

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Бакалавр

Освітній рівень

Антенна решітка для підвищення ефективності  
технології 5G в міліметровому діапазоні хвиль

Назва теми

КвРТР.2021008.01.08 ПЗ

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Шифр і назва

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Шифр і назва

Освітня програма «Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології»

Назва

Виконав:

студент III курсу, група ТР1с-21-1

  
Підпис

Максим ТАРАН

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник:

  
Підпис, дата

Віталій НОРИК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер:

  
Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

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

  
Підпис

Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

«19» червня 2024р.

Хмельницький, 2024

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКИТтаР

 Валерій МАРТИНЮК

« 10 » січня 2024 р

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Тарану Максиму Романовичу

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

1 Тема роботи: Антенна решітка для підвищення ефективності технології 5G в міліметровому діапазоні хвиль

Керівник роботи: Норик Віталій Григорович, асистент

Затверджено наказом по університету від «15» лютого 2024р. №8


2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру 01 червня 2024 року

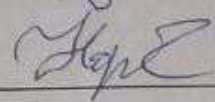
3 Вихідні дані до роботи: схема технологічного процесу, технічне завдання

4 Змет пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):  
еволюція антенних технологій у зв'язку з розвитком 5G та перспективами для 6G; аспекти технологій бездротового зв'язку в мережах 5G; аналіз дискретних лінійних масивів; конструкція та оптимізація антени для систем 5G у міліметровому діапазоні хвиль.





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

1. Конструкція та оптимізація антени для систем 5G у міліметровому діапазоні хвиль.
2. Коефіцієнти відбиття антени для систем 5G.
3. Змодельовані параметри антени для систем 5G.

Завдання отримав 

Керівник 

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7 Дата видачі завдання 10 січня 2024 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**


№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на кваліфікаційну роботу	10.01.2024р.	виконано
2.	Складання індивідуального плану на кваліфікаційну роботу	15.01.2024р.	виконано
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	10.02.2024р.	виконано
4.	Написання другого розділу	26.03.2024р.	виконано
5.	Написання третього розділу	15.04.2024р.	виконано
6.	Написання четвертого розділу	30.04.2024р.	виконано
7.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до кваліфікаційної роботи	10.05.2024р.	виконано
8.	Оформлення кваліфікаційної роботи	15.05.2024р.	виконано
9.	Рецензування кваліфікаційної роботи	20.05.2024р.	виконано
10.	Презентаційні матеріали за результатами виконання кваліфікаційної роботи	28.05.2024р.	виконано

Студент

  
\_\_\_\_\_  
(підпис, дата)

Максим ТАРАН

Науковий керівник

  
\_\_\_\_\_  
(підпис, дата)

Віталій НОРИК

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Антенна решітка для підвищення ефективності технології 5G в міліметровому діапазоні хвиль»

Автор роботи: Таран Максим Романович.

Керівник роботи: Норик Віталій Григорович, асистент.

Пояснювальна записка: 74 сторінок, 22 рисунки, 2 таблиці, 40 джерел.

Графічна частина: технічне креслення.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ДІАПАЗОН МІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЬ, СПРЯМОВАНІСТЬ СИГНАЛУ, ПІДСИЛЕННЯ СИГНАЛУ, ТЕХНОЛОГІЯ 5G, АНТЕНИ ДЛЯ 5G, ВИСОКОЧАСТОТНІ СИГНАЛИ, ІНТЕРНЕТ МАЙБУТНЬОГО, БЕЗДРОТОВИЙ ЗВ'ЯЗОК.

Об'єктом дослідження є компактна кільцева щілинна антенна решітка для роботи на частоті 28 ГГц в міліметровому діапазоні.

Метою кваліфікаційної роботи є вивчення та оцінка ефективності запропонованої антенної решітки з точки зору її ефективності, широкосмугових характеристик та подвійної променевої характеристики для можливого використання в сучасних бездротових системах зв'язку.

У даній кваліфікаційній роботі розглянуто компактну кільцеву щілинну антенну решітку нового типу, спеціально розроблену для роботи в міліметровому діапазоні хвиль на частоті 28 ГГц. Запропонована має високу ефективність та широкосмугову характеристику пропускання від 26 до 32 ГГц. Ця антенна решітка демонструє високе симульоване підсилення та подвійну променеву характеристику, що робить її привабливим варіантом для застосування в сучасних бездротових системах зв'язку. Результати симуляцій підтверджують ефективність запропонованого рішення.

01.06.2024 р.



## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	С.
ВСТУП .....	4
1 ЕВОЛЮЦІЯ АНТЕННИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ЗВ'ЯЗКУ З РОЗВИТКОМ 5G ТА ПЕРСПЕКТИВАМИ ДЛЯ 6G .....	5
1.1 Технологічні аспекти мобільного зв'язку 5G .....	7
1.2 Конструкція антени 5G .....	10
1.2.1 Співіснування зі стандартами попередніх поколінь .....	11
1.2.2 Вплив електромагнітних полів .....	14
1.3 Антени для бездротового зв'язку в діапазоні до 6 ГГц .....	15
1.4 Антенні рішення для мобільних пристроїв 5G .....	16
1.5 Напрямки розвитку комунікацій для 6G .....	20
1.6 Висновок до першого розділу .....	21
2 АСПЕКТИ ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗДРОВОГО ЗВ'ЯЗКУ В МЕРЕЖАХ 5G .....	23
2.1 Характеристики системи 5G .....	25
2.2 Діапазон частот для мережі локального багатоточкового розподілу .....	28
2.3 Висновок до другого розділу .....	32
3 АНАЛІЗ ДИСКРЕТНИХ ЛІНІЙНИХ МАСИВІВ .....	35
3.1 Принцип роботи антенних решіток .....	36
3.2 Класифікація типів антенних решіток .....	37
3.3 Роль антенної решітки .....	42
3.4 Характеристики лінійної антенної решітки .....	45
3.5 Висновок до третього розділу .....	55
4 КОНСТРУКЦІЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ АНТЕНИ ДЛЯ СИСТЕМ 5G У МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ ХВИЛЬ .....	57
4.1 Проектування простої та ефективної антени .....	60

КвРТР.2021008.01.08 ПЗ

Змі.	Арж.	Літ. док.им.	Підпис	Дата	Літ.	Арж.	Аркуші
Розроб.		Таран М.Р.		13.06.24			
Перевір.		Норик В.Г.		13.06.24		2	78
Р.схема				13.06.24	ХНУ, гр. ТР1с-21-1 Пояснювальна записка		
Н. Кошир.		Корещька Л.О.		13.06.24			
Зашифр.		Мартинюк В.В.		13.06.24			

Антенна решітка для підвищення ефективності технології 5G в міліметровому діапазоні хвиль.

4.1 Проектування простої та ефективної антени .....	58
4.2 Моделювання та аналіз результатів .....	64
4.3 Висновок до четвертого розділу .....	69
ВИСНОВКИ.....	70
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	72
ДОДАТОК А. Конструкція та оптимізація антени для систем 5G у міліметровому діапазоні хвиль .....	76
ДОДАТОК Б. Коефіцієнти відбиття антени для систем 5G .....	77
ДОДАТОК В. Змодельовані параметри антени для систем 5G .....	78

					КВРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AC	– Змінний струм (Alternating Current)
CCM	– Continuous Conduction Mode
DC	– Постійний струм (Direct Current)
DC-DC	– Постійний струм - Постійний струм
EMC	– Електромагнітна сумісність (Electromagnetic Compatibility)
Matlab	– Matrix Laboratory
MOSFET	– Метал-оксид-полісілікатний транзистор
PWM	– Широко-імпульсна модуляція
Simulink	– Пакет моделювання та симуляції
ЕМП	– Електромагнітні перешкоди
ККД	– Коефіцієнт корисної дії
ZCS	– комутації нульового струму

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

У сучасному світі зростає значення бездротових систем зв'язку, особливо в контексті розвитку мобільних технологій та швидкого інтернету. Одним із ключових етапів цього розвитку є технологія 5G, яка обіцяє революційні зміни в сфері бездротового зв'язку. Однак для досягнення повного потенціалу технології 5G необхідно мати високоефективні антенні системи, зокрема антенні решітки, призначені для роботи у міліметровому діапазоні хвиль.

Розвиток технології 5G є однією з найбільш важливих тенденцій у сучасному світі бездротового зв'язку. Застосування міліметрових хвиль для систем 5G відкриває нові перспективи у покращенні швидкості передачі даних та зниженні затримки. Проте, розвиток високоефективних антенних систем для цих мереж залишається актуальною проблемою, оскільки потребується оптимізація характеристик антен з урахуванням вимог міліметрового діапазону хвиль.

Технологія 5G відкриває нові можливості у бездротовому зв'язку, пропонуючи надзвичайно високу швидкість передачі даних і низьку затримку по всьому каналу зв'язку. Розділена на два основних діапазони – діапазон частот нижче 6 ГГц та міліметрові хвилі – технологія 5G має потенціал розширити можливості бездротового зв'язку на нові рівні.

Діапазон частот нижче 6 ГГц, хоч і забезпечує значний обсяг пропускної здатності, вже зазнає значного тиску від ростучого навантаження на мікрохвильові програми. Це призводить до появи міліметрових хвиль як другого виділеного спектру, який має необмежену пропускну здатність та є перспективним кандидатом для забезпечення широкої смуги пропускання, низької затримки та вищої пропускної здатності даних.

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Одним із головних викликів у впровадженні технології 5G є розробка високоефективних та потужних антенних систем, які забезпечать стабільний та ефективний зв'язок у міліметровому діапазоні хвиль. У цьому контексті кваліфікаційна робота спрямована на вивчення та оптимізацію антенних решіток для систем 5G у міліметровому діапазоні хвиль, зокрема на розробку антенних решіток з високим коефіцієнтом посилення та ефективною передачею сигналів.

Об'єктом дослідження даної кваліфікаційної роботи є компактна кільцева щілинна антенна решітка, спеціально розроблена для роботи на частоті 28 ГГц в міліметровому діапазоні. Метою даної роботи є вивчення та оцінка ефективності запропонованої антенної решітки з точки зору її ефективності, широкосмугових характеристик та подвійної променевої характеристики для можливого використання в сучасних бездротових системах зв'язку.

У рамках цієї кваліфікаційної роботи досліджено та проаналізовано компактну кільцеву щілинну антенну решітку, яка виявила високу ефективність та широкосмугові характеристики пропускання від 26 до 32 ГГц. Запропонована антенна решітка демонструє високе симульоване підсилення та подвійну променеву характеристику, що робить її привабливим варіантом для використання в сучасних бездротових системах зв'язку.

Результати цієї кваліфікаційної роботи можуть стати важливим внеском у розвиток технологій бездротового зв'язку, зокрема для прискорення впровадження технології 5G та покращення якості бездротових мереж у міліметровому діапазоні хвиль

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 ЕВОЛЮЦІЯ АНТЕННИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ЗВ'ЯЗКУ З РОЗВИТКОМ 5G ТА ПЕРСПЕКТИВАМИ ДЛЯ 6G

Антени відіграють ключову роль у системах зв'язку, визначаючи ефективність радіоінтерфейсу. З розвитком бездротових технологій від 1G до 6G зростає і складність вимог до антенних систем, які постійно еволюціонують, щоб відповідати потребам користувачів. У цьому розділі розглядається роль антен у системах 5G в діапазоні нижче 6 ГГц та у міліметровому діапазоні хвиль (mm-wave). Особлива увага приділяється таким аспектам, як антенні решітки, технологія MIMO, керування променем, метаповерхні та інші методи, які використовуються для забезпечення високошвидкісного зв'язку. Розглядаються технічні характеристики дизайну, напрямки досліджень, технології та проблеми, пов'язані з проектуванням, виготовленням і вимірюванням антен для майбутніх систем 6G у діапазоні ТГц.

Протягом багатьох років активно розроблялися стандарти бездротового та мобільного зв'язку, кожен з яких приніс нові технології та можливості для кінцевих користувачів. З 1980-х років починається розвиток бездротових мереж, який послідовно привів до виникнення нових поколінь мобільного зв'язку.

Від перших методів аналогової модуляції та частотно-роздільного доступу до каналів (FDMA – Frequency Division Multiple Access) в 1G до впровадження технологій 4G, таких як LTE (Long-Term Evolution) на базі IP, бездротові мережі досліджувались і розвивалися значно [2].

Незважаючи на досягнення 4G/LTE в швидкості передачі даних, швидко зростаюча кількість бездротових пристроїв та потреба в передачі великого обсягу даних, таких як потокове відео високої якості та Інтернет речей (IoT), призвели до розвитку стандартів п'ятого покоління (5G) для забезпечення більш швидкого та ефективного бездротового зв'язку.

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки всі послуги радіозв'язку працюють у мікрохвильовому діапазоні (300 МГц–3 ГГц), використання цього діапазону стало недостатнім для виконання зростаючих потреб у бездротовому зв'язку. Тому дослідники звертають увагу на не використаний спектр міліметрових хвиль (вище 30 ГГц), який може бути використаний для систем зв'язку та додатків 5G

Незважаючи на те, що великі країни активно впроваджують технологію 5G, постійне збільшення вимог до вищих швидкостей передачі даних та потреба в надзвичайно високих швидкостях зв'язку спричинили появу та розвиток технології бездротового зв'язку шостого покоління (6G).

Планується, що мережі 6G з'являться приблизно до 2030 року, і очікується, що до того часу кількість підключених пристроїв зросте до 500 мільярдів. Прогнозується, що 6G пропонуватиме надійний зв'язок з мінімальною затримкою, враховуючи при цьому розвиток мереж Інтернету речей, використання штучного інтелекту для бездротового зв'язку та покращення мобільного широкопasmового зв'язку [2].

Для відповіді на ці зростаючі вимоги системи зв'язку виходять за межі традиційних діапазонів частот і спрямовуються на вищі діапазони, зокрема на діапазони міліметрових хвиль та терагерц (ТГц). Обидва ці діапазони гратимуть важливу роль у розвитку бездротового зв'язку 6G.

Деякі з відомих застосувань бездротового зв'язку в діапазоні ТГц включають Інтернет речей наномасштабу (IoNT), системи моніторингу здоров'я, розважальні послуги, військові застосування, надшвидкісний зв'язок на чіпі, доповнену реальність та гетерогенні мережі.

