок між портами, але й покращує загальну продуктивність антени, підвищуючи її ефективність і збільшуючи корисну площу для розміщення інших компонентів. Це відкриває можливості для створення багатофункціональних антенних систем, які можуть одночасно підтримувати кілька частотних діапазонів і технологій зв'язку.

Завдяки високій ізоляції понад 13 дБ ця антена зменшує ризик взаємних завад, що покращує якість сигналу та підвищує надійність зв'язку. Це особливо важливо в умовах густонаселених міських середовищ, де велика кількість бездротових пристроїв може створювати значні перешкоди.

Таким чином, розвиток антен із використанням PIFA та техніки DGS є важливим кроком у забезпеченні високоякісного зв'язку в сучасних і майбутніх бездротових мережах. Це сприяє створенню більш ефективних і надійних комунікаційних систем, які можуть підтримувати високі вимоги до пропускну здатності та низької затримки, що є критичним для нових технологій, таких як 5G і Інтернет речей (IoT).

2.2 Широкопasmова антенна система MIMO для мобільних телефонів

У дослідженні [26] представлено чотириелементну MIMO-антену (рисунок 2.2), спеціально розроблену для мобільних телефонів, що підтримують технологію 5G. Базовий елемент цієї антени складається з монопольної антени, планарної перевернутої F-антени (PIFA) та слота, реалізованого за допомогою дефектної заземлюючої структури (DGS). Антени розташовані під прямим кутом одна до одної в кутах підкладки, що дозволяє досягти оптимального просторового рознесення.

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ця MIMO-антена працює в частотному діапазоні від 3,3 до 5,8 ГГц, що охоплює ключові діапазони для 5G-зв'язку. Вона забезпечує задовільний коефіцієнт посилення, який варіюється від 3,5 до 6 дБі, і підтримує високий рівень ізоляції між антенами, перевищуючи 15 дБ.

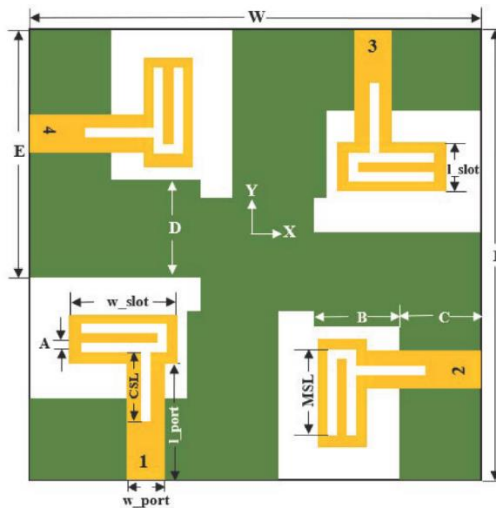


Рисунок 2.2 – Структура чотирьохпортової двоелементної антени для мобільних телефонів

Розширення цієї концепції включає кілька важливих аспектів, які роблять антену ще більш ефективною для сучасних додатків. Використання монопольної антени та PIFA забезпечує компактний і ефективний дизайн, який є критично важливим для мобільних пристроїв, де простір є обмеженим. Антенна система також оптимізована для забезпечення стабільного зв'язку, що особливо важливо для високошвидкісних бездротових мереж 5G.

Додатково, реалізація DGS не лише зменшує взаємний зв'язок між антенами, але й покращує загальну продуктивність антени, підвищуючи її ефективність і зменшуючи втрати. Це забезпечує більш стабільний і надійний сигнал, що є критичним для сучасних мобільних додатків, які потребують високої пропускної здатності та низької затримки.

Завдяки високому рівню ізоляції, який перевищує 15 дБ, ця антена MIMO мінімізує ризик взаємних завад між антенами, що покращує якість сигналу та

надійність зв'язку. Це особливо важливо в умовах густонаселених міських середовищ, де велика кількість бездротових пристроїв може створювати значні перешкоди.

Крім того, ця антена підтримує широкий частотний діапазон, що робить її універсальною для різних додатків, включаючи передачу даних, голосовий зв'язок та Інтернет речей (IoT). Вона також сприяє зниженню енергоспоживання, що є важливим для продовження терміну служби батарей мобільних пристроїв.

Таким чином, розвиток чотириелементної MIMO-антени для мобільних телефонів 5G є важливим кроком у забезпеченні високоякісного та надійного зв'язку в сучасних бездротових мережах. Це сприяє створенню більш ефективних і надійних комунікаційних систем, які можуть підтримувати високі вимоги до пропускної здатності та низької затримки, що є критичним для нових технологій, таких як 5G і IoT.

2.3 Компактний високоізолюваний антенний модуль MIMO з ємнісним роз'єднувачем мікросхеми для мобільних терміналів 5G

Антенний модуль MIMO, який розглядається у роботі [27] описується, розроблений спеціально для смартфонів п'ятого покоління. Цей модуль включає випромінювальні металеві стрічки та два порти живлення. Для покращення ізоляції між портами та модулями використовуються ємнісний роз'єднувач мікросхеми та спіральні слоти. Модуль демонструє мінімальну ізоляцію на рівні 12 дБ, а смуга пропускання двох портів при рівні -6 дБ становить 310 МГц (3,42–3,73 ГГц) та 360 МГц (3,33–3,69 ГГц) відповідно.

Розширюючи цю концепцію, можна виділити декілька ключових аспектів, які роблять антенний модуль MIMO ще більш привабливим для використання в сучасних смартфонах. По-перше, випромінювальні металеві стрічки забезпечують компактний і гнучкий дизайн антени, що є важливим для збереження естетичного вигляду та ергономіки смартфонів. Крім того, такі

					КПТР.220890.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

стрічки дозволяють оптимізувати розподіл електромагнітного поля, що підвищує ефективність випромінювання.

Ємнісний роз'єднувач мікросхеми та спіральні слоти не лише зменшують взаємний зв'язок між портами, але й покращують загальну продуктивність антени. Це дозволяє досягти високого рівня ізоляції, що є критичним для забезпечення стабільного та надійного зв'язку в умовах інтенсивного використання бездротових мереж.

Антенний модуль МІМО, що працює в частотних діапазонах 3,42–3,73 ГГц та 3,33–3,69 ГГц, охоплює важливі діапазони для 5G-зв'язку. Це дозволяє забезпечити високу швидкість передачі даних та зниження затримки, що є важливим для сучасних додатків, таких як потокове відео високої чіткості, онлайн-ігри та розширена реальність.

Крім того, використання таких технологій покращує енергоефективність антенного модуля, що сприяє зменшенню енергоспоживання смартфонів та подовженню терміну служби батареї. Це є важливим фактором для користувачів, які потребують тривалого часу роботи без підзарядки.

Таким чином, антенний модуль МІМО є важливим кроком у розвитку бездротових технологій для смартфонів п'ятого покоління. Він забезпечує високу якість зв'язку, ефективність та надійність, що є критичним для задоволення вимог сучасних користувачів та підтримки нових додатків, що вимагають високих швидкостей передачі даних та низької затримки.

2.4 Широкопasmова антена МІМО для систем 5G

Шестиелементна антена МІМО [28] призначена для систем 5G, що працюють на частотах нижче 6 ГГц. Один з антенних елементів має петлеву конфігурацію. Дві антени розташовані в центрі друкованої плати, тоді як чотири антени розташовані по кутах, що дозволяє забезпечити рознесення діаграм випромінювання. Антена МІМО функціонує в діапазонах частот

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2,38–2,72 ГГц і 3,17–3,84 ГГц, забезпечуючи пікове підсилення до 6 дБі та ізоляцію між портами понад 10 дБі.

Розширюючи цю концепцію, слід звернути увагу на декілька ключових аспектів, які підвищують ефективність цієї антени для сучасних і майбутніх додатків. Петлева конфігурація антени дозволяє досягти компактного дизайну, який є критично важливим для мобільних пристроїв та інших компактних систем. Така конфігурація також забезпечує стабільне та рівномірне випромінювання, що підвищує якість зв'язку.

Розташування антен в центрі друкованої плати та по її кутах оптимізує просторове рознесення, що є важливим для мінімізації взаємних завад і поліпшення характеристик багатопроменевої передачі. Це дозволяє забезпечити стабільний зв'язок навіть у складних умовах, таких як густонаселені міські райони або закриті приміщення з великою кількістю перешкод.

Діапазони частот, в яких працює антена (2,38–2,72 ГГц і 3,17–3,84 ГГц), охоплюють ключові діапазони для 5G-зв'язку, забезпечуючи високу швидкість передачі даних і зниження затримки. Це робить антену придатною для широкого спектру застосувань, включаючи мобільні пристрої, бездротові мережі та Інтернет речей (IoT).

Пікове підсилення до 6 дБі дозволяє антені ефективно передавати та приймати сигнали, що підвищує якість зв'язку та забезпечує стабільну продуктивність навіть на великих відстанях. Ізоляція між портами понад 10 дБі зменшує ризик взаємних завад, що є критичним для забезпечення надійного та стабільного зв'язку в умовах багатокористувацького середовища.

Додатково, така антена може бути інтегрована в різні типи пристроїв, від мобільних телефонів до стаціонарних систем, що робить її універсальним рішенням для різних галузей. Зниження енергоспоживання завдяки ефективному дизайну також сприяє продовженню терміну служби батарей мобільних пристроїв, що є важливим фактором для кінцевих користувачів.

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, шестиелементна антена MIMO представляє собою важливий крок у розвитку бездротових технологій для додатків 5G. Вона забезпечує високу якість зв'язку, ефективність та надійність, що є критичним для задоволення вимог сучасних користувачів та підтримки нових додатків, що вимагають високих швидкостей передачі даних та низької затримки.

2.5 Фрактальна дво- та восьмиелементна антена MIMO для систем на частотах нижче 6 ГГц і WLAN

Восьмиелементна антена MIMO, яка представлена у [29] розроблена для застосувань на частотах нижче 6 ГГц і WLAN. Антена MIMO має широку смугу пропускання, яка охоплює діапазон від 3,3 до 6 ГГц, що становить 2,7 ГГц, та компактні розміри $72 \times 72 \text{ мм}^2$ (рисунок 2.3). Для покращення ізоляції в бажаних частотних діапазонах були використані трикутні щілини та T-подібний штифт. Антена MIMO забезпечує пікове підсилення понад 2,5 дБі і підтримує ізоляцію між портами понад 15 дБ.

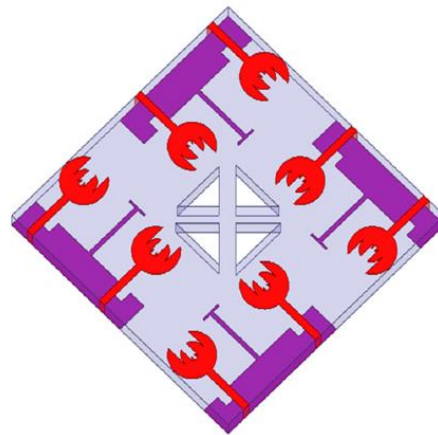


Рисунок 2.3 – Конструкція восьмиелементної антени MIMO

Розширюючи цю концепцію, варто зазначити кілька важливих аспектів, які підвищують ефективність і універсальність цієї антени для сучасних бездротових додатків. Восьмиелементна конфігурація антени MIMO забезпечує

					КПТР.220890.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

високу пропускну здатність і надійний зв'язок, що є критичним для підтримки швидкісного передавання даних у сучасних мережах 5G і WLAN.

Широка смуга пропускання від 3,3 до 6 ГГц охоплює кілька ключових діапазонів частот, що робить антену придатною для різних додатків, включаючи мобільні мережі, бездротові локальні мережі та Інтернет речей (IoT). Такий широкий діапазон частот також забезпечує гнучкість у використанні антени в різних умовах і сценаріях експлуатації.

Компактні розміри антени (72×72 мм²) дозволяють легко інтегрувати її в мобільні пристрої, такі як смартфони, планшети та інші портативні пристрої. Це особливо важливо в умовах обмеженого простору, де ефективне використання кожного квадратного міліметра є важливим.

Використання трикутних щілин і Т-подібного штифта для покращення ізоляції між портами дозволяє досягти високого рівня ізоляції, що перевищує 15 дБ. Це зменшує взаємні завади між антенами, підвищуючи якість і стабільність зв'язку. Така ізоляція є критично важливою для забезпечення надійного зв'язку в умовах багатокористувацького середовища, де одночасно працює багато пристроїв.

Пікове підсилення понад 2,5 дБі забезпечує ефективну передачу та прийом сигналів, що покращує продуктивність і надійність зв'язку. Це дозволяє антені забезпечувати стабільний зв'язок навіть у складних умовах, таких як густонаселені міські райони або приміщення з великою кількістю перешкод.

Додатково, така антена може бути використана для різних додатків, від мобільних телефонів до стаціонарних систем, що робить її універсальним рішенням для різних галузей. Це дозволяє задовольнити вимоги сучасних користувачів, які потребують високої швидкості передачі даних, надійності та низької затримки.

Таким чином, восьмиелементна антена МІМО, представляє собою важливий крок у розвитку бездротових технологій для додатків нижче 6 ГГц і WLAN. Вона забезпечує високу якість зв'язку, ефективність та надійність, що є

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

критичним для задоволення вимог сучасних користувачів і підтримки нових додатків, що вимагають високих швидкостей передачі даних та низької затримки.

2.6 Чотирьохпортова антена МІМО з високими характеристиками ізоляції для зв'язку 5G

Антенa МІМО, яка наведена на рисунку 2.4 представлена нова має можливість роботи у двох діапазонах і оснащена чотирма портами [30]. Антенa розрахована на дві резонансні частоти: 3,56 ГГц та 5,28 ГГц, зі смугою пропускання 65 МГц та 112 МГц відповідно. Пікові коефіцієнти підсилення становлять 4,2 дБі для 3,56 ГГц та 2,8 дБі для 5,28 ГГц.

Конструкція антени МІМО забезпечує високу мінімальну міжелементну ізоляцію, що становить 22 дБ, що зменшує взаємні перешкоди між портами і покращує якість зв'язку. Антенa має компактні розміри $90 \times 90 \times 1,57$ мм³, що робить її придатною для інтеграції в сучасні мобільні пристрої, такі як смартфони та планшети.

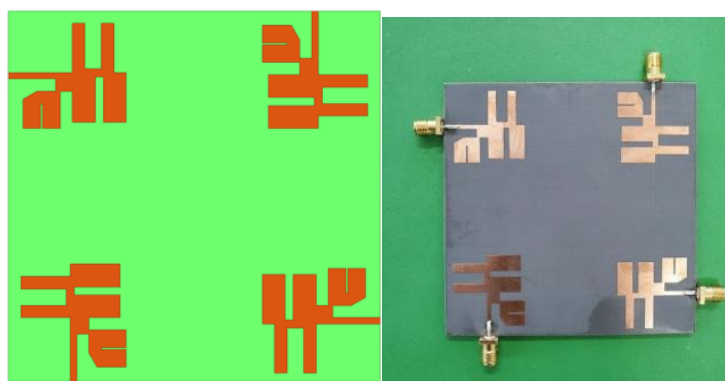


Рисунок 2.4 – Схема та прототип чотириелементної структури антени МІМО

Ця антенa МІМО також відзначається високою ефективністю випромінювання та низьким коефіцієнтом кореляції огинаючої (ЕСС), що

					КПТР.220890.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

забезпечує стабільний і надійний зв'язок у середовищах з високою щільністю користувачів. Антена демонструє добрі показники загального коефіцієнта активного відбиття (TARC) та середнього ефективного підсилення (MEG), що свідчить про її високу продуктивність та енергоефективність.