Антенна є невід'ємною складовою будь-якої системи зв'язку, оскільки ефективність радіоінтерфейсу в значній мірі залежить від якості її конструкції. З розвитком бездротового зв'язку та зростанням можливостей мереж, наданих виробниками, спільнота антенних дизайнерів також зазнала значних

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8



## 1.1 Технологічні аспекти мобільного зв'язку 5G

Мобільний зв'язок вважається однією з ключових інновацій останніх десятиліть, оскільки він відіграє значну роль у соціальному та економічному розвитку країн. За останні роки в Україні спостерігається стрімкий ріст кількості підключених пристроїв, що призводить до значного збільшення обсягу передачі даних. Прогнозується, що кількість глобальних мобільних пристроїв зросте з 8,8 мільярда в 2023 році до 13,1 мільярда до 2025 року, що відповідає щорічному темпу зростання на рівні 8%. Цей очікуваний приріст у підключених пристроях, а також збільшення попиту на послуги з більшою доданою вартістю, такі як віртуальна реальність, відео надвисокої чіткості, хмарні послуги та інші, підштовхнули промисловість до розробки мереж 5G. Мережі 5G мають забезпечувати 1000-кратне збільшення ємності порівняно з 4G, щоб задовольнити зростаючі вимоги до швидкості передачі даних.

Специфікації системи, які були розроблені Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU) для 5G, відображають настанови щодо відповідності вимогам споживачів [8]. Системи зв'язку 5G мають забезпечувати високу швидкість передачі даних, наприклад, до 10 Гбіт/с, здатність забезпечувати мобільність при швидкості до 500 км/год, спектральну ефективність на рівні близько 10 біт/с/Гц, що на порядок перевищує показники 4G, а також економічність у 10 разів в порівнянні з попередніми технологіями. Крім того, 5G має забезпечувати зниження затримки до менше ніж 1 мс. Окрім цього, однією з ключових характеристик 5G є можливість масового підключення пристроїв шляхом одночасного з'єднання великої кількості пристроїв до Інтернету речей (ІоТ).

На Всесвітній конференції радіозв'язку ITU 2019 були офіційно виділені діапазони для розвитку технології 5G. Ці діапазони включають низькі частоти,

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

такі як 700 МГц, а також діапазони нижче 6 ГГц, зокрема 3,3-4,2 ГГц і 4,4-5 ГГц. Однак для підвищення пропускної здатності та швидкості передачі даних в системах мобільного та бездротового зв'язку розглядається використання вищих частот. Такі смуги включають діапазон міліметрових хвиль, зокрема 26 ГГц, 28 ГГц, 37 ГГц, 39 ГГц, 47 ГГц і 60 ГГц. Передбачається, що на майбутній Всесвітній радіоконференції ІТУ у 2025 році можуть бути затверджені додаткові ідентифікації ІМТ в різних діапазонах між 3,3 ГГц і 10,5 ГГц для розвитку 5G.

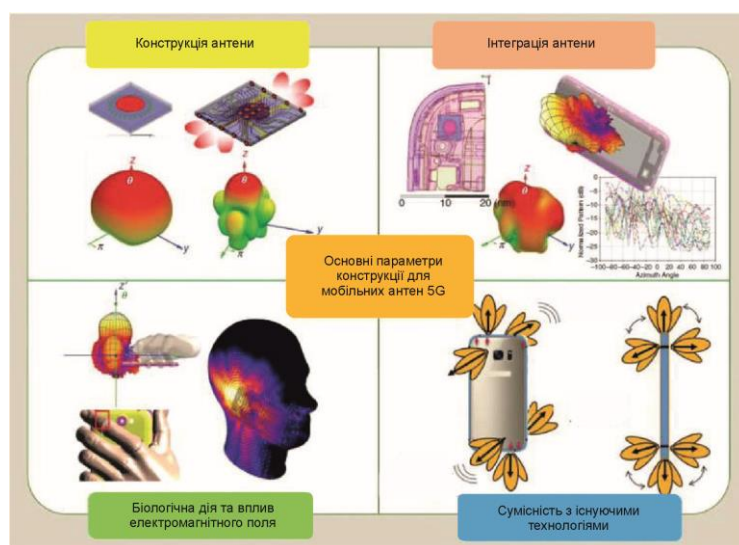
## 1.2 Конструкція антени 5G

Завдяки значному технологічному прогресу в таких параметрах, як надійність, ємність, доступність та затримка, стандарт мобільного зв'язку 5G стає важливим фокусом для регуляторних органів, таких як Європейський інститут стандартів телекомунікацій (ETSI) та 3rd Generation Partnership Project (3GPP) [9]. Ці організації встановлюють специфікації та вимоги до антен для систем 5G, що потребує ідентифікації та розробки нових технологій мобільних антен. Основні аспекти, які потрібно розглянути при розробці мобільних антен для 5G, проілюстровані на рисунку 1.2.

Швидкий розвиток систем мобільного зв'язку до стандарту 5G ставить перед виробниками антен вимогу створення багатодіапазонних і широкосмугових моделей для забезпечення сумісності, розширення зони покриття і зниження складності системи. Антени для мобільного зв'язку 5G мають бути компактними, особливо на високих частотах міліметрових хвиль, і водночас відповідати вимогам щодо пропускної здатності та ефективності випромінювання. Оскільки спектр міліметрових хвиль стикається зі збільшеними втратами через атмосферне поглинання та ослаблення на великих частотах, антени 5G мають мати велике посилення з високою напрямленістю для компенсації цих втрат. Додатково, проблема невідповідності орієнтації та

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

розташування мобільних пристроїв на мікрохвильових та міліметрових частотах робить напрямок комунікації неочевидним. Тому для зменшення втрат, поліпшення просторового покриття і отримання високої напрямленості антенні решітки та антени з керованим променем є важливими засобами зв'язку 5G. Технологія MIMO також є ключовим елементом для вдосконалення пропускної здатності і зони покриття в системах 5G, дозволяючи досягти значно більшої пропускної здатності порівняно з попередніми стандартами 4G/LTE



Рисунка 1.2 – Конструкція антени для мобільних пристроїв 5G

У міліметровому хвильовому діапазоні спостерігаються вищі втрати через провідність та діелектричні втрати порівняно з мікрохвильовим діапазоном. В мікрохвильовому спектрі радіочастотна інтегральна схема, антена та мікросхеми модема розглядаються як окремі структурні блоки, а система радіозв'язку об'єднується в один блок, відомий як багатокристальний модуль. Такий підхід дозволяє досягти горизонтальної інтеграції, що сприяє зменшенню розміру мікросхеми. Проте ця конфігурація може обмежити застосування в стільникових та інших бездротових пристроях, оскільки тенденція до зменшення розміру пристроїв стає все важливішою. Оскільки антена повинна бути пов'язана з

електронною схемою, імпеданс на інтерфейсі схеми антени має бути узгоджений для забезпечення максимальної передачі потужності між компонентами. Для цього часто використовуються стандартні з'єднувальні елементи, такі як коаксіальні кабелі, С-затискачі та радіочастотні перемикачі з опором 50 Ом.

Проте, на частотах міліметрових хвиль характеристики ослаблення сигналу компонентів RFIC радикально погіршуються, що призводить до погіршення коефіцієнта шуму. Крім того, на відміну від поточних мобільних антен, антени для систем 5G міліметрових хвиль, по суті, мають бути розміщені в безпосередній близькості до RFIC пристроїв. Таким чином, для мобільних антен систем 5G міліметрових хвиль виникає необхідність у високоінтегрованих та компактних схемах упаковки антен, які можна розділити на дві основні групи: антени в корпусі (AiP) і антени на кристалі (AoC).

У випадку «антен в корпусі» (AiP – Antenna in Package), використовуються вбудовані та прямі з'єднання, що сприяє зменшенню бічних розмірів антенного модуля для міліметрового діапазону. Однак на вищих частотах інтеграція цих технологій ускладнюється через високі втрати між з'єднаннями. З іншого боку, AiP демонструє переваги для гетерогенних схем проектування та інтеграції, оскільки вона дозволяє використовувати різноманітні підкладки і методи виготовлення.

З розвитком технологій схема "Антенa на кристалі" (AoC – Antenna on Chip) привернула значну увагу, оскільки вона забезпечує інтеграцію радіочастотного переднього кінця та цифрової базової смуги на одному чіпі. Ця інтеграція антени та схеми дозволяє зменшити потребу у використанні узгоджувальних мереж. Вбудована методологія також знижує втрати між з'єднаннями, оскільки металеві з'єднання безпосередньо підключають мікросхему до точки живлення антени. Крім того, це спрощує конструкцію за рахунок мінімізації використання компонентів, що дозволяє економити простір

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

і знижувати витрати. У мм-хвильовому діапазоні розмір антени залишається дуже малим, до кількох міліметрів, тому реалізація на кристалі є найбільш прийнятною для таких високих частот. З іншого боку, для антен на чіпі виникають ряд проблем, таких як обмеження компонування через правила щільності металізації, низькі коефіцієнти підсилення антени через втрати в кремнієвих підкладках і проблеми визначення характеристик пластини. Для того, щоб подолати ці перешкоди та створити належне радіочастотне рішення на чіпі, проводяться масштабні дослідження.

### 1.2.1 Співіснування зі стандартами попередніх поколінь

На шляху технологічної еволюції відбувається перехід від мікрохвильового зв'язку до міліметрового зв'язку 5G. З існуючими технологіями, такими як 3G/4G/Wi-Fi і 5G у діапазоні нижче 6 ГГц, буде співіснувати 5G мм-хвиль. Це призвело до необхідності розробки антен для мобільних пристроїв зі зворотною сумісністю.

Очікується, що 5G буде продовжувати свій розвиток, наприклад, як 5G+, аналогічно до того, як LTE перейшов у LTE-Advanced. Таким чином, крім зворотної сумісності, також важливо реалізувати інтегровані антени прямої сумісності.

На рисунку 1.3 показано очікуване розташування різних антен, які підтримують різні стандарти бездротового зв'язку, у смартфоні. Це включає антени для 3G, 4G, Wi-Fi, а також міліметрових хвиль 5G. На даному етапі ключовою задачею є розробка антен, які забезпечують оптимальну ефективність та зворотну сумісність з різними стандартами, забезпечуючи при цьому мінімальний вплив на розміри та функціональність пристрою.

Незважаючи на те, що інтегровані антенні рішення є необхідними, розробка таких інтегрованих антенних модулів є викликом для мікрохвильових

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

інженерів [10]. Вони повинні враховувати різні технічні вимоги, такі як широкосмуговість, ефективність, компактність та здатність працювати в різних частотних діапазонах, щоб забезпечити оптимальну продуктивність та функціональність пристрою в умовах швидко змінюючогося середовища бездротового зв'язку.

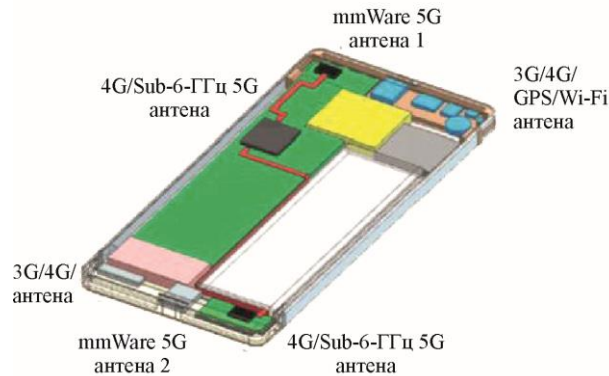


Рисунок 1.3 – Мобільний смартфон з підтримкою технології 5G

### 1.2.2 Вплив електромагнітних полів

Нормативні органи, такі як Федеральна комісія зі зв'язку (FCC) і Міжнародна комісія з неіонізуючого випромінювання, встановили ряд правил та стандартів з безпеки людини в контексті електромагнітного випромінювання. Ці стандарти обов'язкові для бездротових пристроїв, які повинні відповідати вимогам щодо безпеки. Одними з ключових параметрів для оцінки впливу електромагнітних хвиль на людину є питомий коефіцієнт поглинання (SAR – Specific Absorption Rate) і щільність потужності (PD – Power Density). Щільність потужності вказує на кількість енергії, яка передається до тканини. Оскільки тіло людини є провідником і поглинає енергію, це може суттєво впливати на ефективність роботи мобільної антени, якщо вона перешкоджає потоку випромінювання. При цьому передбачається, що надмірне випромінювання на міліметрових хвилях може призвести лише до поверхневих опіків, а не

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

серйозних пошкоджень тканин, оскільки випромінювання фокусується лише на поверхні.

### 1.3 Антени для бездротового зв'язку в діапазоні до 6 ГГц

Для ефективного розвитку антен у пристроях 5G потрібно вирішити декілька проблем, особливо в мікрохвильовому діапазоні. Мікрохвильові частоти характеризуються високою затримкою, низькою швидкістю передачі даних та обмеженою пропускнуою здатністю. Тому важливо мати ефективну конструкцію антени, щоб задовольнити потреби користувачів. Останні дослідження в галузі розробки антен для 5G у діапазоні нижче 6 ГГц показали значні успіхи. Антени для цих діапазонів зазвичай мають великі розміри і є монопольними. Вони можуть бути класифіковані як одноелементні, масивні або МІМО-конфігурації.

Деякі дослідження у літературі описують різні типи одноелементних антен для застосувань у мережах 5G. Наприклад, одна антена є магнітоелектричною дипольною антеною з кінічним Н-подібним заземленням, що працює в діапазоні нижче 6 ГГц. Інші дослідження пропонують щілинні або круглі антени з реконфігурацією частоти, а також друковані низькопрофільні антени з можливістю перенастроювання частоти та діаграми спрямованості. Варто зазначити, що одноелементні антени легко інтегруються в пристрої 5G, хоча їхня ефективність може бути обмеженою

Для забезпечення ефективного зв'язку 5G потрібні антени з високим коефіцієнтом підсилення для подолання втрат через атмосферне загасання та поглинання. Одноелементні антени не можуть забезпечити достатнього рівня посилення, тому розглядається конфігурація багатоеlementної решітки як один з основних методів розв'язання цієї проблеми.

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недавні дослідження зосереджуються на розробці різних конструкцій антенних решіток для систем 5G нижче 6 ГГц. Наприклад, у одному з досліджень була запропонована чотириелементна антена, що складається з чотирьох гібридних антен, які працюють у діапазоні нижче 6 ГГц для 5G, з піковим посиленням 8,4 дБі. Інше дослідження представляє двосмугову фільтруючу антенну решітку з подвійною поляризацією, що досягла дуже високого посилення 17,7 дБі. Також було описано антенну решітку 4×4 на основі метаповерхні для застосувань 5G нижче 6 ГГц, яка має низькопрофільну конструкцію та високий коефіцієнт посилення, з піковим значенням 7,2 дБі. Ці дослідження показують, що антенні решітки можуть забезпечити високий коефіцієнт посилення, необхідний для зв'язку 5G, хоча це часто досягається за рахунок збільшення розміру та складності конструкції.