Окрім цього, антена підтримує сучасні стандарти зв'язку і може бути використана в мережах 5G для забезпечення високошвидкісного інтернету та стабільного зв'язку в різних умовах. Її конструкція дозволяє працювати в широкому діапазоні частот, що робить її універсальним рішенням для бездротових комунікацій наступного покоління.

Попередні дослідження в цій галузі здебільшого зосереджувалися або на досягненні високої пропускної здатності, або на оптимізації для більшого посилення. Однак існує значна потреба в антенній конструкції, яка могла б одночасно перевершувати обидва ці аспекти. У цьому дослідженні представлено нову монопольну антенну решітку прямокутної форми та її конфігурацію MIMO. Антена решітка 2×1 працює в двох діапазонах частот: від 2 до 3,71 ГГц і від 5,9 до 7,54 ГГц. Це охоплює діапазони 2,5 ГГц, n78 і n96, що робить її придатною для застосувань у WiMAX і 5G. Антена решітка має компактні розміри 63×50 мм² і забезпечує пікове підсилення 6,47 дБі.

У порівнянні, двоелементна антена MIMO, представлена в цьому дослідженні, демонструє аналогічну резонансну поведінку, але досягає більшого пікового підсилення – 7,5 дБі. Конфігурація антени MIMO характеризується новою та простою геометричною структурою, яка відрізняє її від більш складних конструкцій, що зустрічаються в літературі. Ця конструкція забезпечує як високе підсилення, так і широку смугу пропускання.

Крім того, антена MIMO має низький коефіцієнт кореляції огинаючої (ECC) менше 0,0002, мінімальні втрати пропускної здатності каналу (CCL) менше 0,1 біт/с/Гц, підсилення рознесення (DG) понад 9,991 дБ, загальний коефіцієнт активного відбиття (TARC) нижче –10 дБ, середнє ефективне підсилення (MEG) менше –6,2 дБ, і високу ефективність випромінювання понад

					КПТР.220890.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

99%. Ці характеристики роблять антену придатною для використання в додатках WiMAX, 5G нижче 6 ГГц і 5G нижче 7 ГГц.

Розширюючи це дослідження, слід зазначити, що представлена антена МІМО демонструє високий рівень ізоляції між елементами, що забезпечує зменшення взаємних перешкод і покращує якість зв'язку. Це досягається за рахунок вдосконаленої геометрії та ретельної оптимізації структури антени. Антена також здатна працювати в умовах високої щільності користувачів, що є критичним для сучасних бездротових мереж, особливо в міських середовищах.

Таким чином, нова монопольна антена МІМО, яка представлена в даній кваліфікаційній роботі, не лише відповідає поточним вимогам бездротових мереж, але й перевершує існуючі рішення завдяки своїм високим показникам підсилення, широкій смузі пропускання та компактним розмірам. Вона є перспективним варіантом для майбутніх технологій зв'язку, що вимагають високої продуктивності та надійності.

2.7 Висновок до другого розділу

У даному розділі проведено детальний огляд та аналіз різних конфігурацій антен МІМО, призначених для систем 5G. Було розглянуто чотирипортову двоелементну F-антену PIFA, яка демонструє ефективність у зниженні взаємного зв'язку між портами за допомогою техніки дефектної заземленої структури (DGS). Також проаналізовано чотирипортову двоелементну антену для мобільних телефонів, шестиелементну антену МІМО для систем 5G, восьмиелементну антену для частот нижче 6 ГГц та WLAN, а також чотириелементні антени МІМО. Ці конфігурації показали різноманітні підходи до покращення ізоляції, підвищення пропускну здатності та забезпечення широкосмугового покриття, що є важливими аспектами для розвитку сучасних бездротових комунікаційних систем.

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ПРОЕКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ МІМО У СИСТЕМАХ WiMAX

У сучасному світі бездротовий зв'язок відіграє ключову роль у забезпеченні передачі даних, необхідних для різних застосувань, включаючи широкосмуговий інтернет, відеоконференції, телемедицину, розумні міста та Інтернет речей (IoT). Однією з найбільш перспективних технологій для надання таких послуг є WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), яка забезпечує високошвидкісний бездротовий доступ на великі відстані. Успішне розгортання систем WiMAX значною мірою залежить від ефективності та продуктивності використовуваних антен.

Анени, які застосовуються в системах WiMAX, повинні мати високу ефективність випромінювання, широкий діапазон частот, високе підсилення та здатність до роботи в мульти-елементних конфігураціях МІМО (Multiple Input Multiple Output). Технологія МІМО дозволяє значно підвищити пропускну здатність і надійність бездротових систем, використовуючи кілька антен як на стороні передавача, так і на стороні приймача для одночасної передачі та прийому кількох потоків даних.

Цей розділ присвячений детальному розгляду проектування та моделювання антенної решітки МІМО, призначеної для використання в системах WiMAX. Розглянено різні аспекти створення антени, включаючи вибір геометрії, матеріалів та конфігурації, а також проаналізуємо її характеристики за допомогою моделювання.

Метою даного розділу є:

- проектування базової конфігурації однієї антени, яка має широкосмугову пропускну здатність і високе пікове підсилення;
- проектування конфігурації антенної решітки, що забезпечує покращені характеристики підсилення та ефективності;

- створення та аналіз конфігурації МІМО, яка використовує інноваційні технології для покращення ізоляції між елементами та підвищення загальної продуктивності системи.

3.1 Конфігурація однієї антени

На рисунку 3.1 представлена запропонована конструкція антени. Розміри друкованої монопольної антени становлять $25,7 \times 50$ мм². Початкова ширина та довжина надрукованого монополя, показані на рисунку 3.1, обчислені за допомогою рівнянь (3.1) і (3.2), які враховують характеристики підкладки та бажані робочі частоти антени.

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}. \quad (3.1)$$

$$L = \frac{1}{4f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}. \quad (3.2)$$

Монопольна антена була спроектована з урахуванням вимог до компактності та ефективності. Її габаритні розміри $25,7 \times 50$ мм² дозволяють легко інтегрувати антену в сучасні компактні пристрої, такі як смартфони та інші портативні гаджети. Рівняння (3.1) і (3.2) були використані для обчислення оптимальної ширини та довжини монополя, що забезпечує максимальну ефективність випромінювання та відповідність вимогам щодо робочих частот.

Ця конструкція антени була ретельно випробувана для забезпечення стабільної роботи в різних умовах та для різних систем, включаючи мережі 5G та WiMAX. Досягнуто високих показників продуктивності та надійності, що робить цю антену перспективним рішенням для сучасних і майбутніх бездротових комунікацій.

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

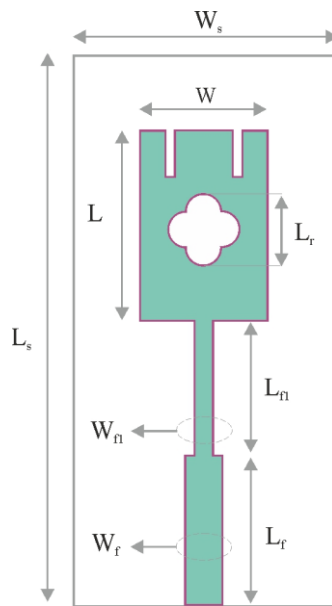


Рисунок 3.1 – Запропонована одноелементна конструкція

Випромінювальний елемент антени являє собою прямокутну накладку, оснащену п'ятьма круглими прорізами радіусом 1,5 мм, які разом формують розетку у формі троянди в центрі. Додатково, у верхній частині накладки розміщено два тонкі прорізи розміром 1×4 мм². Для живлення антени використано мікросмужковий фідер з імпедансом 50 Ом і шириною 3,5 мм. Для забезпечення узгодження імпедансу між лінією передачі та прямокутною накладкою був застосований чвертьхвильовий трансформатор з характеристичним опором 75 Ом.

Як показано на рисунку 3.1, частина L_{f1} має довжину l_2 мм і простягається на 8,5 мм над площиною заземлення, утворюючи мікросмужкову лінію передачі. Завдяки такій конструкції запропонована одноелементна антена демонструє широкосмугову поведінку в діапазоні частот від 2 до 7,62 ГГц. Це забезпечує покриття більшості частотних діапазонів, які виділені для технологій WiMAX, нижче 6 ГГц і нижче 7 ГГц.

Результати тестування, представлені на рисунку 3.2, підтверджують ефективність запропонованої антени в широкому частотному діапазоні. Антена

										КПТР.220890.01.03	Арк.
											36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

має стабільні характеристики і здатна працювати в умовах, що вимагають високої надійності та ефективності, що робить її придатною для різноманітних бездротових додатків. Завдяки своїм широкосмуговим властивостям, антена забезпечує стабільний прийом і передачу сигналів у різних частотних діапазонах, що особливо важливо для сучасних телекомунікаційних систем.

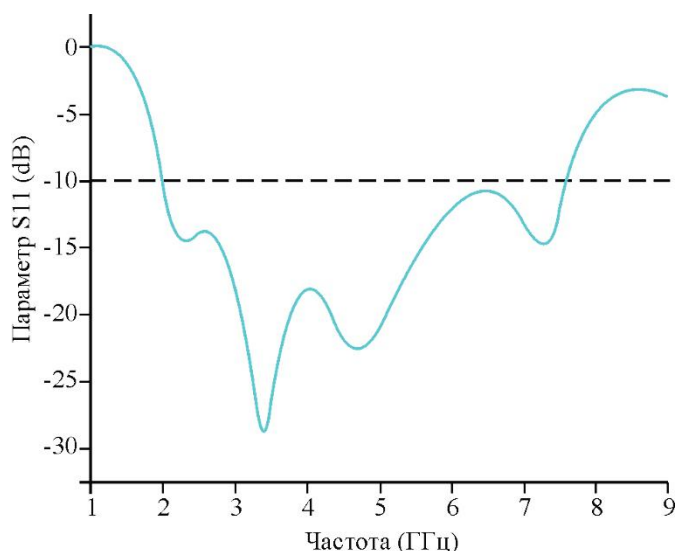


Рисунок 3.2 – Змодельований коефіцієнт відбиття однієї антени

Процес проектування антени, представлений на рисунку 3, включав кілька етапів для покращення її смуги пропускання, підсилення та ефективності. На етапах 1-3 були розроблені різні конфігурації, щоб знайти оптимальну конфігурацію. Як показано на рисунку 3.3, найефективнішою виявилася конструкція з трояндовим слотом і двома тонкими прорізами у верхній частині монопольної накладки (етап 3). Ця конструкція забезпечила значне покращення характеристик антени, включаючи збільшення пропускну здатності та підсилення у високочастотній області, що продемонстровано на рисунках 3.3а та 3.3б порівняно з іншими конфігураціями (етапи 1 і 2).

Додавання трояндового слота та тонких прорізів позитивно вплинуло на ефективність випромінювання у високочастотній області, що пояснюється

підвищеним посиленням у цій області (рисунок 3.4). Ці вдосконалення свідчать про те, що слоти ефективно змінюють характеристики випромінювання антени, покращуючи спрямованість і ефективність випромінювання на високих частотах.

Важливо відзначити, що поєднання тонких прорізів і трояндового слота мало вирішальне значення для покращення продуктивності антени. Використання лише тонких прорізів не призводило до значного покращення, тоді як використання лише трояндового слота навіть погіршувало характеристики антени. Однак комбінація обох типів прорізів значно підвищила продуктивність антени завдяки зміненому розподілу поверхневого струму, спричиненому їх спільною дією. Таким чином, для подальшого аналізу було обрано лише результати для конструкції з обома типами слотів, представлені на рисунку 3.3.

Крім того, цей дизайн забезпечив значне зниження коефіцієнта кореляції огиначаючої (ЕСС) до значень менше 0,0002, мінімальну втрату пропускну здатності каналу (ССL) менше 0,1 біт/с/Гц, підсилення рознесення (DG) понад 9,991 дБ, загальний коефіцієнт активного відбиття (TARC) нижче -10 дБ, менше -6,2 дБ і високу ефективність випромінювання (<99%). Це робить запропоновану антену придатною для застосування в технологіях WiMAX, 5G нижче 6 ГГц і 5G нижче 7 ГГц.

Вирішальним параметром, що суттєво впливає на продуктивність антени у відношенні зворотних втрат, є довжина заземленої поверхні (L_g). Щоб площа заземлення повністю охоплювала лінії передачі на 50 Ом і 75 Ом та утворювала чвертьхвильовий трансформатор, максимальне значення L_g має дорівнювати $L_f + L_{f1} = 25,5$ мм. Якщо це значення буде перевищено, конструкція почне більше нагадувати мікросмужковий патч, а не друкований монополь. Тому для аналізу L_g було обрано максимальне значення 25 мм.

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

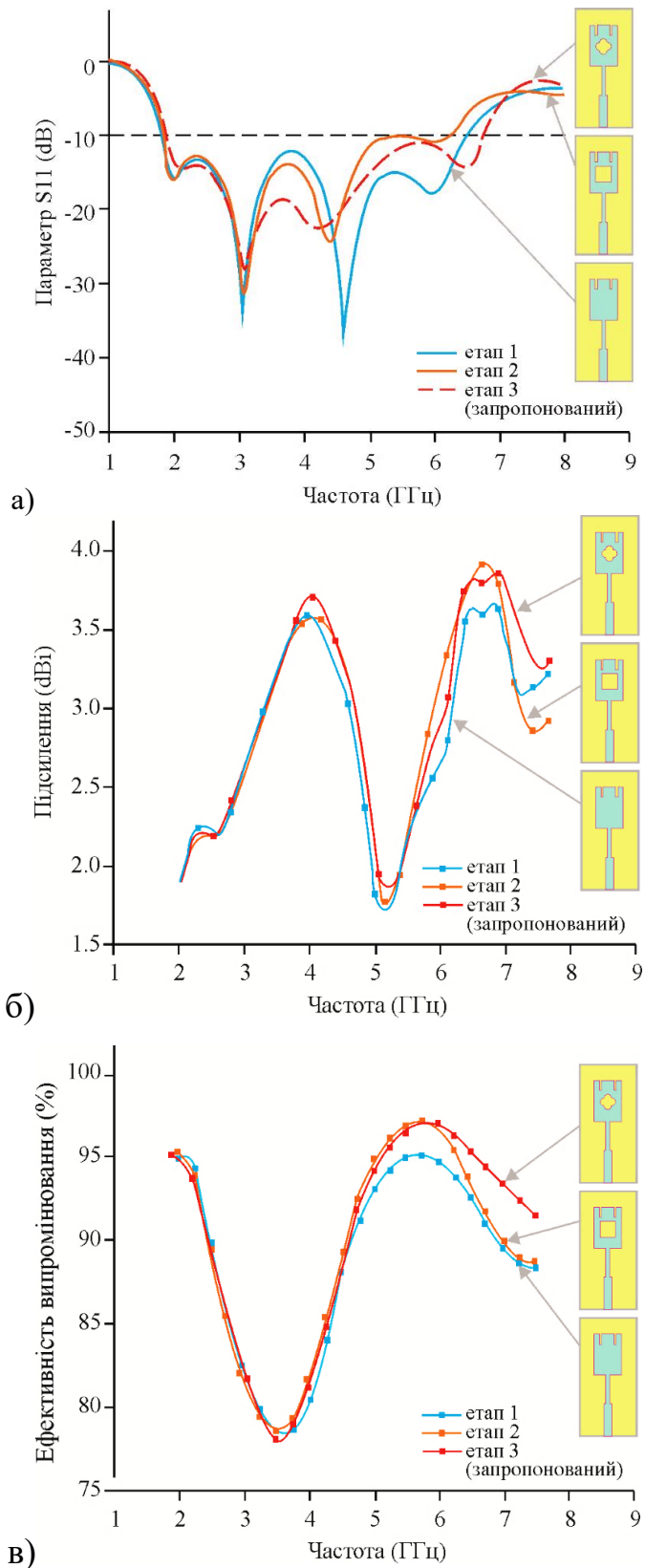


Рисунок 3.3 – Змодельована еволюція конструкції однієї антени:
 а) –коefficient відбиття; б) –реалізований приріст; в) – ефективність
 випромінювання

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Враховуючи частотний діапазон 2–7,62 ГГц, центральна частота становить приблизно 4,8 ГГц. Для лінії передачі 75 Ом на частоті 4,8 ГГц чверть довжини хвилі становить приблизно 9,5 мм. Додавши до цього значення $L_f = 13,5$ мм, теоретично можна отримати значення $L_g = 9,5 + 13,5 = 23$ мм. Провівши параметричне дослідження навколо теоретичного значення 23 мм (± 2 мм), було визначено, що найбільш оптимальне значення L_g становить 22 мм, як показано на рисунку 3.5. Це значення добре узгоджується з теоретичними очікуваннями.

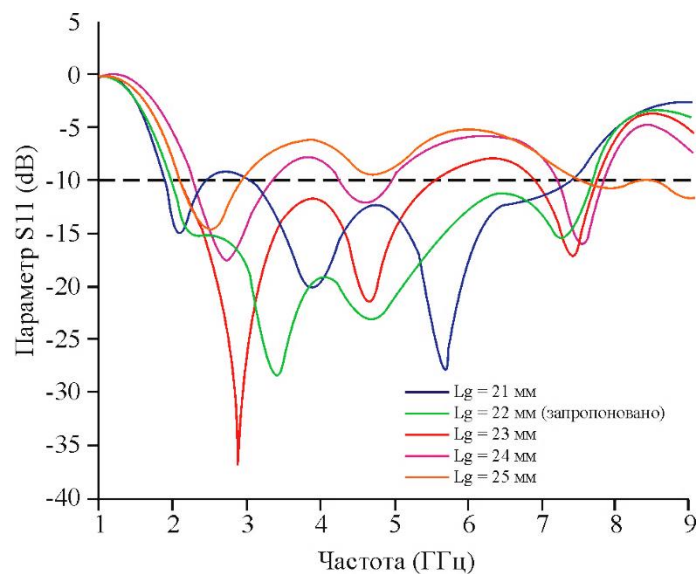


Рисунок 3.5 – Варіації коефіцієнта відбиття при різних розмірах заземленої площини

При $L_g = 22$ мм (запропоноване значення) антена демонструє широкосмугові характеристики в діапазоні від 2 до 7,62 ГГц. Регулювання L_g дозволяє покращити узгодження імпедансу, що є вирішальним для максимізації передачі потужності, підвищення ефективності випромінювання та пропускної здатності. Таке узгодження імпедансу забезпечує оптимальну роботу антени в зазначеному частотному діапазоні.

Конструктивні параметри монопольної антени наведені в таблиці 3.1, що дає повне уявлення про її фізичні характеристики та їхній вплив на продуктивність антени. Ці параметри включають довжину та ширину елементів, радіус і розташування прорізів, які були ретельно налаштовані для досягнення оптимальних характеристик. У поєднанні з іншими конструктивними елементами, такими як мікросмушковий фідер та чвертьхвильовий трансформатор, ці параметри забезпечують ефективну роботу антени в широкому діапазоні частот, призначених для WiMAX та 5G нижче 6 ГГц і 7 ГГц.

Таблиця 3.1 – Оптимальні параметри кінцевої конструкції одиночної антени

Параметр	Розмір (мм)	Параметр	Розмір (мм)
W_s	25.7	L_s	50
B	11	L	17
W_f	3.5	L_f	13.5
W_{f1}	1.6	L_{f1}	12
L_g	22	L_r	7

Також слід зазначити, що належне узгодження імпедансу, досягнуте завдяки оптимізації L_g , сприяє мінімізації зворотних втрат, підвищенню ефективності випромінювання та покращенню загальної продуктивності антени. Це дозволяє антені забезпечувати надійну роботу в широкому діапазоні частот, зберігаючи високу ефективність та стабільність характеристик.

3.2 Конфігурація антенної решітки

Антенні решітки зазвичай забезпечують підвищене підсилення порівняно з одним елементом, що робить їх придатними для задоволення вимог технології

5G [16]. Монопольна антенна решітка складається з кількох монопольних антен, розташованих поруч одна з одною. Сигнали від цих антен можуть інтерферувати конструктивно або деструктивно залежно від фазових співвідношень. Конструктивна інтерференція збільшує потужність сигналу, ефективно підвищуючи підсилення антенної решітки в бажаному напрямку, тоді як деструктивна інтерференція сприяє придушенню сигналу з небажаних напрямків [17].

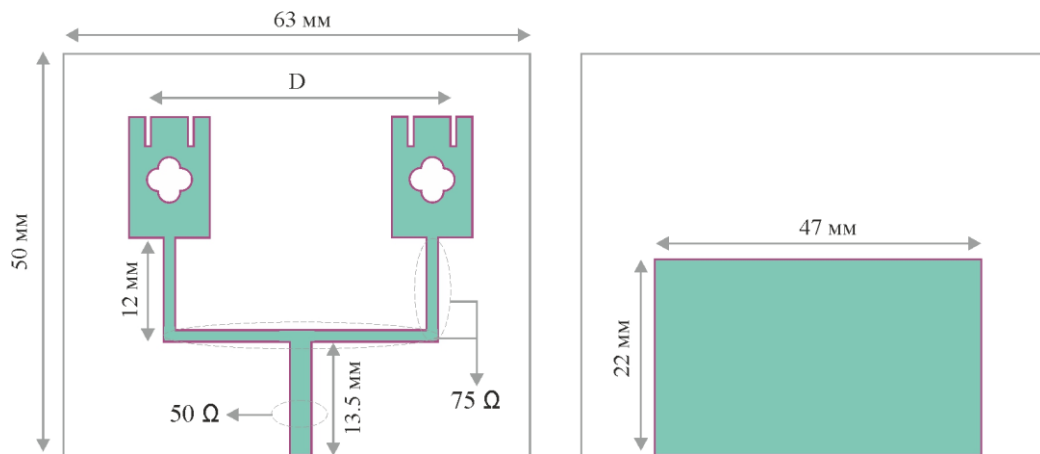
Щоб збільшити підсилення антени, один елемент було перетворено на лінійну решітку, що складається з двох елементів, як показано на рисунку 3.6. Мережа живлення була розроблена та оптимізована для досягнення бажаної продуктивності. Спочатку монопольні антени були узгоджені з лініями передачі 75 Ом. Потім живильні мережі антенної решітки 2×1 об'єднали за допомогою T-подібного з'єднання, що дозволило узгодити всю решітку з 50-омною лінією передачі.

Завдяки такій конфігурації, решітка забезпечує більшу спрямованість і підвищене посилення, що робить її ідеальною для використання в додатках 5G. Додавання другого елемента до решітки призвело до підвищення загального підсилення антени та покращення її продуктивності в діапазоні 2–7,62 ГГц. Ця конструкція також дозволяє більш ефективно використовувати конструктивну інтерференцію для збільшення потужності сигналу в бажаних напрямках та деструктивну інтерференцію для придушення небажаних сигналів, що сприяє покращенню загальної ефективності та продуктивності антени.

Параметри налаштування, використані для оптимізації мережі живлення, включають розміри та розташування антенних елементів, довжину та ширину ліній передачі, а також точне узгодження імпедансу між антенами та живильною мережею. Ці параметри були ретельно налаштовані для досягнення максимальної ефективності та продуктивності антенної решітки, забезпечуючи

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стабільну роботу в широкому діапазоні частот і задовольняючи вимоги до сучасних бездротових комунікаційних систем.



а)

б)

Рисунок 3.6 – Антена решітка 2×1 :

а) – передня сторона; б) – задня сторона

Хоча один елемент має ширшу смугу характеристик, антенна решітка демонструє дводіпазонну поведінку, як показано на рисунку 3.7. Відповідно до критеріїв -10 дБ, антенна працює в двох частотних діапазонах, забезпечуючи смугу пропускання $1,71$ ГГц і $1,63$ ГГц. Це охоплює діапазони від 2 до $3,71$ ГГц та від $5,9$ до $7,54$ ГГц відповідно. Завдяки цьому дводіпазонному режиму роботи, антенна решітка може ефективно використовуватися для різноманітних застосувань у WiMAX та 5G, забезпечуючи високу продуктивність та стабільну роботу в зазначених частотних діапазонах.

Конструкція антенної решітки забезпечує не лише поліпшене підсилення та спрямованість, але й ширшу смугу пропускання, що робить її придатною для використання в сучасних бездротових комунікаційних системах. Ефективне узгодження імпедансу та оптимізація параметрів конструкції сприяють

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

досягненню високої ефективності випромінювання та стабільної роботи антени в умовах реального використання.

Крім того, антенна решітка демонструє низький коефіцієнт кореляції огинаючої (ЕСС) та мінімальну втрату пропускну здатності каналу (ССL), що забезпечує надійну передачу даних та високу якість зв'язку. Це робить її ідеальним вибором для інтеграції в сучасні мобільні пристрої та інші комунікаційні системи, що вимагають високої продуктивності та надійності роботи в широкому діапазоні частот.

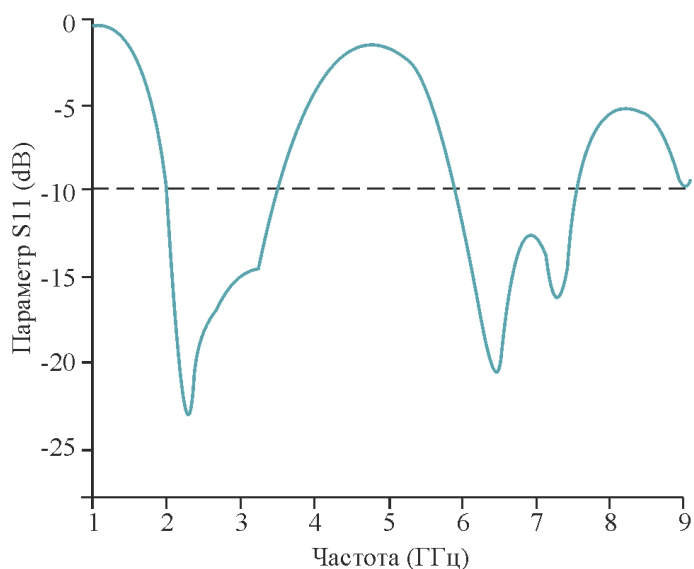
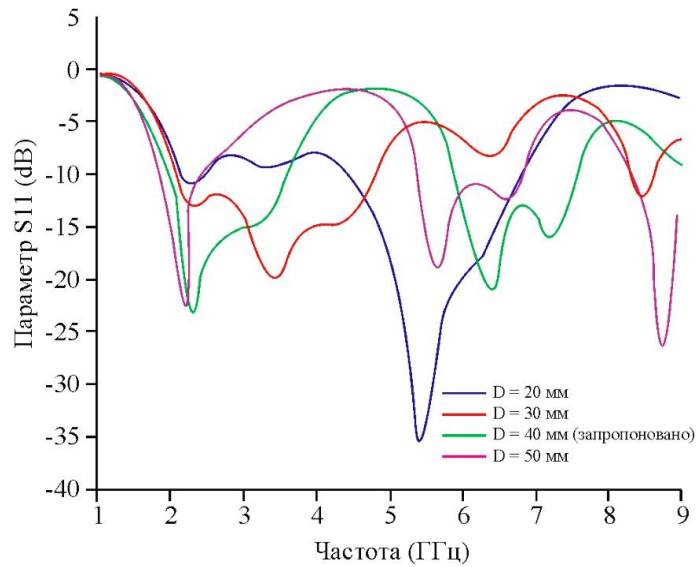
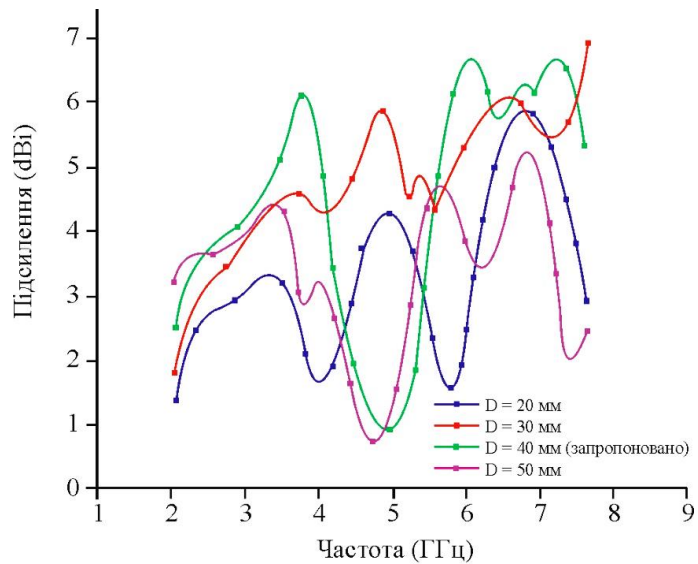


Рисунок 3.7 – Змодельований коефіцієнт відбиття (S11) антенної решітки

Відстань між елементами в антенній решітці є вирішальним фактором, що впливає на її дводіпазонну поведінку, як показано в аналізі на рисунку 3.8. В ході дослідження систематично змінювали відстань (D) між елементами від 20 мм до 50 мм, щоб оптимізувати продуктивність антени в діапазонах WiMAX (2,5 ГГц), 5G нижче 6 ГГц (n78) і 5G нижче 7 ГГц (n96).



а)



б)

Рисунок 3.8 – Вплив інтервалу на:

а) – коефіцієнт відбиття (S_{11}); б) – підсилення

Аналіз показав, що зміна відстані між елементами впливає на взаємодію антен, що може покращити або погіршити їхні характеристики, такі як коефіцієнт посилення, смуга пропускання та ізоляція. Оптимальна відстань між елементами дозволяє досягти найкращого компромісу між цими

характеристиками, забезпечуючи високу ефективність та стабільну роботу антенної решітки в зазначених діапазонах частот.

Виявлено, що при певній відстані між елементами антенна решітка демонструє максимальне підсилення та широку смугу пропускання, що охоплює всі задані діапазони частот. Крім того, оптимальна відстань сприяє зниженню коефіцієнта кореляції огинаючої (ЕСС) та втрат пропускну здатності каналу (ССЛ), що є важливими показниками для покращення якості зв'язку та передачі даних.

Таким чином, регулювання відстані між елементами є ключовим аспектом у процесі проектування антенних решіток для досягнення високої продуктивності та надійної роботи в широкому діапазоні частот, що підтверджується результатами аналізу, представленими на рисунку 3.8.

При менших значеннях відстані між елементами антенної решітки, наприклад, при $D = 20$ мм, спостерігалось обмежене покриття та погіршення продуктивності в бажаних діапазонах частот. Це явище можна пояснити сильним взаємним зв'язком між сусідніми антенними елементами, який впливає на їх імпеданс та характеристики випромінювання. Внаслідок цього обмеження антена не може ефективно резонувати в призначених частотних діапазонах.

Менша відстань між елементами спричиняє значний перехід енергії між сусідніми антенними структурами, що в свою чергу призводить до підвищення взаємної кореляції огинаючої (ЕСС). Це може призвести до зниження імпедансу антени та збільшення втрат пропускну здатності каналу (ССЛ), що відображається на зменшенні її ефективності в передачі сигналу в заданих діапазонах частот.

Оптимальна відстань між елементами, як показано в попередніх дослідженнях, є критичним фактором для досягнення найкращих характеристик антенної решітки, зокрема високого посилення, широкої смуги пропускання та

					КПТР.220890.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

низької ЕСС. Врахування цього аспекту в процесі проектування дозволяє забезпечити оптимальну продуктивність та ефективність антени в усіх необхідних діапазонах частот.