Антенна система MIMO (Multiple Input Multiple Output) складається з кількох випромінюючих елементів, які використовуються як на передавальних, так і на приймальних терміналах, як показано на рисунку 1.4. MIMO вважається основним рішенням для підвищення пропускної здатності каналу порівняно зі звичайними бездротовими системами з одним входом і одним виходом (SISO – Single-Input-Single-Output). Незважаючи на переваги технології MIMO, розміщення кількох радіаторів у безпосередній близькості один до одного може призвести до збільшення взаємодії між ними. Це може негативно вплинути на продуктивність рознесення антен. Отже, розробка MIMO-антени з кращим рознесенням є складним завданням для розробників антен. Окрім основних параметрів, таких як посилення, ширина смуги пропускання, ефективність і т. д., необхідно вивчити кілька інших параметрів для вимірювання характеристик MIMO. Такими параметрами є коефіцієнт кореляції огинаючої, посилення різноманітності, середнє ефективне посилення, загальний коефіцієнт активного відбиття і втрата каналу.

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



посилення різноманітності, середнє ефективне посилення та пропускна здатність каналу, щоб оптимізувати продуктивність та ефективність систем бездротового зв'язку.

#### 1.4 Антени для міліметрових хвиль у системах 5G

Нещодавно в декількох дослідженнях були представлені дизайни антен для систем зв'язку 5G у міліметровому діапазоні. З огляду на високі втрати в атмосфері у міліметровому спектрі, для забезпечення ефективної роботи систем 5G необхідні антени з високим коефіцієнтом посилення. Оскільки одиночні патч-антени мають обмежений коефіцієнт посилення, були проведені численні дослідження для покращення їх продуктивності з точки зору пропускної здатності, посилення та зони покриття. Наприклад, Lin та інші запропонували всеспрямовану кругову поляризовану антену, об'єднуючи електричні та магнітні диполі в дископодібну структуру. У іншому дослідженні була представлена перехресна дипольна антена, де електричний та магнітний диполі інтегровані для підвищення характеристик антени. Подібно до цього, інші дослідники пропонували антену з круговою поляризацією, де для покращення продуктивності була встановлена квадратна кільцева метаповерхня. Також була представлена антена з перемиканим променем для додатків 5G у міліметровому діапазоні, де перемикання променя здійснювалось за допомогою включення двох PIN-діодів на заземлену площину. Такі дослідження спрямовані на розробку антен, що мають високий коефіцієнт підсилення для систем 5G у міліметровому діапазоні.

Оскільки MIMO вважається важливим засобом для забезпечення ефективного зв'язку у системах 5G у міліметровому діапазоні, останні дослідження активно вивчають конструкції антен MIMO з метою підвищення

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

пропускної здатності каналу. Однак однією з недоліків, пов'язаних з конфігурацією MIMO, є взаємозв'язок між різними антенними елементами. Для зменшення цього ефекту та для поліпшення характеристик випромінювання в останні часи були розроблені нові конструкції антен MIMO

#### 1.4 Антенні рішення для мобільних пристроїв 5G

Враховуючи очікувану сумісність антен 5G міліметрового діапазону з попередніми технологіями, такими як 4G/LTE, інтегровані або сумісні антени для обох технологій виявляються привабливим варіантом для забезпечення зв'язку на різних відстанях. Проте розробка таких антен стикається з викликами, оскільки щільно розташовані антени можуть взаємодіяти між собою. У нещодавніх дослідженнях розглядалися конструкції антен для портативних пристроїв, де антени 4G/LTE і 5G міліметрового діапазону розміщуються на одній платі підкладки. Наприклад, одне з рішень, запропонованих в одному з досліджень, полягає в створенні двоелементної антенної системи MIMO на мікрохвильових частотах та решітки мм-хвиль. Такі антени планарні і призначені для використання у смартфонах. У іншому дослідженні розглядається антенна структура MIMO, яка працює на мікрохвильових частотах, та конічна щілинна антенна решітка мм-хвиль. У цих випадках конусоподібний масив щілин також використовується як структура розв'язку на мікрохвильовій частоті. Додатково, інше дослідження розглядає взаємодію двоелементної антени MIMO для LTE та чотириелементної структури антени MIMO для мм-хвиль 5G на одній платі, де застосовуються прямокутні та круглі прорізи для покращення характеристик антени. Крім того, проводиться аналіз рівнів поглинання енергії та потужності для перевірки відповідності запропонованих систем антен міжнародним стандартам безпеки.

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.5 Напрямки розвитку комунікацій для 6G

Швидкий розвиток передових технологій, таких як штучний інтелект, тривимірні (3D) медіа, віртуальна реальність та Інтернет речей (IoT), призвів до зростання обсягу передаваних даних. Цей зростаючий попит на велику пропускну здатність привів до необхідності переходу та модернізації технологій від 5G до 6G. Наразі, на етапі ранньої розробки, система бездротового зв'язку 6G ще не має чіткого остаточного визначення. Однак головний акцент у розвитку 6G буде зосереджений на досягненні високої пропускну здатності, мінімальних затримках, більш широкому охопленні та високому рівні безпеки. Ключові технології, які розглядаються для використання в майбутніх системах 6G, показані на малюнку 22. Очікується, що частотний діапазон терагерц (0,1–10 ТГц) буде в основному використовуватися для реалізації систем зв'язку 6G. Бездротовий зв'язок 6G буде використовуватися в усіх сферах життя, включаючи охорону здоров'я, промисловість, сільське господарство, дослідження океану та космос

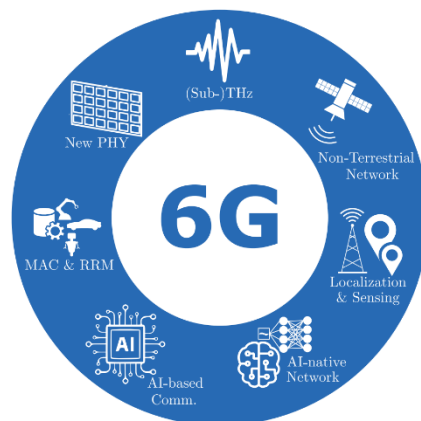


Рисунок 1.5 – Основні претенденти на технології 6G

Характеристики антен 6G залежать від їхнього призначення і використання. Проте, загальні вимоги до антен для систем зв'язку 6G включають наступне [11]:

					КВРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

1. Ширококутовість і багатодіапазонність: деякі застосування вимагають високоспрямованих антен, тоді як інші можуть потребувати високоспрямованих. Важливо мати антени з високим коефіцієнтом підсилення, який може сягати від 18 до 60 дБі.

2. Діапазон частот: системи 6G охоплюють великий спектр частот від 0,1 до 10 терагерц (ТГц). Це значно перевищує діапазони частот, що використовуються в попередніх поколіннях бездротового зв'язку, включаючи 5G. Перехід до діапазону терагерц відкриває нові можливості для високошвидкісного бездротового зв'язку з надзвичайною пропускну здатністю та мінімальними затримками. Такий широкий діапазон частот дозволить системам 6G працювати на відкритому просторі, а також забезпечить можливість використання для внутрішнього зв'язку в густонаселених міських районах. Таке розширення діапазону частот є ключовим для забезпечення високоякісного та надійного зв'язку у майбутніх мережах 6G.

3. Компактність та вартість: антени 6G повинні мати компактні розміри і бути доступними за ціною.

4. Поляризація: для комунікації в частотах 6G бажано використовувати кругову поляризацію.

5. Багатодіапазонність: вони можуть забезпечувати більшу пропускну здатність, швидкість передачі даних і загальну продуктивність систем ТГц.

6. Стійкість до атмосферних втрат: антени повинні мати високий коефіцієнт підсилення для подолання втрат при розповсюдженні в режимі ТГц.

7. Високоспрямованість: для ультраширококутового бездротового зв'язку на частотах ТГц важливо мати високоспрямовані антени.

8. Кругова поляризація: Антени з круговою поляризацією підходять як для внутрішніх, так і для зовнішніх застосувань 6G, оскільки вони менше схильні до багатопроменевого замирання. Кругова поляризація є передачею

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електромагнітних хвиль, яка обертається в площині перпендикулярно до напрямку їхнього поширення. Це стає важливим у зв'язку з тим, що вона дозволяє отримувати сигнали як в горизонтальній, так і в вертикальній площинах, що підвищує ефективність зв'язку у різних умовах та середовищах. Крім того, кругова поляризація допомагає уникнути проблем, пов'язаних із затуханням сигналу через зміни орієнтації антени та мінімізує вплив багатопроменевого замирання. Таким чином, використання кругової поляризації у системах 6G дозволяє забезпечити стабільний та надійний зв'язок у різних умовах експлуатації, що є критичним для успішного впровадження технології 6G.

9. Фотопровідні антени: для зв'язку 6G у ТГц-діапазоні також досліджуються фотопровідні антени з лінзовим зв'язком, які пропонують високі характеристики посилення для подолання великих втрат при розповсюдженні в цьому діапазоні.

## 1.6 Висновок до першого розділу

У цьому розділі були розглянуті технічні вимоги та характеристики бездротового зв'язку 5G і 6G в діапазоні терагерців. Зокрема, розглянуто розподіл спектру для мобільного зв'язку 5G та обговорено ключові аспекти конструкції антен для обох поколінь зв'язку. Детально розглянуті сучасні роботи з проектування антен для підтримки 5G в різних діапазонах частот, включаючи смугу sub-6 ГГц і міліметрові хвилі. Наголошено на використанні ключових технологій, таких як масиви та МІМО, для покращення характеристик антен 5G і 6G. Крім того, обговорено нещодавно представлені інтегровані системи антен 4G/LTE і 5G для портативних пристроїв, що демонструють поступ у розробці мультіфункціональних комунікаційних пристроїв.

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

## 2 АСПЕКТИ ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ В МЕРЕЖАХ 5G

Розвиток бездротового трафіку потребує постійного вдосконалення загальної швидкості передачі даних в географічній зоні. Одним з ключових чинників для досягнення цієї мети є збільшення пропускної здатності. Розширення ширини смуги пропускання безпосередньо перетворюється на збільшення пропускної здатності, аналогічно тому, як збільшення кількості смуг на дорозі безпосередньо впливає на обробку трафіку у години пік. Тому відкриття вищих діапазонів ГГц і ТГц, де доступно значна кількість вільного спектру, має велике значення.

Історичний аналіз бездротової передачі показує, що протягом останнього століття збільшення пропускної здатності бездротового зв'язку в основному здійснювалося за рахунок розширення ширини смуги, а не за допомогою розумних методів фізичного рівня. Однак наразі використовуваний спектр на мікрохвильових частотах обмежується лише кількома сотнями МГц, що обмежує можливості збільшення пропускної здатності. Попередні спроби розширення цього обмеженого спектру в основному були спрямовані на два напрямки [12].

Перерозподіл існуючого мікрохвильового спектру є однією зі стратегій, яка може відкрити простір для нових застосувань. Проте цей підхід не завжди був успішним через обмежений початковий спектр та високі витрати на переміщення існуючих розподільників. Наприклад, один з таких перерозподілів із частини наземного телебачення створив лише невеликий додатковий спектр приблизно на 80 МГц.

Інтелектуальний спільний доступ до спектру через когнітивне радіо отримав значне фінансування досліджень як потенційне рішення. Проте два фактори суттєво завадили його широкому впровадженню. По-перше, частина

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

ліцензованих власників спектру не були зацікавлені в поділі спектру з вторинними користувачами. По-друге, оскільки рух поточних стандартів 5G і пізніших спрямований на постійне бездротове підключення, витрати на інтелектуальний аналіз середовища виявляються важливішими, ніж просте дозволення передачі, в результаті чого бюджет обробки сигналів спрямовується на інші корисні програми, що виникають у великих мережах.

У зв'язку з цими викликами тенденція розширення спектру змінила свій напрям на інші шляхи. На момент написання цієї статті діапазон 3,5 ГГц (від 3,3 ГГц до 4,2 ГГц) став особливо привабливим для розгортання технології 5G у всьому світі через доступність спектру та добре охоплення на низьких частотах. Однак цей спектр залишається обмеженим, і міліметровий діапазон стає ключовим фактором для досягнення астрономічно високих швидкостей передачі даних у системах 5G.

Ця стратегія зосереджується на використанні міліметрового діапазону частот, що дозволяє значно збільшити пропускну здатність та швидкість передачі даних. Враховуючи те, що міліметрові хвилі мають вищі частоти і коротші довжини хвиль, вони забезпечують більшу пропускну здатність та можливість передачі даних на великі відстані. Це робить міліметровий діапазон важливим ресурсом для досягнення високих швидкостей та надійності в бездротових мережах, особливо в системах 5G.

Власне кажучи, спектр міліметрових хвиль (mmWave) вважається таким, що займає довжини хвиль від 1 мм до 10 мм. Позначимо довжину хвилі через  $\lambda_i$  використайте відношення  $c = f \cdot \lambda$ , де  $c$  – швидкість електромагнітної хвилі і  $f$  є несучою частотою.

Отже, діапазон спектра mmWave охоплює частоти від 30 ГГц до 300 ГГц, хоча у бездротовій спільноті цей термін зазвичай асоціюється з діапазоном від

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

10 ГГц до 100 ГГц. Спектр від 100 ГГц до 300 ГГц відомий як суб-тераГц. ТераГц-діапазон тепер визначається як частина спектру від 100 ГГц до 10 ТГц.

Багато провайдерів зосереджуються на використанні спектру від 24 ГГц до 100 ГГц для стільникових систем 5G, але вже проводяться випробування в діапазонах нижче ТераГц для можливого включення в стандарт 6G.

Канали поширення електромагнітних хвиль у цьому діапазоні відрізняються від мікрохвильових частот. Хоча втрати сигналу можна компенсувати за допомогою кількох антен, блокування та молекулярне поглинання значно вищі, що обмежує радіус дії системи зв'язку mmWave.

Однак ця велика втрата сигналу допомагає зменшити взаємні перешкоди між сусідніми комірками, що дозволяє будувати мережі з меншими комірками. Це призводить до збільшення коефіцієнта повторного використання частоти або більшої кількості передаваних бітів на гігагерц на квадратний кілометр.

Зростаючий попит на телекомунікаційні послуги викликає потребу у нових технологіях обробки викликів. Кожне покоління мобільних технологій приносить із собою збільшення швидкості передачі даних, покращення якості з'єднання та впровадження нових функцій. Технологія четвертого покоління (4G), яка впроваджена з 2009 року, наразі доступна по всьому світу. Розвиток мереж п'ятого покоління (5G) обіцяє введення нових сервісів, включаючи Internet of Things (IoT) та концепцію розумних міст.