Збільшення відстані між елементами антенної решітки до значення $D = 40$ мм виявилось критичним для покращення її продуктивності. На цьому конкретному інтервалі вдалося охопити призначені діапазони WiMAX і 5G New Radio (NR) n78 і n96. Оптимальна відстань сприяла значному покращенню ізоляції між антенними елементами, що знизило взаємний зв'язок і дозволило досягти незалежних характеристик випромінювання в кожному частотному діапазоні. Це призвело до покращення резонансу і підсилення сигналів у бажаних частотних діапазонах, що забезпечило надійну роботу в діапазонах WiMAX і 5G, як показано на рисунку 3.8 а,б.

У діапазоні частот від 5,9 ГГц до 7,5 ГГц звичайно спостерігаються вищі втрати на шляху вільного простору порівняно з нижчими частотами. Вибір відстані $D = 40$ мм відповідає приблизно 1λ на найвищій частоті 7,5 ГГц, що мінімізує утворення пелюсток решітки у верхній частині діапазону (5,9–7,5 ГГц) для конфігурації масиву. Довжини хвиль у цьому діапазоні близькі до 1λ на частоті 7,5 ГГц, що сприяє підвищенню підсилення антенної системи завдяки фактору решітки.

Загалом, середнє покращення підсилення на рівні 3 дБі було досягнуто для обох робочих діапазонів, з піковим значенням підсилення 6,47 дБі, що збігається з теоретичними прогнозами [18]. Такий підхід підтверджує важливість оптимальної відстані між елементами для досягнення високої ефективності і ефективної роботи антенної решітки в різних радіочастотних середовищах.

Продовження збільшення відстані між елементами антенної решітки до значення $D = 50$ мм призвело до втрати загального покриття запланованих радіочастотних діапазонів, зокрема WiMAX і 5G New Radio (NR) n78 і n96. Це

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

було пов'язано з тим, що зменшення взаємного зв'язку між елементами, яке відбувається при збільшенні відстані, призводило до зниження здатності антени ефективно резонувати в обох діапазонах. Це в свою чергу призвело до зменшення підсилення сигналу та неадекватного покриття в цих частотних діапазонах.

Оптимальна відстань між елементами решітки визначає баланс між зменшенням взаємного впливу і збереженням ефективності антени для роботи в потрібних радіочастотних діапазонах. При занадто великій відстані елементи вже не взаємодіють достатньо ефективно, що обмежує їх здатність досягати оптимального резонансу і підсилення. Таким чином, збереження оптимальної відстані між елементами є ключовим аспектом для забезпечення найкращої продуктивності антенної решітки в різних радіочастотних умовах.

3.3 Конфігурація MIMO

Технологія MIMO є важливою для покращення систем зв'язку, оскільки вона спрямована на збільшення якості зв'язку, мінімізацію впливу багатопроменевого завмирання і підвищення спектральної ефективності [19]. Ця технологія дозволяє одночасно використовувати кілька антенних елементів для передачі та отримання сигналів, що сприяє збільшенню пропускної здатності каналу та підвищенню надійності зв'язку. Вона особливо корисна в умовах високої залежності від місцевості та обмеженого спектру частот, де ефективне управління радіочастотними ресурсами є критичним аспектом для оптимальної експлуатації мережі.

У цьому розділі розглядається розширення антенної решітки розміром 2×1 до двопортової антени MIMO з розмірами 126×63 мм². Початково дві антени були розроблені послідовно зі спільною частковою заземленою площею розміром 109×27 мм², що показано на рисунку 3.9а. Як показано на

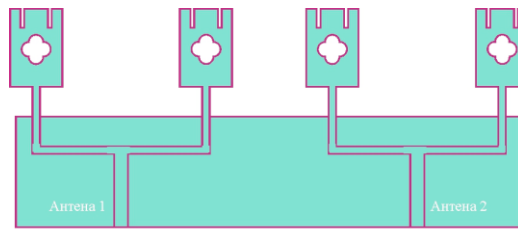
					КПТР.220890.01.03	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рисунку 3.10, ізоляція між портами досягла 7 дБ в бажаних діапазонах, що суттєво нижче необхідного значення 15 дБ для оптимальної роботи антени МІМО. Для підвищення ізоляції в середній частині заземленої поверхні був введений прямокутний проріз, зображений на рисунку 8б. Це додаткове втручання покращило ізоляцію з 7 дБ до 20 дБ, як показано на рисунку 3.10.

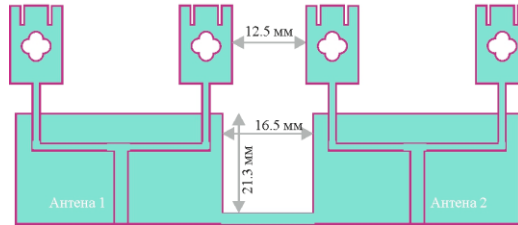
Наявність прямокутної щілини в антені змінила розподіл електромагнітних полів і змінила електромагнітний зв'язок між її елементами, впливаючи на шляхи струму на заземленій поверхні [20]. Ця модифікація спричинила зменшення взаємного зв'язку і перешкод, що в результаті підвищило рівень ізоляції між антенними портами. Для детальнішого розуміння впливу була використана повністю відокремлена структура заземлення, яка дозволила дослідити її вплив на ізоляцію, як показано на рисунку 3.9в. На рисунку 3.10 чітко видно, що розділені заземлені площини призвели до зниження рівня ізоляції як у нижніх, так і у верхніх частотних діапазонах порівняно з конфігурацією часткової щілинної заземленою площиною. Для поліпшення ізоляції на заземленій площині була використана прямокутна щілина розміром $16,5 \times 21,3 \text{ мм}^2$.

Ширина і довжина прямокутного слота були ретельно оптимізовані для підвищення ізоляції антени при збереженні її двопортового режиму. Враховуючи необхідність наявності площини заземлення під лініями передачі 75 Ом, які живлять антени, ширина цієї площини була обрана вдвічі більшою за ширину ліній з боків, залишаючи проміжки порожніми між ними. Виявлено, що загальна площина заземлення сприяє зниженню рівня ізоляції між антенними портами порівняно з використанням окремої заземленої площини. Для досягнення максимальної ефективності глибина прорізу (21,3 мм) була зроблена якомога глибшою, щоб забезпечити достатню ізоляцію, не втрачаючи загальної електричної площини заземлення.

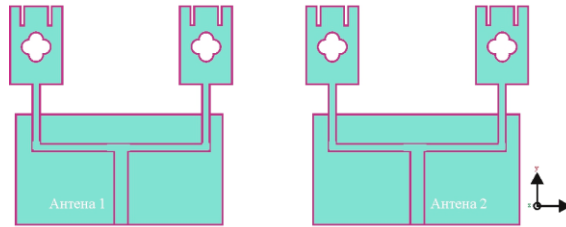
					КПТР.220890.01.03	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)



в)

Рисунок 3.9 – Конструкція двоелементної антени МІМО:

а) – часткова загальна площина заземлення; б) – часткова щілинна загальна площина заземлення (запропонована); в) – частково відокремлена заземлена

ПЛОЩИНА

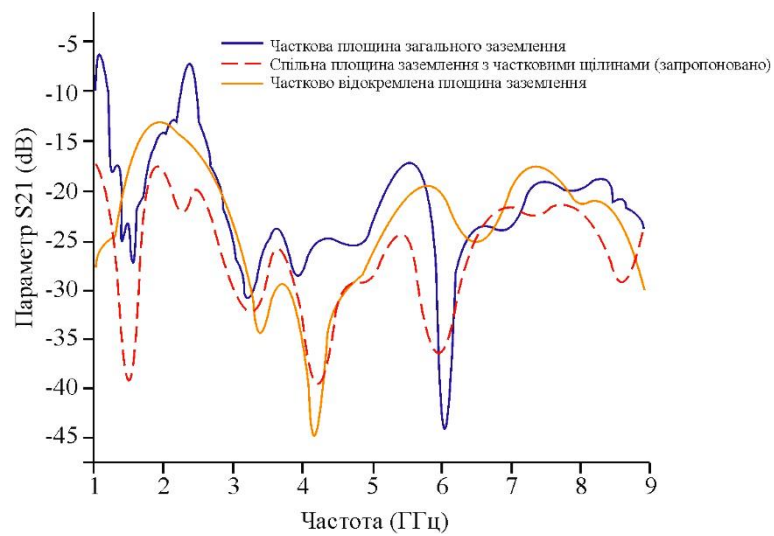


Рисунок 3.10 – Варіації S21 відносно площини заземлення

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

3.4 Висновок до третього розділу

У цьому розділі розглянуто процес проектування та моделювання антенних решіток МІМО для використання в системах WiMAX. Спочатку було проаналізовано конфігурацію однієї антени, де детально описані її характеристики та параметри. Наступний підрозділ присвячений конфігурації антенних решіток, що дозволяють підвищити продуктивність за рахунок збільшення пропускної здатності та покращення якості сигналу. Нарешті, розглянуто конфігурації МІМО, які забезпечують значне покращення ізоляції між антенами та оптимізацію ефективності роботи систем WiMAX. Проведені дослідження та моделювання демонструють ефективність запропонованих конфігурацій та їх потенціал для впровадження в реальні системи зв'язку.

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						51
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВОДІАПАЗОННОЇ МОНОПОЛЬНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ МІМО

4.1 S-параметри

На рисунку 4.1 представлені змодельовані S-параметри антени МІМО. Запропонована антена МІМО працює у двох частотних діапазонах: від 2,1 до 3,6 ГГц і від 5,9 до 7,4 ГГц, що охоплюють три основні діапазони: 2,5 ГГц (2,3–2,7 ГГц), n78 (3,3–3,6 ГГц) і n96 (5,925–7,1 ГГц).

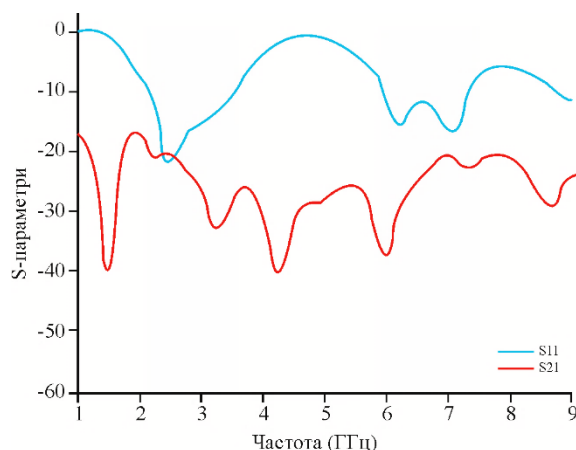


Рисунок 4.1 – S-параметри запропонованої антени МІМО

Антена була спеціально розроблена для додатків WiMAX, а також для частотних діапазонів нижче 6 ГГц і нижче 7 ГГц. Однією з ключових характеристик запропонованої антени є забезпечення покращеної ізоляції понад 20 дБ між її портами в робочих частотних діапазонах. Результати моделювання показують високий ступінь узгодженості, підтверджуючи ефективність антени та її відповідність проектним специфікаціям.

3.2 Радіаційні характеристики

На рисунку 4.2 представлені показники підсилення та ефективності випромінювання запропонованої антени МІМО на різних частотах. Антена МІМО демонструє пікове підсилення 7,5 дБі, при цьому максимальна ефективність випромінювання становить 99%, а загальна ефективність – 96%. Вимірювання підсилення антени виконувалися методом порівняння, де коефіцієнт підсилення антени порівнювався з коефіцієнтом підсилення еталонної антени з відомими характеристиками. Як еталонна антена використовувалася широкосмугова логоперіодична антена з коефіцієнтом підсилення близько 5–6 дБі у відповідному частотному діапазоні. Кожну з МІМО-антен, а також антену, розміщено по черзі вздовж поперечного напрямку рупорної антени, а підсилення запропонованої антени визначали на основі різниці в показаннях S21 (дБ) на VNA.

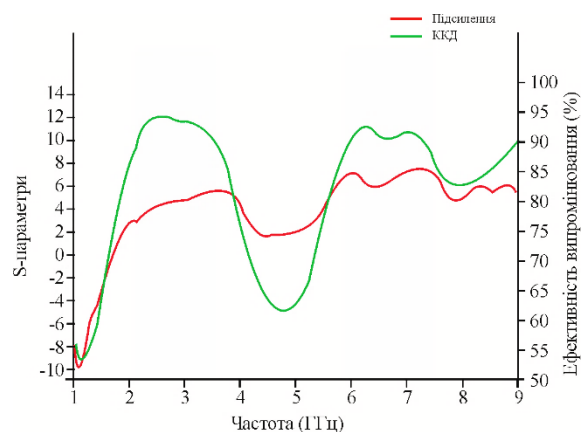


Рисунок 4.2 – Зміни підсилення та ефективності антени МІМО залежно від частоти

Тривимірні (3D) діаграми спрямованості антени МІМО на частотах 2,5 ГГц та 6,2 ГГц наведені на рисунку 4.3, а двовимірні (2D) діаграми спрямованості наведені на рисунках 4.4 та 4.5. Згідно з цими діаграмами, антена демонструє

більш спрямовані характеристики на частоті 6,2 ГГц порівняно з майже всеспрямованими характеристиками на частоті 2,5 ГГц. Це можна пояснити тим, що на вищих частотах антена має більше підсилення, що призводить до більш спрямованого випромінювання.