Мережа 5G використовуватиме діапазони низьких, середніх і високих частот, кожен з яких має свої переваги та обмеження. Широке розгортання мережі 5G потребує підготовки антенної інфраструктури та впровадження нових технологічних рішень. Планується встановлення значної кількості антен всередині будівель, зокрема на комунальних об'єктах, таких як стадіони, вокзали та торгові центри.

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Важливо відзначити, що антени, встановлені в місцях з великою концентрацією людей, будуть меншими, ніж ті, які використовуються на сучасних передавачах з макростільниками. Це викликає певні непорозуміння в публічній дискусії. У звичайній системі антени випромінюють потужність відповідно до встановлених просторових характеристик, тому зона покриття визначена заздалегідь. На відміну від цього, антени 5G випромінюють потужність спрямовано та зосереджено на окремих користувачах або групах користувачів. Напрямки випромінювання можуть змінюватися автоматично, щоб максимально ефективно орієнтуватися на мобільних користувачів

Основним припущенням щодо роботи запропонованої антени є її оптимальна частота в діапазоні 28 ГГц, що відповідає одному з ключових діапазонів частот для систем 5G. Інші важливі аспекти моделі антени включають її компактний розмір та максимально широку смугу пропускання.

Процес розробки антени був націлений на досягнення мінімальних розмірів та ваги, що дозволить використовувати її в мобільних терміналах, а також полегшить її інтеграцію з електронними пристроями. Такий підхід дозволяє досягти оптимального балансу між ефективністю роботи антени та її практичністю в застосуванні.

## 2.1 Характеристики системи 5G

Мережа 5G використовує нові технологічні рішення, щоб задовольнити зростаючі вимоги користувачів. У результаті нова система зможе обслуговувати все більшу кількість пристроїв і задовольняти більш високі порогові значення якості, які вимагаються для сучасних програм. Це еволюція сучасних мереж 4G, яка включає в себе технології, здатні обробляти швидко зростаючий обсяг переданих даних і полегшувати обмін даними між постійно зростаючою кількістю пристроїв IoT. Як типово для впровадження будь-якої мережі

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

наступного покоління, очікується, що поки її покриття та функціональність не зможуть відповідати або перевершувати існуючі мережі 4G, мережа 5G повинна буде співіснувати з такою [1].

Поміж існуючих варіантів використання мобільних мереж, для нової мережі 5G передбачено три додаткові сценарії, кожен з яких буде надзвичайно важливим для користувачів і відрізнятиме мережу 5G від попередніх поколінь.

Першим новим сценарієм використання є розширений мобільний широкопasmовий зв'язок (eMBB), який забезпечить високошвидкісний доступ до Інтернету (до 1 Гбіт/с) і стане визначальною особливістю цієї мережі порівняно з існуючими мережами, особливо на початковому етапі її впровадження. Ця перевага системи 5G перед застарілими рішеннями підвищить ефективність і якість зв'язку в суспільстві. Як приклад, це забезпечить послуги, засновані на наданні мультимедіа високої роздільної здатності, привабливі методи зв'язку (наприклад, відео, доповнена та віртуальна реальність), а також послуги розумного міста (наприклад, передача контенту з камер високої роздільної здатності). [12,13].

Цей випадок надасть користувачам можливість насолоджуватися мультимедійним контентом високої якості та забезпечить швидку і надійну передачу даних. Важливо відзначити, що це значно покращить взаємодію користувачів з різноманітними сервісами та додатками, що сприятиме розвитку цифрової економіки та покращенню якості життя.

Другий випадок використання мереж 5G базується на зв'язку масового машинного типу (mMTC), де 5G може підтримувати велику кількість підключень від пристроїв з низьким енергоспоживанням, таких як Інтернет речей (IoT), до мобільних пристроїв у мережі. Ці пристрої асинхронно обмінюються даними через мобільну мережу, використовуючи для цього мобільний зв'язок. Цей сценарій передбачає підтримку різноманітності типів пристроїв з

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

урахуванням того, що вони будуть періодично використовувати мобільну мережу для обміну невеликими обсягами даних [14].

Третій випадок, названий наднадійним зв'язком із низькою затримкою (URLLC), передбачає технологію, що забезпечує мінімальну затримку (1 мс) для обміну даними через мобільну мережу для критично важливих застосувань, таких як управління дронами. У попередніх поколіннях мобільних мереж затримки були значно вищими, складаючи близько 100 мілісекунд для мереж 3G та приблизно 30 мілісекунд для мережі 4G (LTE – Long Term Evolution) [15].

Ці нові випадки використання мережі 5G розширюють її можливості та відкривають нові перспективи для розвитку різних сфер життя, включаючи промисловість, транспорт, медицину та багато інших.

Згідно з поточними стандартами мережі 5G, вона розроблена для операцій у трьох основних частотних діапазонах: низькому, середньому і високому. Вибір конкретного діапазону залежить від його характеристик, таких як поширення радіосигналу та доступність ресурсів спектру. Перший фактор пов'язаний з фізичними властивостями електромагнітних хвиль, що визначають максимальну дальність передачі радіосигналу в різних умовах, таких як погодні умови та покриття сигналом у важкодоступних місцях, наприклад, всередині будівель.

Другий фактор пов'язаний з доступним обсягом радіочастотних ресурсів у конкретному діапазоні частот, які можуть використовуватися мережами 5G. Високі швидкості передачі даних вимагають широкої смуги пропускання, яка, будучи обмеженим ресурсом, піддається регулюванню. Крім того, використання цього ресурсу потрібно збалансувати з іншими застосунками радіочастотного зв'язку, такими як телевізійні трансляції та системи радіозв'язку для домашньої автоматизації.

Згідно з системою 5G, планується використання перших трьох діапазонів частот:

- діапазон 700 МГц: від 694 до 790 МГц;
- діапазон 3,6 ГГц: від 3400 до 3800 МГц;

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

- діапазон 28 ГГц: від 27,50 до 28,35 ГГц.

Ці діапазони є основними для першого етапу впровадження мережі 5G і передбачаються для використання у різних географічних областях для забезпечення покриття та високошвидкісного доступу до Інтернету.

Діапазон 700 МГц відрізняється відмінним поширенням сигналу та низьким рівнем загасання, що робить його ідеальним для охоплення великих територій. Ці характеристики роблять його підходящим для послуг масового машинного зв'язку (mMTC). Однак сам по собі діапазон 700 МГц не може забезпечити широкосмуговий доступ до Інтернету для мобільних користувачів (eMBB), оскільки він не підтримує технологію MIMO, яка забезпечує збільшення пропускної здатності кожної базової станції. Проте його можна комбінувати з іншими діапазонами, що мають широкі спектральні ресурси. Такий підхід поліпшує якість передачі сигналу від користувача до базової станції (так званий "вгору" канал передачі даних).

Діапазон 3,6 ГГц є важливим компромісом між розповсюдженням сигналу і пропускною спроможністю у контексті спектральних ресурсів. Він має можливість використовувати технологію mMIMO (massive MIMO), що дозволяє підвищити ефективність мережі. Особливо в поєднанні з діапазоном 700 МГц, цей діапазон може покращити зв'язок в області "вгору", тобто передачу даних від користувача до базової станції. У деяких великих містах цей діапазон буде використовуватися для створення покриття для послуг широкосмугового доступу до Інтернету (eMBB), а також для забезпечення низької затримки та надійної передачі даних для критичних застосунків (URLLC). Використання діапазону 3,6 ГГц дозволить впровадження послуг, які потребують великих обсягів даних, наприклад, зображення високої роздільної здатності для медичних або навігаційних цілей.

Діапазон 28 ГГц має свої обмеження у використанні, зокрема, відносно передачі даних від користувача до базової станції (так звана "висхідна" лінія). Однак його можна ефективно використовувати для різноманітних застосунків,

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

включаючи точки широкосмугового доступу та сценарії picocell (сМТС/URLLC). Цей діапазон відрізняється великою пропускнуою здатністю та можливістю ефективного розподілу значних ресурсів спектру. Крім того, він може бути розглянутий як потенційний кандидат для забезпечення широкосмугового доступу до Інтернету за допомогою фіксованого бездротового з'єднання.

## 2.2 Діапазон частот для мережі локального багатоточкового розподілу

Рішення, використані в системі 5G, вирішують проблеми, які були характерні для LTE. Ці технології використовують високочастотні діапазони, зокрема, міліметрові хвилі на частоті 28 ГГц, а також методи формування променів. Це дозволяє кільком клієнтам, що знаходяться в радіусі дії однієї базової станції, одночасно використовувати інтернет-з'єднання зі швидкістю до 1 Гбіт/с [16].

Однак ефективність діапазону 28 ГГц обмежена, в основному через вимоги, які стосуються передачі сигналу від користувача до базової станції (так званий "висхідний" канал). Ця смуга частот 28 ГГц була виділена Федеральною комісією зв'язку (FCC) шляхом перерозподілу блоків місцевої багатоточкової служби розподілу (LMDS) A1, яка має ширину 850 МГц і розташована між діапазонами 27,50 і 28,35 ГГц.

У відповідь на зростаючий попит на додатковий частотний спектр, особливо для фіксованих і мобільних додатків 5G, які потребують великої пропускнуої здатності для підтримки вищих швидкостей понад 1,0 Гбіт/с та зниження затримок, Федеральна комісія зв'язку (FCC) вирішила перерозподілити канал A1. Він став частиною нової ліцензії Upper Microwave Flexible Use License (UMFUS). Цей перерозподіл включав розподіл частотного спектру у два нові блоки шириною 425 МГц кожен (блоки L1 і L2). Це рішення було прийняте для забезпечення додаткових можливостей для розвитку мереж 5G та задоволення зростаючих потреб користувачів. Розподіл спектру LMDS в смузі частот 28 ГГц

										КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
											31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

представлено на рисунку 2.1, який відображає нову конфігурацію після перерозподілу.

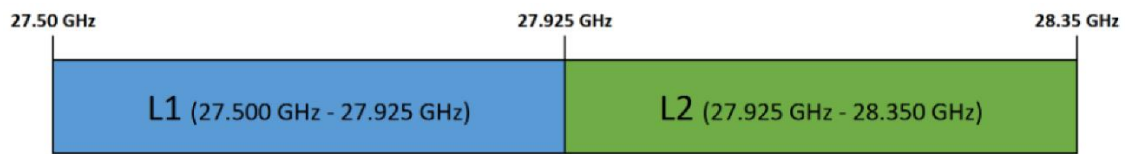


Рисунок 2.1 – Частотний спектр 28 ГГц (від 27,50 до 28,35 ГГц) локальної багатоточкової розподільної служби

Діапазон 28 ГГц та інші міліметрові діапазони частот (mmWave), такі як 24 ГГц і 37/39 ГГц, візьмуть на себе важливу роль у впровадженні технології 5G відповідно до нової Ліцензії гнучкого використання мікрохвильового діапазону (UMFUS – Upper Microwave Flexible Use License). Діапазони UMFUS є стандартизованими в рамках 3GPP згідно з рекомендаціями стандарту 5G New Radio (NR), зокрема у діапазоні частот 2 (FR2), який включає міліметрові частоти.

Наразі смуги UMFUS активно підтримуються та використовуються національними операторами мобільного зв'язку, інноваційними компаніями мобільного зв'язку, регіональними операторами телефонного зв'язку та іншими організаціями, що прагнуть впровадити мережі мобільного зв'язку або надати послуги фіксованого бездротового доступу (FWA).

Діапазони UMFUS підпорядковані правилам і нормам, які обмежують потужність на стаціонарних і базових станціях, які працюють у поєднанні з мобільними системами. Ці обмеження встановлені щодо щільності ефективної ізотропної потужності (EIRP) та становлять +75 дБм на 100 МГц. Середня потужність суми всіх компонентів антени мобільної базової станції не повинна перевищувати максимальне значення EIRP +43 дБм. Розгортання мережі може використовувати будь-яку бажану дуплексну схему за умови дотримання інших технічних або операційних вимог.

						КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
							32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Діапазон 28 ГГц ідеально підходить для різноманітних додатків, що потребують високих швидкостей передачі даних понад 1 Гбіт/с (в залежності від розміру каналу), які можна досягти використовуючи спектр, визначений UMFUS. Він використовується для високошвидкісних транспортних зв'язків, "домашнього" 5G/FWA (Fixed Wireless Access), а також інших застосувань з можливістю реалізації фіксованих конфігурацій РТР (point-to-point) і РТМР (point-to-multipoint). Діапазон 28 ГГц також може бути використаний для мобільних застосувань, які наразі є ключовим аспектом впровадження 5G і підтримуються національними операторами та іншими організаціями.

### 2.3 Висновок до другого розділу

У даному розділі наведено широкий огляд ключових аспектів та технічних характеристик системи 5G. Починаючи з опису загальних концепцій та принципів роботи мереж 5G, він докладно розглядає важливі параметри, такі як пропускна здатність, затримка, масштабованість та енергоефективність. Крім того, розділ аналізує спектральні характеристики та розподіл частот для ефективної роботи мереж 5G.

Важливо відзначити, що розділ також ставить у контексті мереж 5G концепцію мереж локального багатоточкового розподілу. Досліджується діапазон частот, приділяється увага реалізації цього типу мереж та їх потенційній ролі в розвитку бездротових комунікацій.

В цілому, розділ надає глибокий розуміння технічних аспектів та можливостей мереж 5G, що є ключовими для розгортання сучасних телекомунікаційних інфраструктур та розвитку майбутніх бездротових комунікаційних рішень.

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

### 3 АНАЛІЗ ДИСКРЕТНИХ ЛІНІЙНИХ МАСИВІВ

Антенна решітка, складаючись з кількох з'єднаних антен (або елементів), працює як єдина антена для передачі або прийому радіохвиль. Кожен окремий елемент підключається до спільного приймача або передавача через лінії живлення з певним фазовим співвідношенням. Радіохвилі, випромінювані кожним елементом, об'єднуються та накладаються, додаючи свою потужність в бажаному напрямку, а також скасовуючи в інших напрямках. В приймачі сигнали з окремих елементів також об'єднуються з правильним фазовим співвідношенням для посилення сигналів з бажаних напрямків і скасування сигналів з небажаних напрямків.

Використання антенної решітки дозволяє досягти більшого підсилення (спрямованості) та вузького променя радіохвиль, ніж може бути досягнуто одним елементом. Чим більше окремих елементів використовується, тим вище коефіцієнт підсилення та вузький промінь. Складні антенні решітки можуть містити тисячі окремих антен, і вони використовуються для різних цілей, включаючи підвищення надійності зв'язку, усунення перешкод, електронне керування радіопроменем та радіопеленгацію

Термін "антенна решітка" може вказувати на керовану решітку, що складається з кількох ідентичних керованих елементів, підключених до приймача або передавача. Така решітка може бути реалізована як звичайна антенна решітка або як фазована решітка. У випадку фазованої решітки кожен елемент керується фазовращателем, який може бути налаштований комп'ютером, щоб ефективно керувати напрямком променя радіохвиль. Це дозволяє миттєво змінювати напрямок променя без фізичного руху антени.

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Крім того, існує паразитний масив, який складається з одного керованого елемента та додаткових паразитних елементів, які не підключені до живлення. Це може бути інша назва для антени Ягі-Уда.

Термін "фазована решітка" часто використовується для електронно керованого масиву, але іноді може вказувати на звичайну антенну решітку.

### 3.1 Принцип роботи антенних решіток

Згідно з критерієм Релея, спрямованість антени, або кутова ширина променя радіохвиль, що вона випромінює, пропорційна довжині хвилі радіохвиль, поділеній на ширину антени. Малі антени, що мають розмір порядку однієї довжини хвилі, такі як чвертьхвильові монополі та напівхвильові диполі, не мають великої спрямованості (посилення); це називається характеристикою всенапрямленості, де радіохвилі випромінюються під широким кутом. Щоб створити спрямовану антену (антену з високим коефіцієнтом підсилення), яка випромінює радіохвилі у вузькому промені, можна використовувати два загальні методи [17]:

1. Перший метод використовує відбиття від великих металевих поверхонь, таких як параболічні рефлектори або рупори, або заломлення діелектричними лінзами, щоб змінити напрямок радіохвиль і сфокусувати їх від антени з низьким коефіцієнтом підсилення в промінь. Цей тип антени називається апертурною. Параболічні тарілки є прикладом такого типу антен.

2. Другий метод використовує кілька антен, які живляться від одного передавача або приймача. Це називається антенною решіткою. Подавані струми на антени з правильною фазою призводять до конструктивної інтерференції, де сферичні хвилі від окремих антен об'єднуються перед масивом, створюючи плоскі хвилі, які утворюють пучок радіохвиль. У напрямках, де хвилі надходять у фазі, вони посилюються, утворюючи головний пелюсток. У напрямках, де

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

хвилі надходять не у фазі, вони гасяться, утворюючи бічні пелюстки. Цей процес називається інтерференцією. Чим більше ширина антени і кількість складових елементів, тим вузчий головний пелюсток і вищий коефіцієнт підсилення.

Такі антени мають діаграму спрямованості, яка складається з головного пелюстка та бічних пелюсток, які представляють залишкове випромінювання в небажаних напрямках. Ширококутові решітки мають елементи, що живляться в фазі, з головним пелюстком, що виділяється перпендикулярно до площини елементів.

Найбільші антенні решітки, такі як радіоінтерферометри в радіоастрономії, можуть використовувати тисячі миль у діаметрі. Ці антени з'єднуються в мережу, щоб отримати вищу роздільну здатність. У великих антенних решіток можуть використовуватися методи синтезу апертури для досягнення високої роздільної здатності.

### 3.2 Класифікація типів антенних решіток

Антенні решітки можна поділити на два основні класи в залежності від орієнтації компонентних антен [18]:

1. Ширококутові решітки мають головний пелюсток, який випромінює радіохвилі перпендикулярно до площини антен. Це досягається завдяки живленню антен в фазі. Прикладом є антенні решітки з паралельно розташованими елементами, які випромінюють радіохвилі у всі напрямки.

2. Кінцеві решітки представляють собою лінійні решітки, в яких випромінювання спрямоване вздовж лінії антен. У таких решітках антени живляться з різницею фаз, що відповідає відстані між ними.

3. Щодо розміщення елементів антени, можна виділити такі типи:

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

4. Керовані решітки складаються з керованих елементів, які підключені до передавача або приймача. Ці елементи можуть бути різних типів, таких як напівхвильові диполі або антени Yagi.

5. Колінеарні решітки мають вертикально розташовані дипольні антени, що випромінюють радіохвилі в одному напрямку. Вони часто використовуються у телевізійних антенах та базових станціях для мобільних радіо.

6. Планарні решітки є двовимірними антенами, що випромінюють радіохвилі у два протилежних напрямках. Вони можуть бути складені з різних типів антен для створення односпрямованого променя.

7. Відбивні решітки використовуються як передавальні антени, що випромінюють радіохвилі перпендикулярно до антенної решітки, яка зазвичай розташована попереду відбивного екрану.

8. Завісні решітки є зовнішніми передавальними антенами, що складаються з дротяних диполів, підвішених перед вертикальним відбивачем. Вони використовуються у короткохвильовому мовленні на великі відстані.

9. Мікросмужкові антени складаються з патч-антен, виготовлених на друкованій платі, і використовуються у супутниковому телебаченні та НВЧ приймачах.

Ці класифікації дозволяють краще розуміти різноманітність та застосування антенних решіток в сучасних комунікаційних системах.

Фазова решітка з електронним скануванням – це плоска антенна решітка, яка може електронно керувати напрямком свого променя без фізичного переміщення антени. Шляхом зміни фази живильних струмів, керованих комп'ютером, промінь може бути спрямований в будь-якому напрямку перед решіткою. Така технологія застосовується у військових радарх і поступово знаходить застосування в цивільних системах.

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Пасивна решітка з електронним скануванням (PESA) – це фазована решітка, де елементи антени живляться від одного передавача або приймача через фазоврацателі, які керуються центральними пристроями.

Активна решітка з електронним скануванням (AESA) – це фазована решітка, де кожен елемент антени має власний передавач та/або приймач, керований центральним комп'ютером. Ця технологія дозволяє одночасно випромінювати кілька променів на кількох частотах і використовується у складних військових радарх.

Конформна решітка – це двовимірна фазована решітка, яка не має плоскої форми, адже вона адаптується до криволінійної поверхні. Окремі елементи керуються фазоврацателями, що компенсують змінну довжину шляху і дозволяють антені випромінювати промінь плоскої хвилі. Конформні антени часто використовуються в аерокосмічних системах для інтеграції у вигнуті обшивки літаків і ракет з метою зменшення аеродинамічного опору.

Розумна антена, також відома як реконфігурована антена або адаптивна решітка, є прийнятною решіткою, яка автоматично оцінює напрямок, з якого надходять радіохвилі, і електронно налаштовує свою діаграму спрямованості для оптимального прийому, синтезуючи головну пелюстку у цьому напрямку. Вона складається з кількох ідентичних елементів, кожен з яких обладнаний фазоврацателем у лінії живлення, керованим комп'ютером, що забезпечує автоматичне налаштування.

Логперіодична дипольна решітка (LPDA) є прикладом кінцевої решітки, яка складається з ряду дипольних елементів, розташованих у лінії, де довжина кожного елемента збільшується поступово. Це забезпечує широкосмугову антену з високим коефіцієнтом підсилення. LPDA використовуються як телевізійні приймальні антени та для короткохвильового зв'язку.

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Паразитна решітка є формою кінцевої решітки, в якій лише один елемент, званий керованим елементом, підключений до передавача або приймача, тоді як інші елементи, відомі як паразитні елементи, залишаються відключеними. Паразитні елементи функціонують як резонатори, поглинаючи радіохвилі від керованого елемента та перевипромінюючи їх з іншою фазою, щоб модифікувати діаграму спрямованості антени та підвищити потужність випромінювання у потрібному напрямку.

Антенна Ягі-Уда, також відома як антенна Ягі, є прикладом паразитної решітки. Вона складається з одного керованого елемента, зазвичай напівхвильового диполя, і кількох паразитних елементів, включаючи "направляючі" елементи в напрямку випромінювання та "рефлекторний" паразитний елемент позаду керованого. Використовується в антенах для телевізійного мовлення, короткохвильового зв'язку та радарів у діапазонах HF, VHF і UHF.

Квадратна антенна складається з кількох рамкових елементів у лінії, де лише один є керованим, а інші діють як паразитні. Ця антенна працює аналогічно антені Ягі-Уда та зазвичай використовується для підвищення спрямованості та потужності сигналу.

Антени – це пристрої, які перетворюють енергію між електромагнітними хвилями та електричним струмом у колах [19]. Щоб підвищити ефективність перетворення, важливо мати спрямованість антени та вирівняти її максимальну спрямованість у напрямку бажаних радіохвиль. Традиційно, це досягається шляхом механічної зміни напрямку антени. Проте, фазові антенні решітки (РАА), які розташовують кілька випромінюючих елементів на плоских або вигнутих поверхнях, використовуються для зміни напрямку променя шляхом контролю фази збудження та амплітуди окремих антен. Контроль фази збудження досягається регулюванням фази сигналу на кожному елементі за

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

допомогою фазовращателя. Це відкриває можливість електронного контролю діаграми спрямованості в антенах та дозволяє швидке керування діаграмою спрямованості незалежно від розміру або ваги антени.

Антени з фазовою антенною решіткою (РАА) спочатку були призначені для радіолокаційних систем. В порівнянні з традиційними антенами з механічним приводом, вони пропонують значно швидше сканування променя. Це зробило РАА основним типом антен для мобільних і стаціонарних радіолокаційних систем. Останнім часом їх також використовують у радіозв'язку через переваги швидкого сканування, мініатюризації антенних елементів та кіл живлення, а також зниження вартості. Наприклад, застосуванням РАА є супутникова антена з реформуванням променя, яка автоматично перемикається між променями в залежності від потреби, наприклад, у міжнародному супутниковому зв'язку, а також антена мобільної станції для мобільного супутникового зв'язку. Однією з переваг РАА є їх можливість адаптуватися до конструкції об'єктів, на яких вони встановлюються, що дозволяє використовувати їх на супутниках або транспортних засобах без необхідності механічної зміни форми. Вдосконаленою формою РАА є активна фазована антенна решітка (АРАА), яка включає в себе фазові зрушувачі та активні елементи, такі як підсилювачі з низьким рівнем шуму та високопотужні підсилювачі.

При розробці активних фазових антенних решіток (АРАА) з такою конфігурацією, яка передбачає прийом мікрохвильових сигналів кожним антенним елементом та їх подальше цифрове перетворення за допомогою аналого-цифрових перетворювачів, виникає можливість формувати промені за допомогою цифрового сигнального процесора. Такі антени отримують назву антен з цифровим формуванням променя (DBF).

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Подальшим розвитком технології адаптивної решітки є технологія МІМО (багато входів і багато виходів). Вона використовує антенну решітку як для передачі, так і для прийому сигналів. МІМО розширює можливості антенних решіток, дозволяючи використовувати їх для ефективної обробки сигналів і забезпечення високошвидкісного бездротового зв'язку.

Отже, з появою та подальшим розвитком активних фазових антенних решіток (РАА) антени перейшли від простих перетворювачів енергії до складних систем, що включають ряд функцій, таких як керування, обробка сигналів, технології модуляції та демодуляції. Кульмінацією цього розвитку є адаптивні фазові антенні решітки (DBF) та технологія МІМО.

### 3.3 Роль антенної решітки

Функція антенної решітки полягає в передачі або прийомі радіосигналів за допомогою великої кількості елементних антен, які розташовані в певному порядку на площині. Кожен з цих елементів, який називається "антенним елементом", має власну функцію в передачі або прийомі сигналів [20]. Антенна решітка складається з цих елементних антен та фідерної мережі, яка забезпечує живлення кожного антенного елементу і керує їхнім збудженням.

У складі антенної решітки можуть використовуватися різні типи антен, такі як дротяні, дипольні, щілинні, мікросмужкові або рупорні, в залежності від конкретних вимог системи. Фідерна мережа включає в себе компоненти для розподілу та об'єднання сигналів, фазоврацателі, підсилювачі високої потужності, підсилювачі з низьким рівнем шуму та інші.

Одне з основних переваг антенних решіток порівняно з окремою антеною полягає в їхній здатності забезпечувати різноманітні функції шляхом зміни типу антени, конфігурації сітки та збудження через фідерну мережу. Це дозволяє

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

отримувати різноманітні діаграми напрямленості та забезпечувати ефективну роботу системи зв'язку або радіолокації в різних умовах експлуатації.

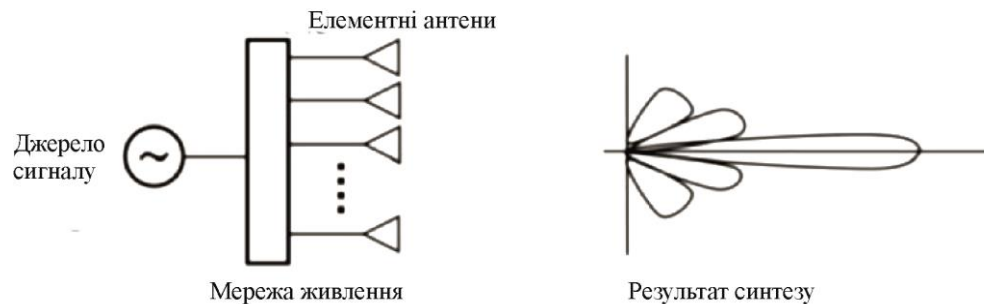


Рисунок 3.1 – Основна конфігурація антенної решітки

Основною функцією антенної решітки є створення діаграми напрямленості, яка оптимізована для відповідності певним вимогам. Процес синтезу діаграми напрямленості включає наступні аспекти:

1. Визначення бажаної діаграми напрямленості: Визначення конкретної форми діаграми напрямленості відповідно до потреб конкретного застосування.
2. Контроль ширини головного променя: Забезпечення можливості регулювання ширини головного променя для відповідності конкретним вимогам щодо покриття зони зв'язку або вимогам радіолокації.
3. Мінімізація бокових пелюсток: Зниження і контроль рівнів бічних пелюсток дозволяють покращити ефективність напрямленості антенної решітки та зменшити вплив небажаних випромінювань.
4. Встановлення бажаної нульової точки: Визначення точного напрямку, у якому антена решітка має мінімальну чутливість, що є важливим для уникнення спотворень у прийомі або передачі сигналів.
5. Досягнення потрібного підсилення: Забезпечення відповідного рівня підсилення відповідно до вимог щодо дальності зв'язку або потреб системи радіолокації.

Ці аспекти синтезу діаграми напрямленості допомагають антенній решітці відповідати конкретним потребам і забезпечувати оптимальну ефективність у різних умовах експлуатації.

З використанням вищезазначених атрибутів можна покращити співвідношення сигнал/шум (S/N) або співвідношення бажане/небажане (D/U). Це досягається завдяки можливості оптимізації діаграми напрямленості антенної решітки, щоб вона максимально відповідала потребам конкретної системи зв'язку або радіолокації.