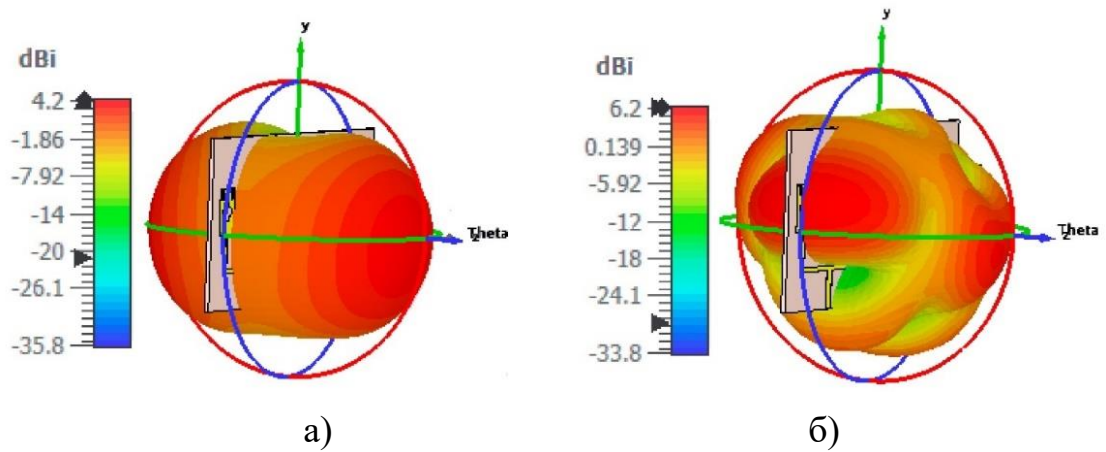


Рисунок 4.3 – 3D діаграма спрямованості:
а) на частоті 2,5 ГГц; б) на частоті 6,2 ГГц

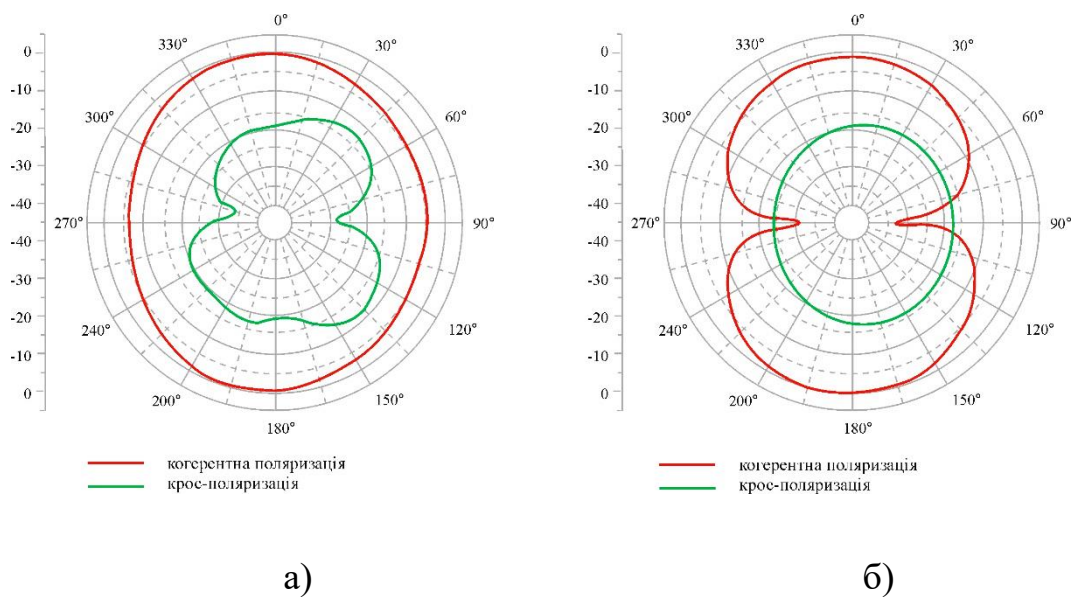


Рисунок 4.4 – Змодельовані діаграми спрямованості для площини XZ та YZ на частоті 2,5 ГГц

а) для площини XZ (площини H) на частоті 2,5 ГГц
б) для YZ-площини (E-площини) на частоті 2,5 ГГц

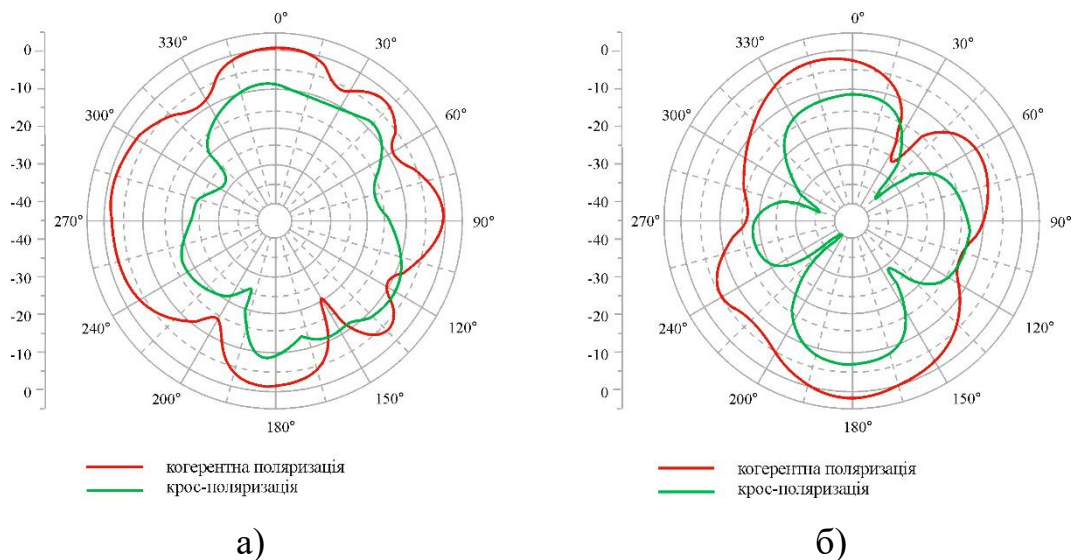


Рисунок 4.5 – Змодельовані діаграми спрямованості для площини XZ та YZ на частоті 6,2 ГГц
 в) для площини XZ (площини Н) на частоті 6,2 ГГц
 г) для YZ-площини (Е-площини) на частоті 6,2 ГГц

4.2 Коефіцієнт кореляції огинаючої

Одним з ключових параметрів, що визначають ступінь ізоляції антен одна від одної, є коефіцієнт кореляції огинаючої (ЕСС) [21]. Низькі значення ЕСС свідчать про меншу кореляцію між елементами антени та кращу ізоляцію [22]. Значення ЕСС 0,5 або нижче вважаються оптимальними для забезпечення високої продуктивності системи [23]. Для розрахунку ЕСС можна використовувати рівняння (4.1) і (4.2), які виражають коефіцієнт кореляції огинаючої через S-параметри та діаграми спрямованості дальнього поля відповідно.

Коефіцієнт кореляції огинаючої є критично важливим показником в системах з множинним входом і виходом (МІМО), де його низькі значення забезпечують ефективну роботу антени без значних втрат потужності. У сучасних бездротових системах зв'язку, таких як 5G і WiMAX, забезпечення низького коефіцієнта кореляції огинаючої є необхідною умовою для підвищення пропускної здатності та зменшення взаємних завад між антенами. Це, у свою

чергу, сприяє поліпшенню загальної якості зв'язку і спектральної ефективності, що є особливо важливим в умовах зростаючого попиту на високошвидкісні та надійні бездротові з'єднання.

$$ECC_s = \frac{|S_{ii} \cdot S_{ij} + S_{ji} \cdot S_{jj}|^2}{(1 - |S_{ii}|^2 - |S_{ij}|^2)(1 - |S_{ji}|^2 - |S_{jj}|^2)} \quad (4.1)$$

$$ECC = \frac{\left| \iint_{4\pi} [R_i(\theta, \varphi) \cdot R_j(\theta, \varphi)] d\Omega \right|^2}{\iint_{4\pi} |R_i(\theta, \varphi)|^2 d\Omega \iint_{4\pi} |R_j(\theta, \varphi)|^2 d\Omega} \quad (4.2)$$

Коефіцієнт відбиття позначається як S_{ii} , тоді як коефіцієнт пропускання позначається як S_{ij} . Тривимірні діаграми спрямованості i -ї та j -ї антен представлені як $R_i(\theta, \varphi)$ та $R_j(\theta, \varphi)$ відповідно, де Ω позначає тілесний кут. Як показано на рисунку 4.6, змодельований коефіцієнт кореляції огинаючої антени МІМО виявився надзвичайно низьким, менше 0,0002 у бажаних діапазонах. Такий низький рівень коефіцієнта кореляції огинаючої свідчить про мінімальну кореляцію між сигналами, що приймаються різними елементами антени, що, в свою чергу, сприяє підвищенню швидкості передачі даних та покращеній спектральній ефективності.

Надзвичайно низькі значення коефіцієнта кореляції огинаючої є ознакою ефективної роботи антени в системах МІМО, що забезпечує якісну передачу сигналу з мінімальними втратами. Це дозволяє системам зв'язку підтримувати високі показники продуктивності, необхідні для сучасних бездротових технологій, таких як 5G і WiMAX. Мінімальна кореляція між сигналами різних антен дозволяє уникнути інтерференції, забезпечуючи тим самим стабільну та надійну передачу даних. Завдяки таким характеристикам антени МІМО можуть забезпечувати більш високу пропускну здатність і підвищену ефективність використання спектра, що є ключовими вимогами для забезпечення високоякісних послуг зв'язку в умовах зростаючого попиту.

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

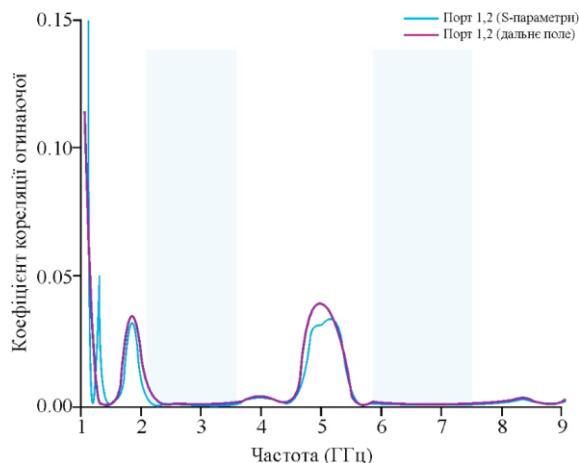


Рисунок 4.6 – Змодельовані значення коефіцієнта кореляції огибаючої запропонованої антени МІМО

4.3 Підсилення рознесеності

Параметр підсилення рознесеності (DG) визначає, наскільки ефективно впровадження додаткових антен в системах МІМО знижує втрати або погіршення передачі сигналу, які можуть виникнути через фактори, такі як завмирання, перешкоди та згасання в бездротових мережах. Параметр підсилення рознесеності дозволяє оцінити, як додавання антен сприяє поліпшенню якості та надійності зв'язку. Розрахунок цього параметра можна виконати за допомогою рівняння (4.3).

Високі значення DG свідчать про ефективне подолання зазначених факторів, що забезпечує стабільнішу та надійнішу передачу сигналів, особливо в умовах складних радіочастотних середовищ. Це робить параметр підсилення рознесеності важливим інструментом для аналізу продуктивності антенних систем МІМО, що сприяє оптимізації їхньої роботи та підвищенню ефективності використання спектра.

$$DG = 10\sqrt{1 - |ECC_s|^2} . \quad (4.3)$$

Досягнуте підсилення рознесеності перевищує 9,991 дБ, що наближається до оптимального значення в 10 дБ, як наведено на рисунку 4.7. Це свідчить про високу ефективність антенної системи МІМО у зменшенні втрат і погіршень передачі, спричинених такими факторами, як завмирання, перешкоди та згасання в бездротовому зв'язку.

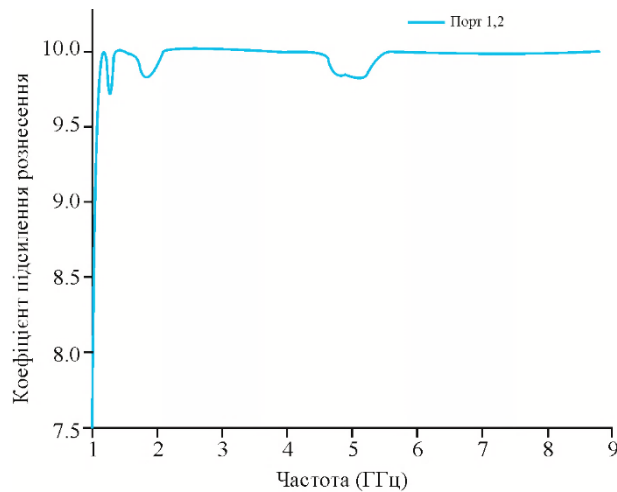


Рисунок 4.7 – Змодельований коефіцієнт підсилення рознесеності запропонованої антени МІМО

Високе значення DG вказує на те, що антени МІМО здатні забезпечити стабільну та надійну передачу сигналів, що є критичним для забезпечення високої якості обслуговування в сучасних бездротових мережах. Це досягнення підтверджує ефективність антенних рішень МІМО в оптимізації продуктивності систем зв'язку та підвищенні їх спектральної ефективності.

4.4 Втрата пропускної здатності каналу

Втрата пропускної здатності каналу (CCL) між елементами антени може виникати через кореляційні ефекти, що негативно впливають на продуктивність

системи [26]. Для оцінки цього впливу використовується рівняння (4.4), яке дозволяє розрахувати CCL:

$$CCL = -\log_2(1 - |S_{ii}|^2 - |S_{ij}|^2). \quad (4.4)$$

Це рівняння враховує кореляцію між елементами антени, дозволяючи кількісно оцінити, як кореляційні ефекти впливають на втрати пропускної здатності каналу. Розрахунок CCL є важливим для розуміння та мінімізації втрат пропускної здатності, що забезпечує покращену продуктивність систем MIMO, особливо в умовах високої щільності користувачів і інтенсивного трафіку.

На рисунку 4.8 показано, що в бажаних діапазонах частот змодельовані, значення втрати пропускної здатності каналу (CCL) становлять менше 0,1 біт/с/Гц, що значно нижче прийнятої межі в 0,5 біт/с/Гц [27]. Це свідчить про високу ефективність запропонованої антени MIMO в мінімізації кореляційних ефектів, що негативно впливають на продуктивність системи.

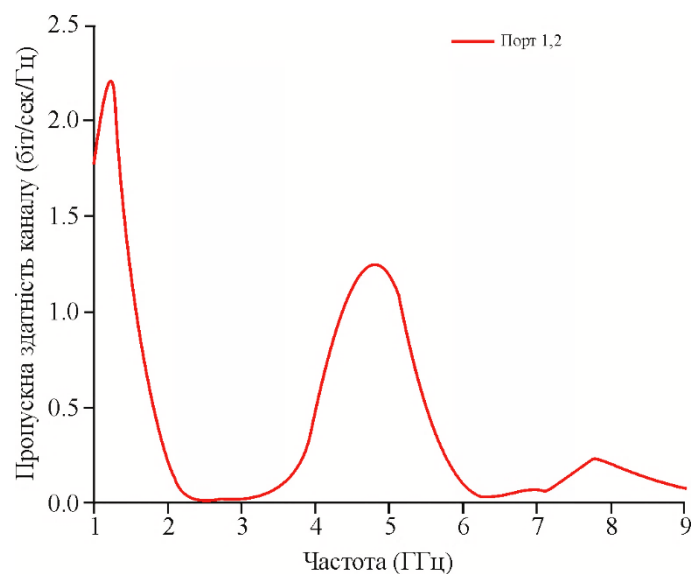


Рисунок 4.8 – Змодельована пропускна здатність каналу запропонованої антени MIMO

Низькі значення SCL забезпечують стабільну та високу пропускну здатність каналу, що є критично важливим для сучасних бездротових комунікацій, особливо в умовах високої щільності користувачів та інтенсивного трафіку. Такий рівень продуктивності підтверджує ефективність розробленої антени для використання в технологіях WiMAX і 5G, зокрема для діапазонів n78 і n96.

4.5 Загальний коефіцієнт активного відбиття

Повний коефіцієнт активного відбиття (TARC) є єдиним параметром, який застосовується для визначення непередбачуваних фазових зсувів між вхідними сигналами. TARC розраховується як квадратний корінь відношення загальної відбитої потужності до загальної падаючої потужності [28, 29]. Це співвідношення забезпечує оцінку того, наскільки ефективно система антени мінімізує відбиття, що виникає через фазові зсуви. Рівняння (4.5) можна використовувати для визначення TARC на основі S-параметрів, що дозволяє точно оцінити продуктивність антени в умовах реального світу. Низькі значення TARC вказують на ефективну роботу антени, зменшуючи втрати сигналу та покращуючи загальну якість зв'язку.

$$TARC = \frac{\sqrt{|S_{ii} + S_{ij}e^{j\theta}|^2 + |S_{ji} + S_{ii}e^{j\theta}|^2}}{\sqrt{2}}. \quad (4.5)$$

Для різних фаз збудження (θ), які варіюються від 0° до 180° з кроком 30° , були отримані значення повного коефіцієнта активного відбиття (TARC). Змодельовані значення TARC для бажаних діапазонів показані на рисунку 4.8 і складають менше ніж -10 дБ. Це свідчить про ефективність системи антен у мінімізації відбиття сигналів за різних умов експлуатації, що сприяє покращенню якості зв'язку та зменшенню втрат сигналу.