Ще однією важливою особливістю антенної решітки є її можливість сканування променя, що дозволяє змінювати напрямок основного променя згідно з потребами системи. Для цього змінюються фази збудження кожного елемента антени, але не їхні положення на решітці. Існують кілька методів зміни фази збудження:

1. Використання фазоврацателів в живильних мережах: Цей метод дозволяє регулювати фазу сигналу на кожному антенному елементі окремо, що дає можливість електронного сканування променя.

2. Зміна частоти для зміни різниці довжин в живильній мережі: Цей підхід полягає в тому, що змінюється частота сигналу для кожного елемента антени, що призводить до зміни фази збудження і, відповідно, напрямку променя.

3. Вибір мережі формування променя: Вибір конкретної мережі формування променя, яка відповідає потрібному напрямку, є ще одним методом електронного сканування променя.

Використання цих методів дозволяє створювати фазовані антенні решітки (РАА), які є важливим інструментом для систем з електронним скануванням променя.

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

В сучасних системах антенних решіток до кожного елемента живильної мережі додається фазообертач, який може бути аналоговим або цифровим. Останній стає все більш популярним вибором завдяки його високій керованості. Цифрове формування променя (DBF) є ще одним підходом до керування фазами кожного елемента антени. У DBF сигнал проміжної частоти (IF) або сигнал базової смуги перетворюється на цифровий сигнал, і фаза контролюється в цифровому каскаді. Основною перевагою DBF є можливість встановлення довільної фази і амплітуди, а також створення кількох променів одночасно.

Досліджено також антени решітки з оптичним керуванням, де фаза й амплітуда контролюються в оптичному домені. Це дозволяє створювати кілька променів невеликого розміру та легкої ваги, що може бути важливим для певних додаткових застосувань, наприклад, у військових або космічних системах, де обмежені ресурси на простір і вагу.

### 3.4 Характеристики лінійної антенної решітки

Лінійна рівномірна матриця (ULA) складається з сенсорних елементів, розташованих рівномірно вздовж прямої лінії. Найпоширенішим типом сенсорів є дипольні антени, які можуть передавати та приймати електромагнітні хвилі у повітрі. Інші види сенсорів включають акустичні, які можуть працювати як у повітрі, так і у воді. Вимоги до ULA можуть варіюватися залежно від конкретного застосування, але основною метою є покращення співвідношення сигнал/шум (SNR) і збільшення підсилення у визначеному напрямку [20]. Друга вимога означає, що масив приймає сигнал з певного напрямку і відхиляє сигнал з інших напрямків, що є важливим у радіолокаційних системах.

На рисунку 3.2 зображено лінійну антенну решітку, що складається з  $N$  антенних елементів, розташованих на прямій лінії з однаковими відстанями між ними, що позначається як  $d$ . Лінійна антенна решітка є найбільш простою

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формою антенної решітки, і було описано багато практичних застосувань цієї конфігурації.

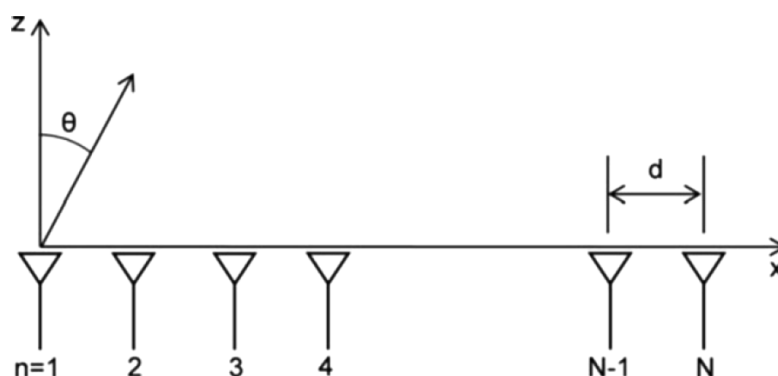


Рисунок 3.2 – Лінійна антенна решітка з N елементів

Діаграми спрямованості, вхідний опір або розподіл струму (у випадку дипольних антен) кожної окремої антени можуть відрізнитися, навіть якщо всі антени збуджуються з однаковою амплітудою та фазою. Це через взаємний зв'язок між антенами. Проте основні характеристики антенних решіток можна пояснити, не звертаючись до цих відмінностей. Якщо припустити, що всі антени мають однаковий розподіл струму, діаграму спрямованості кожної окремої антени можна виразити тією ж функцією. З цим припущенням діаграма спрямованості антенної решітки визначається функцією діаграми спрямованості та різницею фаз кожної антени. Різниця фаз залежить від положення кожної антени. Діаграма спрямованості антенної решітки  $F(\theta, \phi)$  виражається через формулу (3.1), яка враховує ці параметри [21].

$$F(\theta, \phi) = f(\theta, \phi) \sum_{n=1}^N a_n \exp(j\varphi_n) \times \exp(jk r_n \cdot R) \quad (3.1)$$

де  $r_n = (x_n, 0, 0)$  – вектор розташування антени  $n$ -го елемента,  $a_n$  – амплітуда збудження,  $\varphi_n$  – фаза збудження,  $f(\theta, \phi)$  – діаграма спрямованості одного

антенного елемента, вектор точки спостереження  $R = (\sin\theta \cos\phi, \sin\theta \sin\phi, \cos\theta)$ ,  $k = 2\pi/\lambda$  – хвильове число у вільному просторі, а  $\lambda$  – довжина хвилі у вільному просторі. Для спрощення,  $F(\theta, \phi)$  для лінійної антенної решітки, зображеної на рисунку 3.2, виражається як:

$$F(\theta, \phi) = f(\theta, \phi) \sum_{n=1}^N a_n \exp(j\varphi_n) \times \exp[jk(n-1)d \sin\theta] \quad (3.2)$$

Якщо змінено тип антени елемента, наприклад, з дипольної антени на мікросмушкову антену, діаграма  $f(\theta, \phi)$  у рівнянні (3.2) також змінюється. Однак підсумковий елемент залишається незмінним. Таким чином, характеристики антенної решітки визначаються підсумковим членом. Для аналізу основних характеристик антенної решітки використовується діаграма спрямованості, яка усуває  $f(\theta, \phi)$ . Це еквівалентно встановленню  $f(\theta, \phi) = 1$ , що відповідає ідеальній ізотропній антені. Така діаграма спрямованості відома як "фактор масиву".

У випадку антенної решітки на рис. 3.2, припускаючи, що антенна решітка знаходиться далеко від точки спостереження, якщо всі елементи антени збуджені таким чином, що фази від усіх елементів антени ідентичні в напрямку  $\theta = \theta_0$ , фаза збудження  $n$ -го елемента антени,  $\varphi_n$ , визначається наступним чином:

$$\varphi_n = -n \cdot u_0 \quad (3.3)$$

$$u_0 = kd \sin \theta_0 \quad (3.4)$$

Ці фази, які збігаються між собою, відомі як "співфазні", і вони застосовуються, коли пік діаграми спрямованості спрямований під потрібним кутом. У цьому випадку коефіцієнт масиву виражається через:

$$F(u) = \sum_{n=1}^N a_n \exp(jnu) \quad (3.5)$$

					КВРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У цьому випадку замість символу  $\theta$  використовується символ  $u$ . Коефіцієнт масиву виражається через:

$$u = kd (\sin \theta - \sin \theta_0) . \quad (3.6)$$

Виключивши діаграму спрямованості елементної антени,  $f(\theta, \phi)$ , з рівняння (3.2), отримано рівняння (3.5). Параметри  $\theta$ ,  $d$  і  $\theta_0$  тепер виражені лише однією змінною  $u$ . Це спрощує аналіз характеристик антенної решітки. Коли всі елементні антени лінійної антенної решітки збуджуються з однаковою амплітудою та співфазою, згідно з рівнянням (3.5), діаграма спрямованості антенної решітки виражається як

$$F(u) = \frac{\sin\left(\frac{Nu}{2}\right)}{N \sin\frac{u}{2}} . \quad (3.7)$$

З рівняння (3.7), значення  $F$  досягає максимуму, рівного 1, коли  $u = 2m\pi$  ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ). Локальні максимуми в  $F$ , відомі як бічні пелюстки, відбуваються при  $Nu/2 = (2M + 1)\pi/2$  ( $M = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ). У випадку  $u \ll 1$ , рівняння (3.7) може бути приблизно записане так:

$$F(u) = \frac{\sin\left(\frac{Nu}{2}\right)}{\frac{Nu}{2}} . \quad (3.8)$$

Це наближення стає дійсним, коли відстань між антенними елементами ( $d$ ) менша за довжину хвилі або діапазон  $\theta$  обмежений. Рівняння (3.8) відображає аналогічну картину, яку можна отримати за допомогою діафрагми, яка

					КВРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

випромінює безперервну хвилю з рівномірним розподілом амплітуди. Таким чином, антенну решітку в цьому випадку можна розглядати як апертурну антену з рівномірним розподілом амплітуди.

Відміна цього припущення дозволяє розробити антенну решітку з новими можливостями. По-перше, розмір апертури та розподіл амплітуди джерела безперервної хвилі визначаються таким чином, щоб задовольнити вимоги до обслуговування, такі як посилення, ширина променя та рівень бічних пелюсток. По-друге, кількість елементів і відстань між елементами визначаються шляхом їх розташування в апертурі, яка була визначена на попередньому етапі.

На рисунку 3.3 представлений графік коефіцієнта решітки лінійної антенної решітки з дев'яти елементів. Ця функція є періодичною і досягає максимального значення 1 при значенні  $u = 2m\pi$  ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ). Локальні максимуми відображаються як бічні пелюстки, що виходять з основного максимуму.

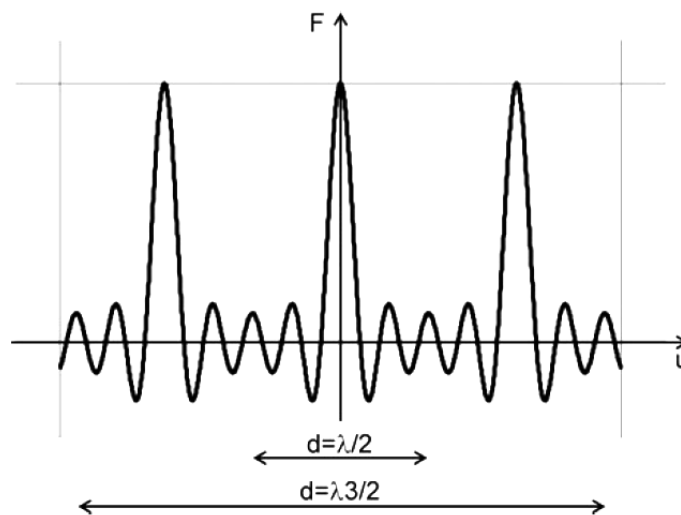


Рисунок 3.3 – Коефіцієнт решітки 9-елементної лінійної антенної решітки та видима область для кожного інтервалу антени

Якщо головний промінь антенної решітки спрямований вздовж вісі  $z$  на рис. 3.2, це означає, що антена стає широкосмуговою, або широкозонною, де головний промінь та вісь антенних елементів перпендикулярні одна одній. У цьому випадку значення кута  $\theta_0$  стає рівним нулю, оскільки вісь антени і головний промінь збігаються. Оскільки модуль  $|\sin(\theta)| \leq 1$  завжди менше або дорівнює 1, діапазон значень  $u$  стає:

$$-kd \leq u \leq kd \quad (3.9)$$

Для антенної решітки з розносом між елементами  $d = \lambda/2, |u| \leq \pi$  відповідає певний фізичний простір  $|\sin(\theta)| \leq 1$ , тобто  $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ . Цей простір, де має місце інтерференція хвиль та виникає відповідний візерунок, називається "видимою областю". Протилежно, область, яка лежить поза цим діапазоном, де інтерференція не спостерігається, вважається "невидимою областю".

Для відстані між антенами  $d = 1.5\lambda, |u| \leq 3\pi$  стає видимою областю. У цьому випадку, крім  $u = 0$ , два піки при  $|u| = 2\pi$  також попадають в видиму область. Ці великі випромінювання відповідають періодичним дифракційним смугам, що викликаються ефектом оптичної дифракційної решітки. Їх часто називають "гратчастими пелюстками".

У антенних решітках, коли відстань між елементами збільшується, зменшується взаємний зв'язок між ними, що призводить до виходу вузьких променів. При розширенні відстані між елементами в межах фіксованого розміру апертури кількість елементів зменшується, спрощуються схеми живлення і знижуються витрати на виробництво. Отже, перевага віддається конструкціям антен, які пропонують якомога більший інтервал між елементами. Проте,

надмірно широкі відстані між антенами можуть спричиняти ефект ґратчастих пелюсток. Це викликає випромінювання під небажаними кутами, погіршення підсилення під бажаним кутом та зниження відношення сигнал/шум разом із вхідним опором антени елемента. Конструкції антенних решіток зазвичай розширюють відстань між елементами до того моменту, коли пелюстки решітки стають помітними в видимій області [22].

Для одновимірного РАА, де головний промінь сканується, відстань між антенами  $d$  обчислюється, використовуючи наступне. Спочатку, зв'язок між змінною  $u$  та кутом  $\theta_0$ , що визначає напрямок основного променя, встановлюється згідно з рівнянням (3.6):

$$u = kd (\sin \theta - \sin \theta_0) . \quad (3.6)$$

Якщо припустити, що кут  $\theta_0 \geq 0$ , то абсолютне значення  $|u|$  досягає максимуму при  $\theta = -\pi/2$ . Це призводить до такого рівняння:

$$|u|_{max} = \frac{2\pi}{\lambda} d (1 + \sin \theta_0) . \quad (3.10)$$

Перша пелюстка решітки виникає при  $|u| = 2\pi$ . Пелюстки решітки не потрапляють у видиму область, якщо виконується така нерівність:

$$\frac{2\pi}{\lambda} d (1 + \sin \theta_0) \leq 2\pi . \quad (3.11)$$

За допомогою рівняння (3.11) можна визначити максимальну допустиму відстань між антенами, при якій відсутні пелюстки решітки:

					КВРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$d = \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_0} \quad (3.12)$$

Якщо відстань між елементами антени,  $d$ , вибрана так, щоб задовольнити рівняння (3.12), де  $\theta_0$  є верхньою межею кута сканування, то жодна пелюстка решітки не з'являється у видимій області. Однак, якщо відстань між елементами,  $d$ , визначена згідно з рівнянням (3.12), то піки перших пелюсток решітки розташовані на межах видимої області. Для повного усунення пелюсток решітки, включаючи їхні плечі, антенні відстані повинні бути менші на 5–10% від значень, отриманих з рівняння (3.12), що є загальноприйнятими.

Використовуючи рівняння (3.12), співвідношення між відстанню між антенами та кутом головного променя з першою пелюсткою решітки при  $\theta = -\pi/2$  показано на рис. 3.4. Коли використовується  $d/\lambda = 0,5$ , пелюстка решітки не з'являється в межах кута сканування  $\pm \pi/2$ .

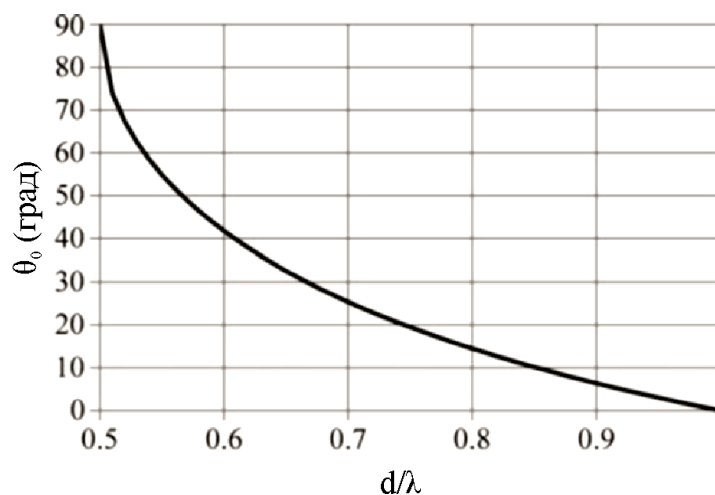


Рисунок 3.4 – Залежність між розміром апертури антени та кутом основного променя з першими пелюстками решітки на межах видимої області

Якщо допускається наявність пелюсток решітки в межах видимої області, то відношення між кутом пелюсток решітки  $\theta_g$  і кутом  $\theta_0$  головного променя визначається так:

$$\frac{2\pi}{\lambda} d (\sin \theta_g - \sin \theta_0) = -2\pi \quad (3.13)$$

$$\sin \theta_g = \sin \theta_0 - \frac{\lambda}{d} \quad (3.14)$$

Це представлено на рисунку 3.5.

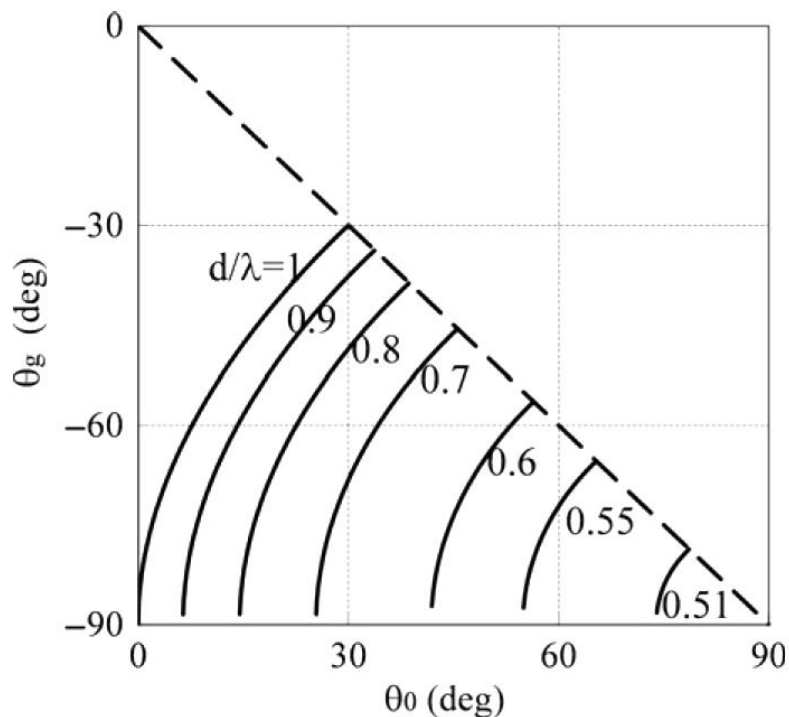


Рисунок 3.5 – Зв'язок між кутом головного променя та кутом пелюстка решітки для різних відстаней між антенами

Коли елементні антени на рисунку 3.2 моделюються як точкові джерела хвиль, їх амплітуди рівномірні, кількість елементів ( $N$ ) велика, і відстань між

антенами  $d$  вибрана так, щоб уникнути виникнення бічних пелюсток решітки. Спрямованість результуючої лінійної антени, позначена як  $D_l$ , визначається як

$$D_l = \frac{2Nd}{\lambda} . \quad (3.15)$$

Спрямованість визначається за допомогою діаграми спрямованості, яка відображає розподіл енергії в просторі. У цьому виразі не враховані втрати кіл живлення та ефективність елементних антен, оскільки вони не впливають на розподіл енергії в просторі.

Зазвичай діаграми спрямованості одноелементних антен мають широкий розподіл енергії, тобто низьку спрямованість, що не завжди підходить для міжміського зв'язку, де потрібні антени з високою спрямованістю. Одним із способів досягнення цього є збільшення розмірів випромінювальної апертури, але це може призвести до появи бічних пелюсток та складнощів у виготовленні через великий розмір антени. Іншим ефективним методом є побудова антени у вигляді решітки, яка складається з численних елементів, розміщених у відповідній конфігурації. Такий підхід дає можливість досягти високої спрямованості без необхідності у великому розмірі антени.

У решіткових антеннах окремі елементи можуть бути різних типів, але зазвичай вони є ідентичними, що спрощує проектування. Загальне поле решітки формується суперпозицією полів, випромінюваних окремими елементами. Для досягнення високої директивності необхідно, щоб поля, створені окремими елементами, конструктивно втручалися у потрібному напрямку і деструктивно втручалися в інші напрямки. Шість факторів впливають на загальну діаграму спрямованості решіткової антени: тип решітки, загальний розмір решітки, взаємне розміщення елементів, амплітуда та фаза збудження кожного елемента, а також індивідуальні характеристики кожного елемента.

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.5 Висновок до третього розділу

У даному розділі представлено докладний аналіз дискретних лінійних масивів, що охоплює їх структуру, принципи функціонування та характеристики. Далі розглядається класифікація типів антенних решіток, включаючи їхню роль у різноманітних застосуваннях в сучасних комунікаційних системах. Висвітлюються основні аспекти роботи цих решіток, а також їх важливість у підтримці бездротового зв'язку на рівні вимог сучасних технологій. Крім того, надається огляд характеристик лінійної антенної решітки, що доповнює розуміння її функціонування та можливостей застосування.

					КВРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

## 4 КОНСТРУКЦІЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ АНТЕНИ ДЛЯ СИСТЕМ 5G У МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ ХВИЛЬ

Технологія 5G відкриває нові можливості у сфері бездротового зв'язку, пропонуючи високу швидкість передачі даних і низьку затримку по всьому каналу зв'язку. Ця технологія розділена на два основних діапазони: діапазон частот нижче 6 ГГц і міліметрові хвилі (mmWave).

Діапазон частот нижче 6 ГГц вже зазнає значного тиску від ростучого навантаження на мікрохвильові програми. Це призводить до появи міліметрових хвиль як другого виділеного спектру. Діапазон міліметрових хвиль має необмежену пропускну здатність та є перспективним кандидатом для забезпечення широкої смуги пропускання, низької затримки та вищої пропускну здатності даних.

У діапазоні міліметрових хвиль вже було визначено кілька потенційних кандидатів на майбутні стандарти 5G, таких як діапазони 28 ГГц і 38 ГГц. Крім того, діапазони 57–64 ГГц (відомий як діапазон O2) і 164–200 ГГц (відомий як діапазон N20) оголошені як неліцензійні частоти, що також мають потенціал для використання в майбутніх бездротових мережах.

У статті [25] представлена чотириелементна антенна решітка з технологією MIMO, розроблена для застосувань у міліметровому діапазоні хвиль 5G на центральній частоті 28 ГГц. Досліджена система має важливе значення для вдосконалення мереж 5G та підвищення їхньої продуктивності. Антенна решітка спроектована з урахуванням різноманітних просторових характеристик і характеристик розподілу сигналу, щоб забезпечити оптимальну ефективність системи. Проте, дослідження показало, що реалізоване посилення на рівні 5,5 дБі є недостатнім для досягнення високої продуктивності в мережах 5G.

У статті [26] також розглядається антенна решітка, призначена для діапазонів частот 28 ГГц і 38 ГГц. Вона має значний потенціал для підвищення

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

швидкості та ефективності мереж 5G. Проте, необхідно продовжувати дослідження з метою подальшого вдосконалення антенної системи та підвищення її пропускної здатності.

Зазначено, що в міліметровому діапазоні хвиль втрати на шляху стають критичними. У зв'язку з цим, дослідження зосереджене на розробці антенних решіток з високим коефіцієнтом посилення, які компенсують ці втрати та забезпечують стабільну та ефективну передачу сигналів.

Наприклад, в статті [27] описано використання чотирьохелементного масиву SIW у формі шестигранної петлі, який відзначається високим коефіцієнтом посилення 12 дБі та ефективним випромінюванням. Аналогічно, в статті [28] повідомляється про наявність антени з резонатором SIW, яка має велику смугу пропускання на частоті 28 ГГц.

У статті [29] представлена антенна решітка з 8 елементами SIW із резонатором, яка відзначається низькими рівнями бічних пелюсток та високими характеристиками діаграми спрямованості та коефіцієнта підсилення. Ці дослідження демонструють потенціал антенних решіток для поліпшення продуктивності мереж 5G та забезпечення стійкого та ефективного зв'язку у міліметровому діапазоні хвиль. Антена забезпечує хороші діаграми спрямованості та коефіцієнт підсилення близько 13 дБі, але смуга пропускання 2,3 ГГц досягається лише з великим розміром  $63,5 \times 70 \text{ мм}^2$

З іншого боку, планарні антенні решітки відомі своєю простотою виготовлення та складання, що робить їх привабливими для використання у різних застосуваннях та електронних пристроях [30-34]. Хоча вони можуть мати певні втрати в лініях передачі, ці втрати можуть бути знехтувані або зменшені до мінімуму за допомогою ретельного проектування та моделювання.

Наприклад, в статті [35] описана фазована решітка з дев'ятьма елементами, яка демонструє значні показники посилення, наближаючись до 15 дБі.

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Незважаючи на свою простоту та компактний розмір  $400 \text{ мм}^2$ , ця антенна має обмежену пропускну здатність, що може стати обмеженням для деяких додатків.

У дослідженні [36] використовується проста трьохелементна плоска мікросмужкова фазована антена, яка характеризується високим показником посилення (15,6 дБі) та широкою смугою пропускання 1,7 ГГц. Ця антена має невеликий розмір  $20 \times 20 \text{ мм}^2$ , що робить її ідеальним варіантом для компактних електронних пристроїв.

В статті [37] представлена двоелементна планарна структура МІМО, яка працює у різних діапазонах mmWave – 27 ГГц і 39 ГГц. Незважаючи на її невеликий розмір  $26 \times 11 \text{ мм}^2$ , показник посилення антени (5 дБ) є нижчим порівняно з іншими дослідженими антенами. Однак для ефективної роботи систем mmWave важливо забезпечити широку смугу пропускання та високий рівень посилення, що дозволить подолати атмосферні впливи та множинність променів.

Як вже було зазначено, в технології 5G важливо мати антенні системи, які забезпечують високий коефіцієнт підсилення, широку смугу пропускання та низьку затримку, подолання багатопроменевого завмирання та атмосферного тиску. Це стає важливим мотивом для цієї роботи. У ній пропонується проста та легка у виготовленні плоска структура з простою мікросмужковою мережею живлення, спрямована на вирішення цих проблем.

Це дослідження представляє нову, проте просту планарну структуру з простою мережею живлення з 4-елементного масиву для додатків mmWave. Основний акцент робиться на простоті та доступності цієї системи, яка не ускладнює інтеграцію з іншими компонентами. Враховуючи складність систем на основі SIW, ця проста та ефективна структура стає особливо привабливою.

Варто відзначити, що ця система демонструє подвійну радіаційну реакцію на передній і задній сторонах, а також пікове посилення понад 11 дБі. Це свідчить

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

про потенційне використання запропонованого масиву у майбутніх широкосмугових застосуваннях mmWave.

#### 4.1 Проектування простої та ефективної антени

Перед тим як досліджувати антенну решітку, яка зображена на рисунку 4.1, важливо ретельно ознайомитися з конструкцією, принципом роботи та результатами для окремого елемента. Мета цього етапу полягає у зрозумінні принципів функціонування системи на основному рівні та обговоренні процесу розробки кінцевого продукту.

Одиничний елемент був розроблений на підкладці Rogers-5880 з відносною діелектричною проникністю 2,2 і тангенсом втрат 0,0009. Загальні розміри одного елемента становлять  $8 \times 10 \times 0,254$  мм<sup>3</sup>, при цьому товщина мідної плівки складає 0,035 мм. Кожен елемент містить лінію живлення, елемент випромінювання у формі бульбика та часткову площину заземлення з квадратними щілинами.

У таблиці 4.1 подано детальний опис конструктивних параметрів окремого елемента антени. Врахування цих параметрів дозволяє отримати повну картину проектування та функціональних характеристик окремого елемента антени

Візуальне представлення конструкції антени важливо для належного розуміння її конструкції та принципу роботи. На рисунку 4.1 наведено зображення запропонованої конструкції антени, яке допомагає зрозуміти її будову та функціональність. На рис. 4.1а показано вигляд спереду, а на рис. 4.1б – вид ззаду. Ці зображення ілюструють основні компоненти та архітектуру антенної системи, що дозволяє отримати уявлення про розташування та взаємозв'язок між її елементами.

Графічне представлення антени допомагає візуалізувати її структуру та внутрішню організацію. Вигляд спереду та ззаду дає можливість оцінити

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

розміри, форму та розташування ключових елементів, таких як патч-антена, заземлення та інші деталі, що є важливими для розробки та оптимізації антенної системи. Таке візуальне подання сприяє кращому розумінню конструкції антени та полегшує аналіз її характеристик.