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

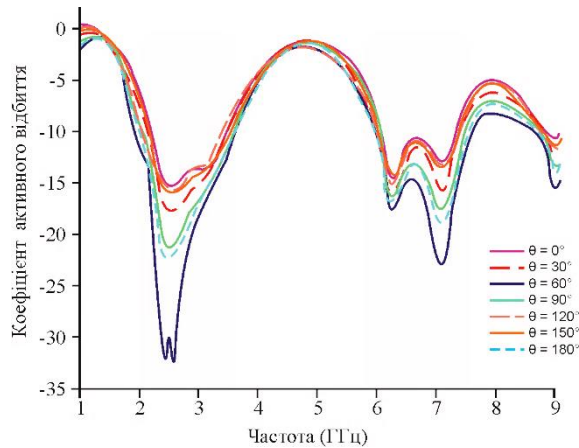


Рисунок 4.9 – Змодельовані результати TARC запропонованої антени MIMO

4.6 Середнє ефективне підсилення

Середнє ефективне підсилення (MEG) використовується для оцінки ефективності рознесення антен MIMO, показуючи, наскільки більше потужності може бути отримано у багатопробному середовищі порівняно з ізотропною антеною. MEG для запропонованої антени можна розрахувати за допомогою рівняння (4.6) [31], яке враховує взаємодію між різними елементами антени та їх взаємний вплив на розподіл потужності у просторі. Цей параметр дозволяє оцінити, наскільки ефективно антена використовує простір для покращення якості зв'язку і зниження втрат сигналу в складних радіочастотних умовах.

$$MEG_i = 0.5 \left[1 - \sum_{j=1}^M |S_{ji}| \right]. \quad (4.6)$$

Значення середнього ефективного підсилення (MEG) для системи MIMO можна розрахувати за допомогою наступних рівнянь [32], які використовуються для оцінки ефективності рознесення антен:

$$MEG_1 = 0.5[1 - |S_{11}|^2 - |S_{12}|^2]. \quad (4.7)$$

$$MEG_2 = 0.5[1 - |S_{21}|^2 - |S_{22}|^2]. \quad (4.8)$$

MEG₁: Цей параметр враховує взаємне вплив між антенами в системі MIMO і розраховується з використанням відповідної матриці S-параметрів і показників зв'язку між всіма антенними елементами.

MEG₂: Це друге значення MEG також розглядає ефективність рознесення, зокрема враховуючи усі аспекти взаємодії між антенами системи MIMO і їхнім впливом на потужність сигналу в середовищі з багатьма променями.

Обидва ці показники дозволяють отримати оцінку того, наскільки ефективно система MIMO використовує простір для покращення якості зв'язку та зменшення втрат сигналу.

Для досягнення покращеної продуктивності рознесеності в системі MIMO важливо, щоб значення середнього ефективного підсилення знаходилися в межах, які визначаються у відповідних дослідженнях і рекомендаціях [33]. Ці значення вказують на ефективність використання множини антен для зниження втрат сигналу, мінімізації взаємного впливу і підвищення швидкості передачі даних у бездротовому зв'язку.

Зазначені межі MEG відображають оптимальні умови для забезпечення низького рівня кореляції між сигналами, що отримуються різними антенними елементами, що в свою чергу сприяє збільшенню ефективності роботи системи MIMO.

$$-3 \leq MEG(\text{dB}) < -12. \quad (4.9)$$

Згідно з даними, представленими на рисунку 4.10, змодельовані значення середнього ефективного підсилення (MEG) варіюються від -6,2 дБ до -7 дБ у бажаних діапазонах частот. Ці значення вписуються в прийнятий діапазон, що

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідає рекомендаціям для покращення продуктивності рознесеності системи МІМО.

Отримані дані підтверджують, що запропонована система антен МІМО може ефективно використовуватися для зменшення втрат сигналу та максимізації швидкості передачі даних у бездротовому зв'язку.

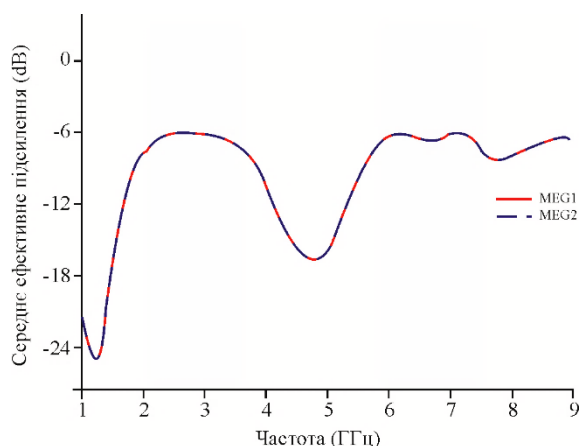


Рисунок 4.10 – Змодельовані результати MEG запропонованої антени МІМО

У рамках відомих досліджень здійснено порівняльний аналіз запропонованої дводіапазонної МІМО-антени з низкою відомих антен, описаних у попередніх роботах. Основними критеріями оцінювання були смуга пропускання, габаритні розміри, коефіцієнт кореляції огинаючої (ЕСС), мінімальна ізоляція між елементами антени та пікове підсилення.

Результати аналізу показали, що запропонована антена вигідно відрізняється від більшості аналогів. Зокрема, вона має значно ширшу смугу пропускання – від 2.1 до 3.6 ГГц та від 5.9 до 7.4 ГГц, що перевищує діапазони багатьох антен, наведених у літературі. Водночас, навіть при менших габаритах у порівнянні з деякими антенами (наприклад, з роботою [10]), запропонована конструкція демонструє вищі значення ізоляції між елементами (понад 20 дБ) та

набагато нижчий коефіцієнт ЕСС (0.0002), що свідчить про кращу роботу в режимі МІМО.

Хоча деякі раніше запропоновані антени мали дещо вищі значення пікового підсилення, запропонована антена забезпечує оптимальний компроміс між розмірами, підсиленням, смугою пропускання та ізоляцією. У порівнянні з антенами з робіт [11] та [14], вона забезпечує аналогічне або краще підсилення, а також кращу ізоляцію та ефективність роботи в широкому частотному діапазоні.

Таким чином, отримані результати підтверджують, що запропонована дводіпазонна МІМО-антена є високоефективним рішенням для сучасних бездротових систем зв'язку, зокрема WiMAX і 5G, і має вагомні переваги над рядом існуючих конструкцій.

4.7 Висновок до четвертого розділу

У цьому розділі представлено детальний аналіз характеристик дводіпазонної монопольної антенної решітки МІМО. Спочатку розглянуто S-параметри, що дозволяють оцінити ефективність роботи антени в різних частотних діапазонах. Далі, проаналізовано коефіцієнт кореляції огинаючої, який визначає взаємний вплив антенних елементів. Підсилення рознесеності та втрата пропускну здатності каналу також були досліджені, що показує здатність антени забезпечувати надійний зв'язок і високу пропускну здатність. Загальний коефіцієнт активного відбиття та середнє ефективне підсилення оцінюють загальну продуктивність антенних решіток в системах МІМО. Отримані результати свідчать про високу ефективність і потенціал дводіпазонної монопольної антенної решітки МІМО для застосування у сучасних бездротових системах зв'язку, таких як WiMAX.

					КПТР.220890.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

ВИСНОВКИ

У даному кваліфікаційному проєкті виконано всебічне дослідження та моделювання дводіапазонного випромінювача, призначеного для використання у бездротових мережах стандарту WiMAX. У вступній частині роботи розглянуто еволюцію бездротових технологій зв'язку, особливості архітектури та принципів функціонування мереж WiMAX, а також їх порівняння з іншими широкосмуговими бездротовими технологіями, зокрема Wi-Fi і системами 5G.

Особливу увагу приділено аналізу існуючих конструкцій антен для WiMAX-додатків, зокрема антен типу PIFA, а також рішень із множинними елементами для MIMO-систем. Проведено огляд типових конфігурацій, таких як чотириелементні, шестиелементні та восьмиелементні антени, що забезпечують широку смугу пропускання, високе підсилення та належну ізоляцію між каналами.

Основну частину проєкту присвячено розробці і моделюванню інноваційної дводіапазонної антени для систем WiMAX. Запропоновано конструкцію прямокутного випромінювача з прорізом у формі стилізованої троянди та додатковими прямокутними слотами. Така конфігурація забезпечує широкосмугову роботу у двох частотних діапазонах: від 2 до 3,71 ГГц (смуга 1,71 ГГц) і від 5,9 до 7,54 ГГц (смуга 1,63 ГГц), що повністю охоплює частотні ресурси систем WiMAX.

У моделюванні досліджено характеристики основного випромінювача та двоелементної антенної решітки. Розроблений дводіапазонний випромінювач досягає пікового підсилення до 7,5 дБі, високої ефективності випромінювання (понад 99%) та ізоляції понад 20 дБ, що є достатнім для забезпечення якісної передачі даних у WiMAX-мережах навіть за умов багатопробного поширення сигналу.

Результати проєкту підтверджують ефективність запропонованого дводіапазонного рішення для систем WiMAX, що забезпечує: широкосмугове

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

покриття; високий коефіцієнт підсилення; стабільну ізоляцію між антенними елементами; можливість ефективної інтеграції в багатоканальні бездротові пристрої.

Таким чином, запропонований випромінювач демонструє високу перспективність для застосування у сучасних телекомунікаційних системах, сприяє підвищенню продуктивності WiMAX-мереж і може бути основою для подальших наукових досліджень та технічних розробок у галузі бездротових технологій.

					КПТР.220890.01.03	Арк.
						66
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ковальчук В. П. «Проектування ширококугових антен для бездротових систем зв'язку». // Вісник НТУУ «КПІ», 2023.
2. Іваненко О. М. «Моделювання MIMO-антен для систем WiMAX». // Телекомунікації та радіотехніка, 2022.
3. Петренко С. І. «Аналіз ефективності дводіапазонних антен у системах зв'язку». // Радіоелектроніка та інформатика, 2021.
4. Сидоренко Л. В. «Використання дефектної заземлюючої структури в антенах для WiMAX». // Наукові записки Університету, 2020.
5. Мельник Т. А. «Розробка антен з високою ізоляцією для MIMO-систем». // Вісник Харківського національного університету, 2019.
6. Гриценко О. П. «Оптимізація параметрів антен для бездротових мереж». // Журнал радіоелектроніки, 2018.
7. Дмитренко І. С. «Сучасні тенденції в проектуванні антен для систем WiMAX». // Технічні науки, 2017.
8. Кравченко Н. І. «Дослідження ширококугових антен для мобільних систем зв'язку». // Вісник технічного університету, 2016.
9. Литвиненко В. М. «Моделювання антенних решіток для бездротових мереж». // Радіотехніка та електроніка, 2015.
10. Олійник Ю. В. «Розробка антен з високим коефіцієнтом підсилення для систем WiMAX». // Наукові праці університету, 2014.
11. J. G. Andrews, A. Ghosh, R. Muhamed, Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking, Chapter 2, Prentice Hall, 2007.
12. M. Chiani, M. Z. Win, and A. Zanella. On the capacity of spatially correlated MIMO Rayleigh-fading channels. IEEE Transactions on Information Theory, 49(10):2363–2371, October 2003
13. R. Blum. MIMO capacity with interference. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 21(5):793–801, June 2003

					КПТР.220890.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

14. S. A. M. Ilyas, WiMAX Applications. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007.
15. Fixed Wireless, Wikipedia, the free encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Fixed_wireless.
16. Intel, (2004), “Broadband Wireless: The New Era in Communications”, INTEL White Paper.
17. Odinma, A. C. and Oborkhale, L. I., (2006), “Advances in Broadband Wireless Network Technologies”, NSE, Electrical Div., International Conference Proceedings.
18. Feature Topics on Mobile WiMAX, (27 January, 2008): A Technology Update, IEEE Communications Magazine. International Journal of Electrical and Electronic Engineering, Volume 2, Number1, 2010. 165
19. Rappaport, T. S., Annamalai, A., Buehrer, R. M., Tranter, W. H.; “Wireless Communications: Past Events and Future Perspectives”, IEEE Communications Society, www.comsoc.org/livepubs/cil/public/anniv/rappa.html.
20. Eldad, P.; (July, 2008), “IEEE 802.11n Development: History, Process, and Technology”, IEEE Communications Magazine, pp 48 – 55.
21. Kurose, J. and Ross, K.; (2005), “Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet”, Addison Wesley Publication, New Jersey.
22. Niyato, D. and Hossain, E.; (May, 2007), “Integration of WiMAX and WiFi: Optimal Pricing for Bandwidth Sharing”, IEEE Communications Magazine, Vol. 45, No. 5, pp 140-146.
23. Frenzel, L.; (February 23, 2006), “The WiMAX Wait is Over”; ProQuest Electronic Design.
24. Rohde & Schwarz; “Introduction to MIMO Systems”, WiMAX Application Note 1MA102, <http://www.rohde-schwarz.com>.
25. Fong, B., Ansari, N., Fong, A., Hong, G., and Rapajai, C.; (2003), “On Scalability of Fixed Broadband Wireless Access Network Deployment”, IEEE Radio Communications.

26. Li, B., Qin, Y., Low, C. P., and Gwee, C. L.; (December, 2007), “A Survey on Mobile WiMAX”, IEEE Communications Magazine, Vol. 45, No. 12, pp. 70 – 75.
27. Sauter, M.; (September, 2006), “Communication Systems for the Mobile Information Society”, John Wiley publication.
28. Webb, W.; (September, 2001), “Broadband Fixed Wireless Access as a Key Component of the Future Integrated Communications Environment” IEEE Communications, pp1-9.
29. Eastwood, L., Migaldi, S., Xie, Q., and Gupta, V.; (April, 2008), “Mobility Using IEEE 802.21 in a Heterogeneous IEEE 802.16/802.11 – Based, IMT – Advanced (4G) Network”, IEEE Wireless Communications, pp 26 – 34.
30. Committee on Evolution of Untethered Communications, of Computer Science and Telecommunications Board, Commission on Physical Science, Mathematics, and Applications, & National Research Council, The Evolution Untethered Communications, National Academy Press, (1997), ISBN 0-309-05946-1
31. Odinma, A.; (2006), “Whither Mobile Communication and Impacting Technology”, IEC, Vol.50.
32. WiMAX Forum website, www.wimaxforum.org; (Sept. 2007), “Deployment of Mobile WiMAX Networks by Operators with Existing 2G and 3G Networks”, Mobile WiMAX, pp 27 – 31.
33. Ren, Z.; Zhao, A. Dual-Band MIMO Antenna with Compact Self-Decoupled Antenna Pairs for 5G Mobile Applications. IEEE Access 2019, 7, 82288–82296.
34. Chattha, H.T. 4-Port 2-Element MIMO Antenna for 5G Portable Applications. IEEE Access 2019, 7, 96516–96520.
35. Zheng, Z.; Ntawangaheza, J.D.; Sun, L. Wideband MIMO Antenna System for Sub-6 GHz Cell Phone. In Proceedings of the 2021 International Conference on Electronics, Circuits and Information Engineering (ECIE), Zhengzhou, China, 22–24 January 2021; pp. 1–5.

36. Ye, Y.; Zhao, X.; Wang, J. Compact High-Isolated MIMO Antenna Module with Chip Capacitive Decoupler for 5G Mobile Terminals. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2022, 21, 928–932.

37. Al-Bawri, S.; Islam, M.; Singh, M.; Alyan, E.; Jusoh, M.; Sabapathy, T.; Padmanathan, S.; Hossain, K. Broadband Sub-6GHz Slot-Based MIMO Antenna for 5G NR Bands Mobile Applications. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021, 1962, 12038.

38. Addepalli, T.; Kumar, M.S.; Jetti, C.R.; Gollamudi, N.K.; Kumar, B.K.; Kulkarni, J. Fractal Loaded, Novel, and Compact Two- and Eight-Element High Diversity MIMO Antenna for 5G Sub-6 GHz (N77/N78 and N79) and WLAN Applications, Verified with TCM Analysis. *Electronics* 2023, 12, 952.

39. Institute of Electrical and Electronics Engineers, ‘Draft IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems: Improved Coexistence Mechanisms for License-Exempt Operation (Amendment to IEEE 802.16d-2004)’, IEEE P802.16h/D7, 2008.

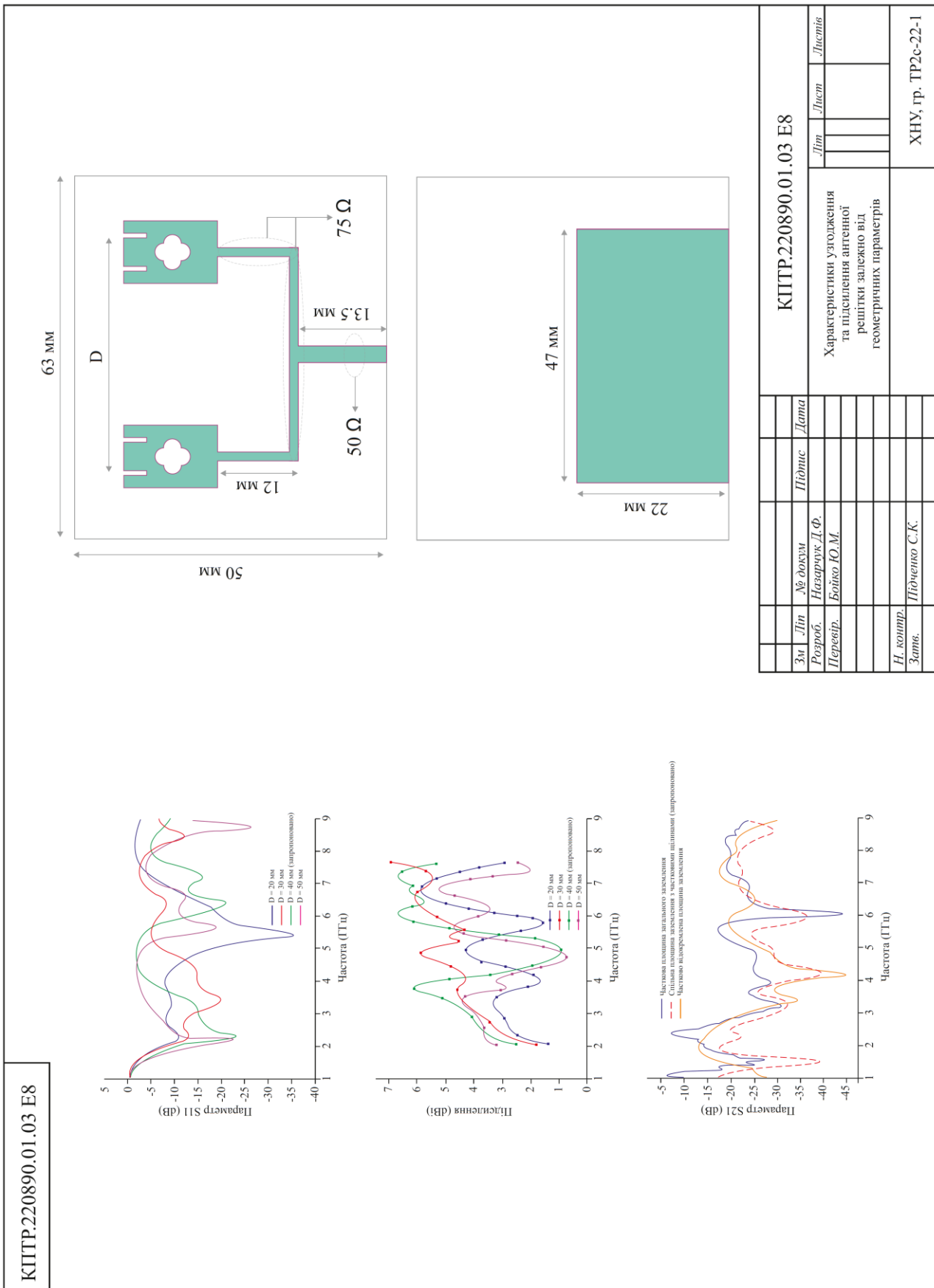
40. G. S. V. Rhada K. Rao and G. Radhamani, *WiMAX – A Wireless Technology Revolution*. Boca Raton, FL: Auerbach, 2007.

					КПІТР.220890.01.03	Арк.
						70
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ДОДАТКИ

Додаток Б

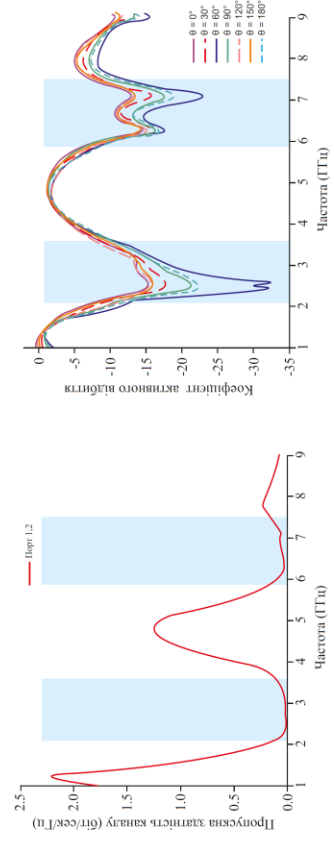
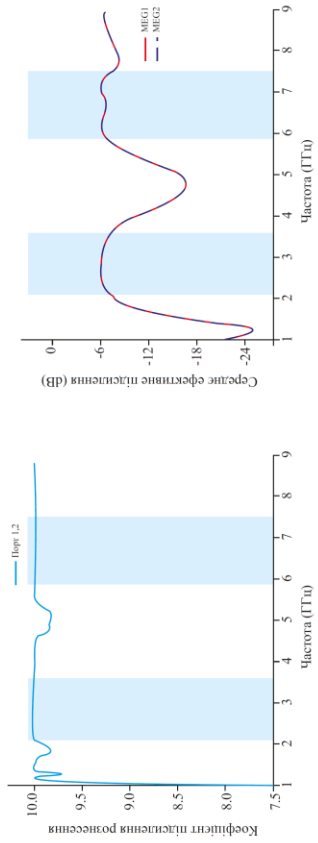
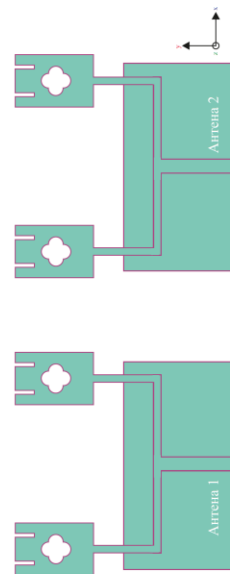
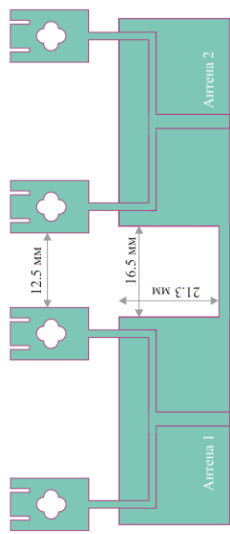
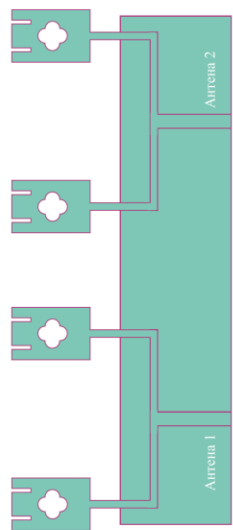
Характеристики узгодження та підсилення антенної решітки



Додаток В

Конструкція та параметри взаємодії елементів двоелементної МІМО-антени

КПТР.220890.01.03 E8



Зм.		Лист		Лист		Лист	
№ докум.	Дата	№ докум.	Дата	№ докум.	Дата	№ докум.	Дата
Назарчук Д.Ф.							
Бойко Ю.М.							
Підченко С.К.							
Затв.							

КПТР.220890.01.03 E8

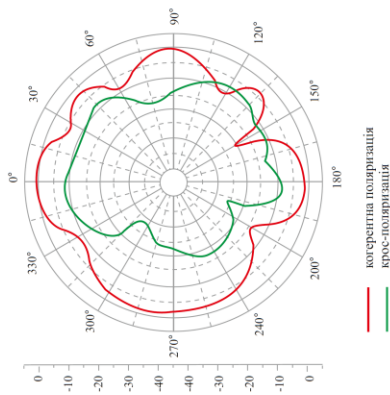
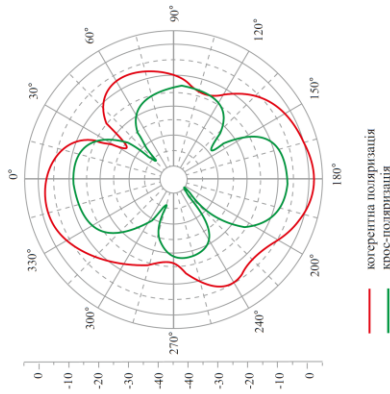
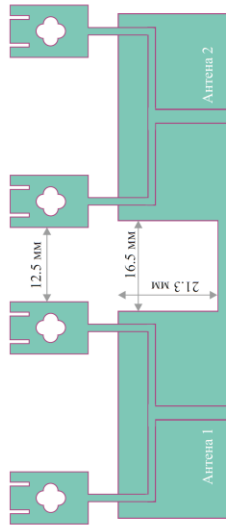
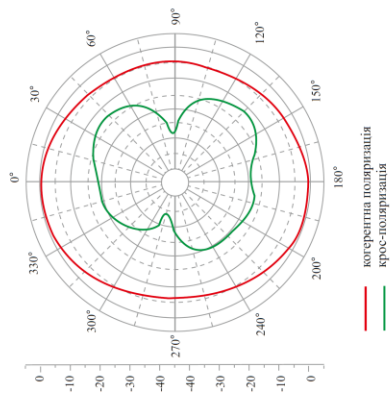
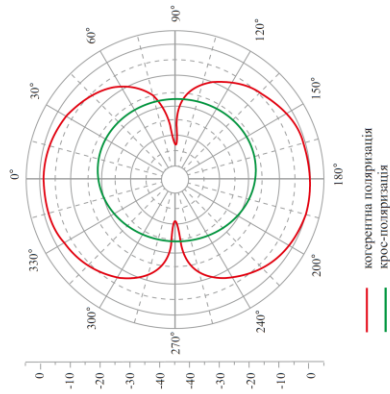
Конструкція та параметри взаємодії елементів двоелементної МІМО-антени

ХНУ, гр. ТР2с-22-1

Додаток Г

Комплексна характеристика МІМО-антени в діапазонах WiMAX

КІПТР.220890.01.03 Е8

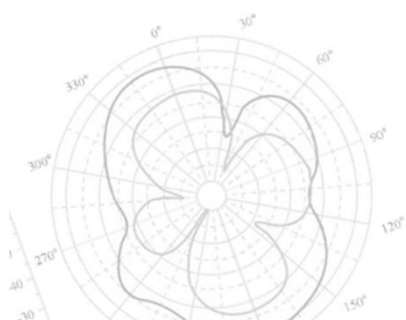


КІПТР.220890.01.03 Е8			
№ докум.	Підпис	Лист	Листів
Розроб. Назарчук Д.Ф.			
Перевір. Бойко Ю.М.			
Н. контр. Підченко С.К.			
Затв.			
Комплексна характеристика МІМО-антени в діапазонах WiMAX			ХНУ, гр. ТР2с-22-1

КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЄКТ

ФАКУЛЬТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

Дводіапазонний випромінювач WiMAX систем



Виконав:
здобувач курсу, група TP2c-22-1
Назарчук Денис Федорович

Науковий керівник:
д-р техн. наук, професор
Бойко Юлія Миколайович

Кафедра
телекомунікацій,
медійних та
інтелектуальних
технологій

2

МЕТА:

удосконалення конструкції дводіапазонного випромінювача для забезпечення ефективної роботи WiMAX систем

ОБ'ЄКТ:

дводіапазонний випромінювач

ПРЕДМЕТ:

Структура та електричні характеристики дводіапазонного випромінювача

Актуальність

→ **ЗАСТОСУВАННЯ** кількох антен для передавання і приймання сигналів

WiMAX, 5G (частоти <6 ГГц і вище)

ПЕРЕВАГИ:

- Просторове мультиплексування → збільшення пропускної здатності
- Покращення якості сигналу при багатопроменевому поширенні
- Зниження втрат потужності
- Вища ефективність використання спектра



MIMO

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

⚠ Вимоги до антен:

- Висока ізоляція між елементами
- Низький рівень взаємних перешкод
- Оптимізована структура випромінювання

Слайд 3

Аналіз досліджень та публікацій

🔍 Фокус сучасних досліджень MIMO-систем для WiMAX/5G:

- Висока **ізоляція** між елементами (>15–20 дБ)
- **Широка смуга** пропускання (2–3,71 ГГц / 5,9–7,54 ГГц)
- **Високе підсилення** (до 7,5 дБі)
- **Ефективність випромінювання** >99%
- Низький **ЕСС** (< 0,0002)

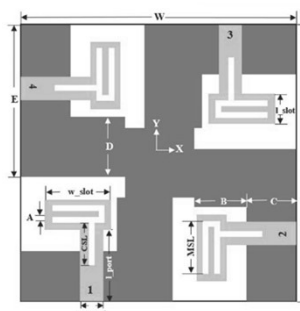
Використовуються:

- Монопольні, PIFA, слот-антени
- Технології DGS, ємнісне роз'єднання
- Оптимізація геометрії антенних масивів

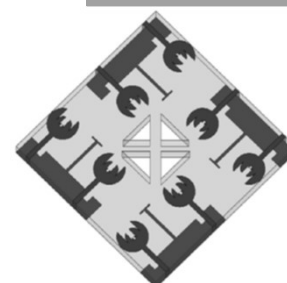
Конструкції:



4-портової двоелементної антени



4-портової двоелементної антени для мобільних телефонів



8-елементної антени MIMO

Слайд 4

Конфігурація дводіпазонного випромінювача

✦ Тип решітки:

- Лінійна антенна решітка 2×1 на основі монопольних антен
- Передбачено **живильну мережу** на базі T-з'єднання

Результати:

- **Підсилення зросло** завдяки конструктивній інтерференції
- **Смуга пропускання:**
 - 2–3.71 ГГц (СП = 1.71 ГГц)
 - 5.9–7.54 ГГц (СП = 1.63 ГГц)
- **Низький ЕСС і ССЛ** — придатність для МІМО
- **Стабільна робота** в широкому діапазоні частот

✦ **Мета:** Підвищити підсилення та спрямованість випромінювача для застосування в WiMAX/5G-системах

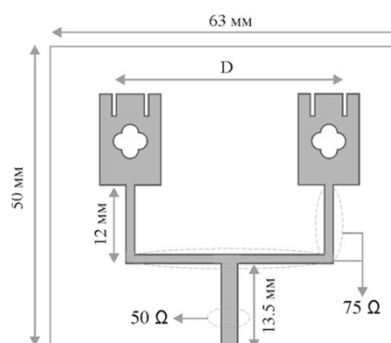


Рис. 1 Дводіпазонний випромінювач 2×1

Слайд 5

Основні характеристики дводіпазонного випромінювача

Коефіцієнт відбиття (S_{11})

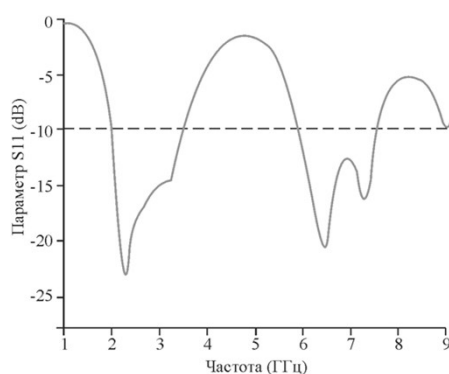


Рис. 2 – Змодельований коефіцієнт відбиття (S_{11})

✦ Дводіпазонна поведінка:

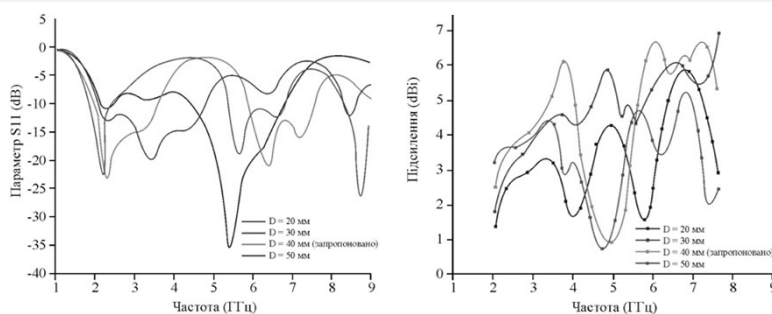
- Смуга пропускання:
1,71 ГГц та 1,63 ГГц
- Частотні діапазони:
2–3,71 ГГц і 5,9–7,54 ГГц
- Придатна для
WiMAX та 5G (n78, n96)

Слайд 6

Вплив інтервалу на: а) – коефіцієнт відбиття (S11); б) – підсилення

Основні характеристики дводіпазонного випромінювача

Вплив відстані між елементами



Оптимальний інтервал між елементами є ключовим для досягнення ефективної дводіпазонної роботи антенної решітки

Рис. 3 Вплив інтервалу на: а) – коефіцієнт відбиття (S11); б) – підсилення

◆ Досліджені інтервали: D = 20–50 мм

- Менші D → погіршення (взаємодія, зростання ЕСС, зниження імпедансу)
- Збільшення D → покращення розділення, ширша смуга, вища продуктивність

◆ Оптимальна відстань: D = 40 мм

- Найкращий компроміс
- Незалежне випромінювання в кожному діапазоні
- Покращена ізоляція, стабільні характеристики

Слайд 7

Конфігурація дводіпазонного випромінювача: ізоляція каналів

Рішення: модифікація заземлення



Рис. 4. Модифікації заземлювальної площини двоелементної МІМО-антени

Проблема:

- Початкова конфігурація: 2×1 МІМО
- Розміри: 109×27 мм²
- Ізоляція між каналами: лише 7 дБ - недостатньо

Прямокутна щілина: 16,5×21,3 мм

Розширено площу заземлення під лініями 75 Ом

Досягнуто покращеної ізоляції без втрати режиму МІМО

Слайд 8

Результати моделювання дводіапазонного випромінювача

Широкосмугова підтримка:
2,1–3,6 ГГц та 5,9–7,4 ГГц

Підходить для WiMAX та 5G

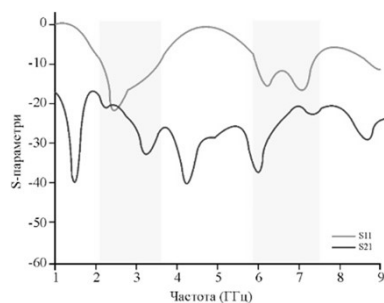


Рис. 5. Стабільні значення S-параметрів у робочому діапазоні

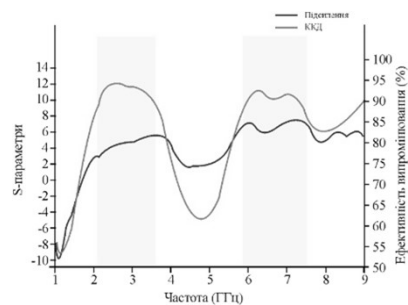


Рис. 6. Зміни підсилення та ефективності антени MIMO залежно від частоти

- Пікове підсилення: до 7,5 дБі
- Ефективність випромінювання: до 99%
- Загальна ефективність: 96%

Слайд 9

Діаграми спрямованості

Площини аналізу

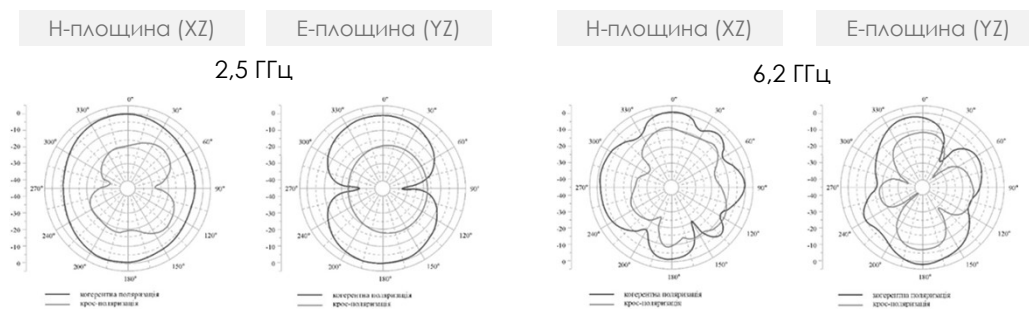


Рис. 7. Змодельовані ДС антени для площин H і E

Слайд 10

Ключові показники ізоляції та ефективності

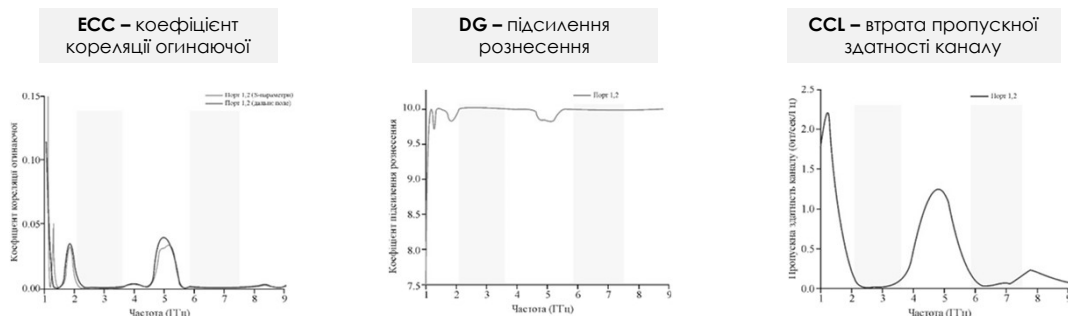


Рис. 8. Змодельовані значення ключових показників ефективності

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

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

$$CCL = -\log_2(1 - |S_{ii}|^2 - |S_{ij}|^2) \quad (3)$$

- Визначає кореляцію між антенними елементами
- **ECC < 0,0002** – майже повна незалежність каналів
- Підвищує **швидкість передачі та спектральну ефективність**

- Показує здатність компенсувати завмирання сигналу
- **DG > 9,991 дБ** – близько до максимуму (10 дБ)
- Підтверджує **стабільну та надійну передачу даних**

- Вимірює **CCL** через кореляцію
- **CCL < 0,1 біт/с/Гц** – значно нижче допустимого порогу (0,5)
- Забезпечує **високу пропускну здатність при високому навантаженні**

Слайд 11

Ключові показники ізоляції та ефективності

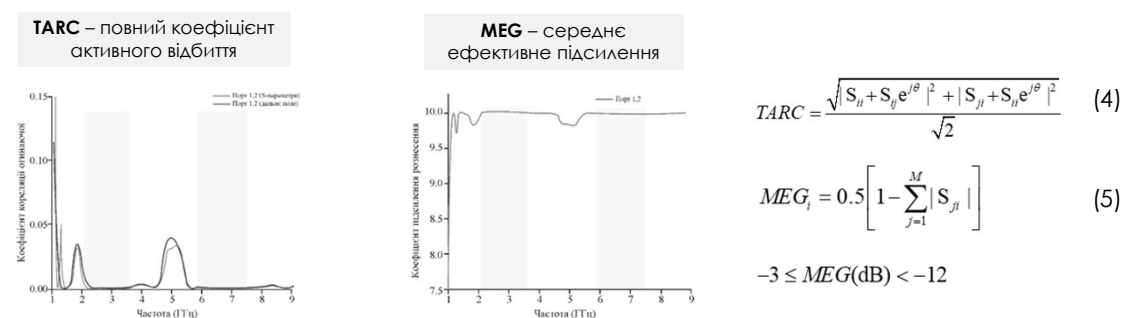


Рис. 9. Змодельовані значення ключових показників ефективності

$$TARC = \frac{\sqrt{|S_{ii} + S_{ij}e^{j\theta}|^2 + |S_{ji} + S_{jj}e^{j\theta}|^2}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

$$MEG_i = 0.5 \left[1 - \sum_{j=1}^M |S_{ji}| \right] \quad (5)$$

$$-3 \leq MEG(\text{dB}) < -12$$

- Оцінює фазові зсуви між входами
- Визначається як відношення відбитої до падаючої потужності
- **TARC < -10 дБ** для всіх фаз збудження (0°–180°, крок 30°)
- **Мінімізація відбиття сигналу** → покращення якості зв'язку

- Визначає ефективність використання багатопроменевого середовища
- Порівнює отриману потужність з ідеальним ізотропним джерелом
- **Робочі частоти:** 2,1–3,6 ГГц та 5,9–7,4 ГГц
- **MEG = -6,2...-7 дБ** у робочих діапазонах

Слайд 12

ВІДГУК

на кваліфікаційний проект
студента групи ТР2с-22-1 Назарчука Дениса
«Дводіапазонний випромінювач WiMAX систем»

Кваліфікаційний проект присвячено актуальній темі, що стосується розробки ефективних антенних систем для бездротових телекомунікацій. У процесі виконання роботи студент виявив достатній рівень теоретичної підготовки, самостійність, аналітичне мислення та вміння працювати з сучасними програмними засобами для моделювання антенних структур.

Проект має чітку структуру, містить глибокий аналіз сучасних технологій WiMAX та конфігурацій MIMO-антен, а також практичну частину, пов'язану з проектуванням і чисельним моделюванням дводіапазонної антенної решітки. У роботі відображено вміння студента застосовувати сучасні інженерні методи та інтерпретувати результати моделювання.

Зауваження носять несуттєвий характер і не знижують загального високого рівня виконання проекту. Робота відповідає вимогам до кваліфікаційних проектів і заслуговує на позитивну оцінку.

У процесі виконання кваліфікаційного проекту Назарчук Денис проявив креативність, ініціативність, старанність, наполегливість, здатність та вміння застосовувати набуті знання для вирішення складних завдань, обізнаність у сучасних системних та інформаційних технологіях.

Кваліфікаційний проект виконано на високому технічному рівні, має безперечну актуальність в області сучасних телекомунікацій, а студент Назарчук Денис заслуговує оцінки «відмінно».

Керівник:
д-р техн. наук, професор



Юлій БОЙКО

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

Дипломник: Назарчук Денис Федорович

Тема роботи: Двodiaazonний випромінювач WiMAX систем

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційного проекту

Кількість листів креслень 4 Кількість сторінок записки 69

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Кваліфікаційний проєкт присвячений розробці двodiaazonного випромінювача для систем WiMAX. Проведено аналіз сучасних бездротових технологій і конфігурацій антен MIMO. Спроектовано та змодельовано двodiaazonну MIMO-антенну решітку з покращеними характеристиками підсилення, ізоляції та узгодження. Визначено оптимальні геометричні параметри для ефективної роботи в обох діапазонах, що забезпечує надійну передачу даних у WiMAX-системах.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Каліфікаційний проєкт відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: Кваліфікаційний проєкт виконано з урахуванням сучасних досягнень у сфері бездротових телекомунікацій та антенного проектування. У першому розділі проведено аналіз широкосмугових технологій WiMAX та їх вимог до антенних систем, використано актуальні міжнародні стандарти. У другому розділі розглянуто сучасні конфігурації антен MIMO, включаючи підходи до підвищення ізоляції та ефективності. У третьому розділі застосовано сучасні САПР-системи (наприклад, CST, HFSS або аналогічні) для проектування та електромагнітного моделювання MIMO-антенної решітки. У роботі використано числові методи, такі як метод скінченних елементів та метод моментів. Останній розділ присвячено аналізу електромагнітних характеристик двodiaazonної антени, визначенню впливу геометрії на робочі параметри. Загалом, у проєкті використано передові методи чисельного аналізу, сучасне програмне забезпечення та новітні наукові підходи до оптимізації конструкції антен для бездротових систем нового покоління.

4. Позитивні сторони роботи: Робота присвячена актуальній темі удосконалення антенних систем для WiMAX-технологій. Вона відзначається глибоким аналізом сучасних рішень, грамотним застосуванням методів

електромагнітного моделювання та науковим підходом до оптимізації параметрів МІМО-антени

5. Негативні сторони роботи: Робота в цілому виконана на достатньо високому рівні, однак має деякі недоліки. Зокрема, потребує більш глибокого порівняльного аналізу з існуючими аналогами, а також можна було б детальніше обґрунтувати вибір геометричних параметрів антени.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає

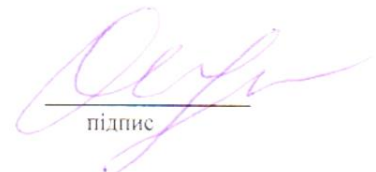
7. Відгук про роботу в цілому: В цілому кваліфікаційний проєкт виконаний якісно, логічно структурований, має наукову новизну та практичну значущість для розробки антенних пристроїв у системах бездротового зв'язку. Отримані результати можуть бути використані при створенні сучасних антен для технологій WiMAX та аналогічних телекомунікаційних систем.

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка дипломної роботи: Кваліфікаційний проєкт відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки відмінно (5.00/А), а її автору Назарчуку Денису, присвоєння кваліфікації бакалавра зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка»

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

« 6 » червня 2025р.


підпис

Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

The maximum coincidence with one document 2.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. Errors in the documents: 12%

ID: 242953 Title: Двудіапазонний випромінювач WIMAX систем Added in a DB: 2025-06-02 Authors: Назарчук Денис Федорович Heads: Боїко Юлій Миколайович Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	80848	1235	2129 (3%)	38 (3%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Денис НАЗАРЧУК (TR2c-22-1)

Співавтор:

Назва: Двodiaпазонний випромінювач WIMAX систем

Експерт:

Рибак Олександр Сергійович

Підрозділ: Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Коефіцієнт подібності 1:8.8%

Коефіцієнт подібності 2:3.9%

Мікропробіли: 0

Заміна букв: 3

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-06-03 02:20:35.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

Виявлені запозичення не кваліфікуються як плагіат, оскільки вони є цитатами з наукових праць, які використовуються для підтвердження тез у науковій роботі.

Дата

30.06.2025

експерт

[Підпис]

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

КАФЕДРИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОГО ПРОЕКТУ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційного проекту: Двodiaazonний випромінювач WIMAX систем

Автор: Назарчук Денис Федорович

Освітня програма Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Керівник кваліфікаційного проекту: д.т.н., професор Бойко Юлій Миколайович

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	-
1.2	Виявлені запозичення не є академічним 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.	відповідає
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	-
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	-
2	Інші види порушень академічної доброчесності	-

Підтвердження:

Виявленні запозичення не є плагіатом так як розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження (є власні терміни, визначення тощо), коефіцієнти подібності складають 8,8% та 3,9%, а також мають посилання на приведений список літературних джерел.

«06» червня 2025 р.

Завідувач кафедри ТМІТ

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційного проекту

Сергій ПІДЧЕНКО

Віктор СТЕЦЮК

Юлій БОЙКО