Конструкція та оптимізація антени для систем 5G у міліметровому діапазоні хвиль

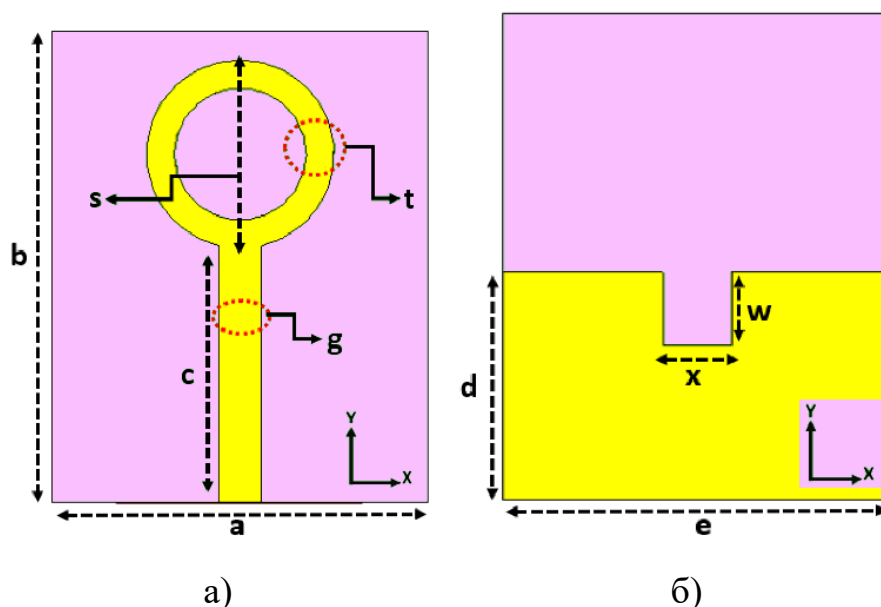


Рисунок 4.1 – Запропонована антенна конструкція з різних ракурсів: а) – зображення з переднього ракурсу та б) – зображення з заднього ракурсу

Таблиця 4.1 – Параметри конструкції

Параметр	Значення в мм	Параметр	Значення в мм
a	8	b	10
c	6	g	0,9
s	1.5	t	0,6
d	4.65	e	8
w	1.5	x	1.5

На рисунку 4.2 наведено послідовні етапи еволюції окремих елементів антени, що вказують на процес оптимізації її конструкції. Починаючи з

проекування заглушки, спостерігається зміна коефіцієнта відбиття. Заглушка використовується для підготовки антени до резонансу на певній частоті та для контролю характеристик відбиття.

Далі, до кінця заглушки додається круг, щоб антена могла резонувати у відповідному діапазоні частот. Цей етап включає в себе додавання додаткових елементів для досягнення бажаного діапазону резонансу та узгодження імпедансу антени з джерелом живлення.

Нарешті, ще один круг додається до попереднього та знову віднімається. Ця конструкція резонує на частоті 28 ГГц зі смугою пропускання 6 ГГц у діапазоні від 26 ГГц до 32 ГГц, як це показано на рисунку 4.2. Цей процес дозволяє досягти оптимальних параметрів антени для відповідного діапазону частот та забезпечити необхідну продуктивність.

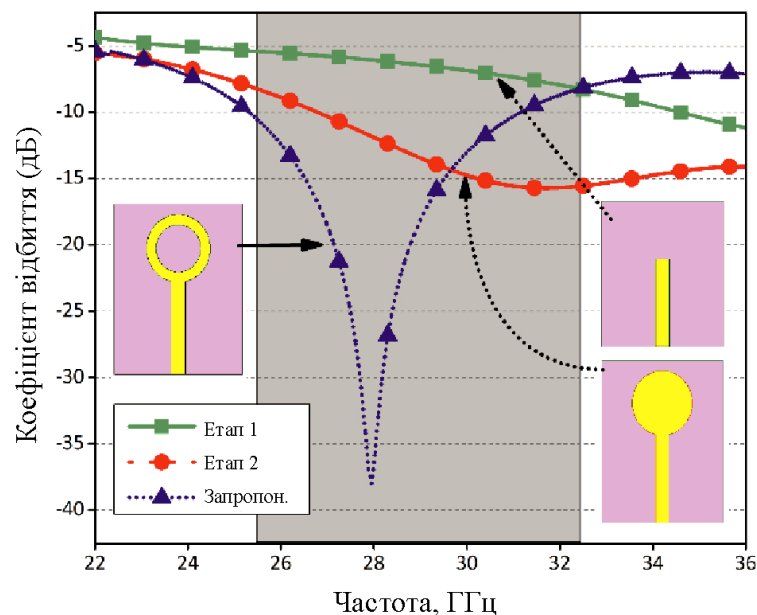


Рисунок 4.2 – Чотири етапи розвитку конструкції

Важливо відзначити, що під час моделювання було частково заземлено площу та видалено квадратну проріз. Цей єдиний елемент працює як проста кругла патч-антена, але з частковою заземленою площею. Це зроблено для

досягнення подвійної діаграми випромінювання у бажаному діапазоні частот, що підвищує продуктивність та ефективність антенної системи.

У дослідженні, показаному на рисунку 4.3, вивчався розподіл поверхневого струму для окремого елемента антени. Це відобразалося на подальших дослідженнях, що включали проведення різноманітних параметричних випробувань для вивчення впливу різних конструктивних змінних на продуктивність антени. Ці випробування включали аналіз S-параметрів, який показаний на рисунку 4.4.

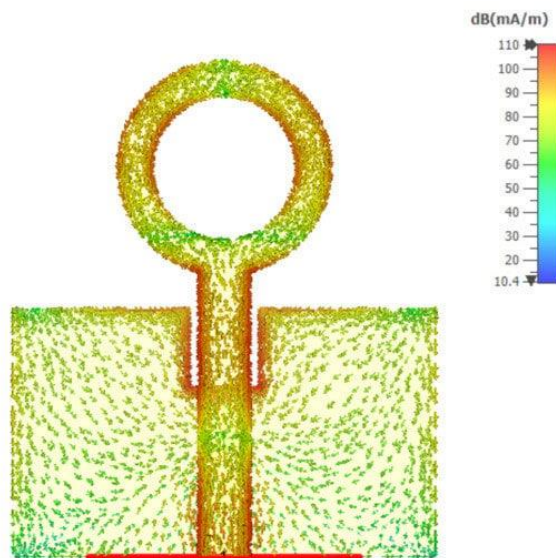


Рисунок 4.3 – Розподіл поверхневих струмів

Перша частина досліджень включала зміну ширини між двома колами. Параметр "t" змінювався від 1,2 мм до 1,4 мм з кроком 0,1 мм. Виявлено, що зі збільшенням ширини частота зміщується від вищого краю діапазону до нижнього. Крім того, покращувався імпеданс антени, що забезпечувало краще узгодження, як показано на рисунку 4.4а.

Друга частина досліджень стосувалася впливу прямокутної форми прорізу в заземленій площині. Змінна "x" варіювалася для п'яти різних значень від 1,3 мм до 1,7 мм.

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61



що може бути корисним у випадках, коли потрібно підтримувати зв'язок на низьких частотах.

Після завершення параметричних досліджень та вибору оптимальних параметрів, S-параметри остаточного окремого елемента були показані на рисунку 4.4г. Це вказує на успішну оптимізацію антени та визначення її характеристик після вивчення різних конструктивних параметрів.

На рисунку 4.5 зображено випромінювання, загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) і посилення запропонованого окремого елемента. Слід зазначити, що ефективність становить понад 90%, а посилення складає приблизно 4 дБі. Надалі будуть ретельно розглянуті різні ключові параметри ефективності запропонованої антенної решітки.

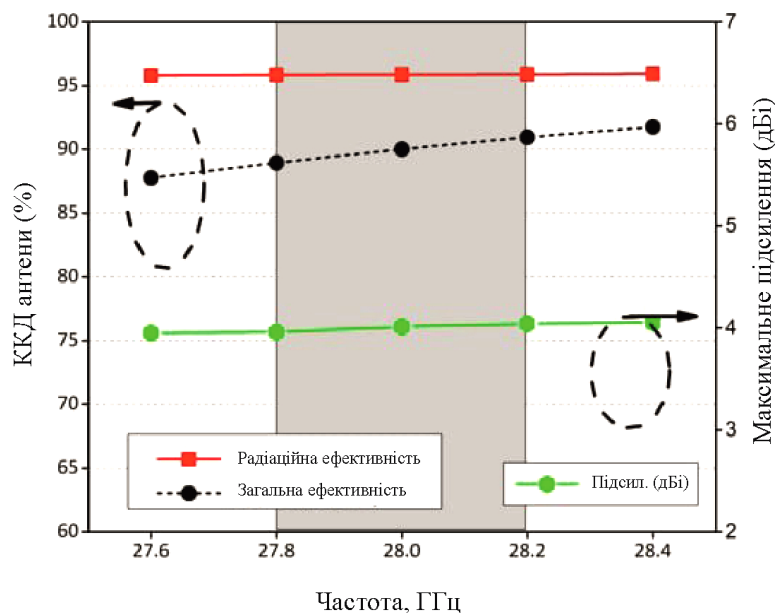


Рисунок 4.5 – Показники ефективності запропонованої антени

Як раніше обговорювалося, на основі прийнятної продуктивності окремого елемента, було розроблено лінійний масив з використанням простої структури подачі. Ця структура включає лінію живлення, яка складається з лінії передачі 50 Ом, яка поділяється на паралельне з'єднання 100 Ом, а потім на лінії 70 Ом,



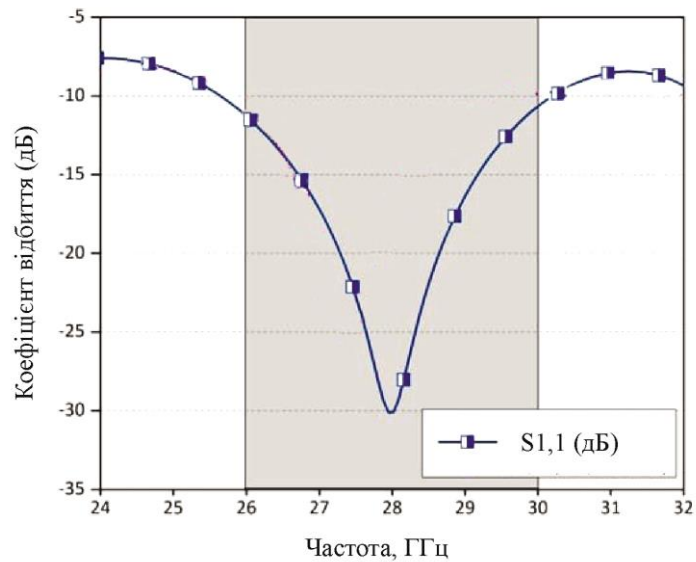


Рисунок 4.7 – Змодельований коефіцієнт відбиття запропонованої антенної решітки

На рисунку 4.8 показано розподіл поверхневого струму для антенної системи на частоті 28 ГГц. Цей розподіл відображає симетричне розподілення струму між випромінюючими елементами, що свідчить про правильність функціонування системи. Це важливе спостереження підтверджує, що антенна система працює відповідно до спроектованих параметрів та очікувань.

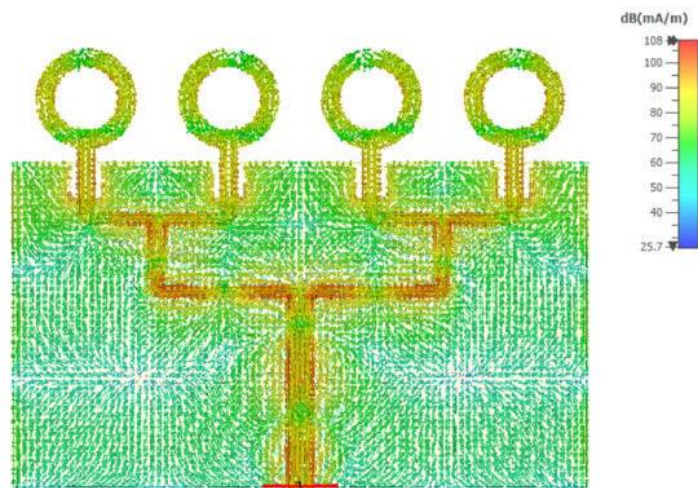


Рисунок 4.8 – Розподіл поверхневого струму масиву

Змодельовані поля дальньої зони системи для кутів спостереження  $\phi = 0^\circ$  та  $\phi = 90^\circ$  наведено на рисунку 4.9. Вони відображають важливі характеристики випромінювання антени у різних площинах. Наприклад, поля, що випромінює антена у площині  $y-z$ , майже круглі з нульовими значеннями кута  $\theta$  при  $\pm 90^\circ$ . Аналогічно, візерунок у площині  $x-z$  є напрямним з шириною променя приблизно  $40^\circ$ .

Цей профіль дальнього поля свідчить про те, що антена може бути ефективно використана в технологіях 5G, де важливо мати однакові характеристики випромінювання як для передньої, так і для задньої сторін антени. Такий профіль поля дозволяє забезпечити однакову якість сигналу у всіх напрямках, що важливо для забезпечення надійного зв'язку в 5G мережах.

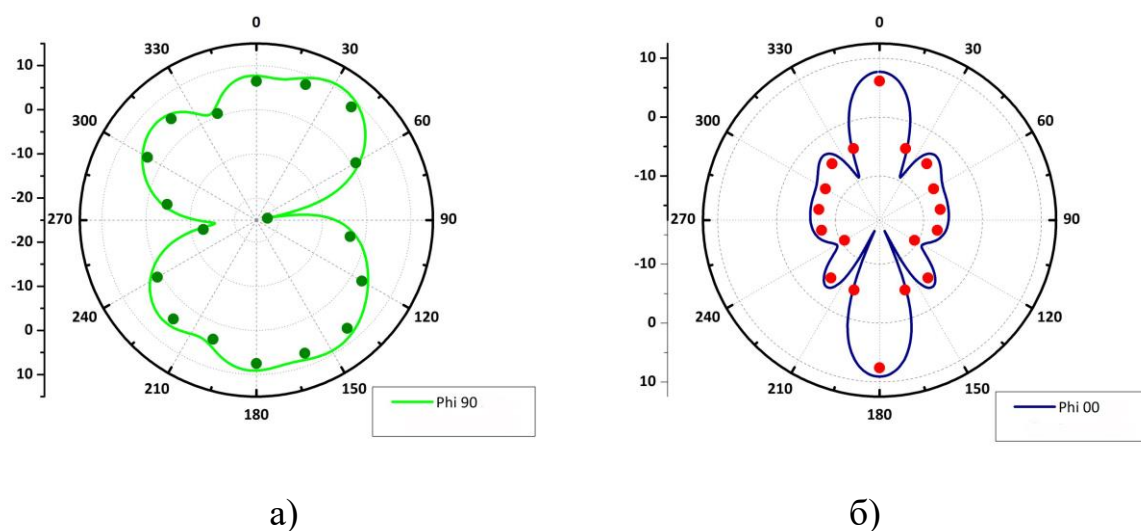


Рисунок 4.9 – Змодельовані діаграми випромінювання:

а) – кут  $90^\circ$  та б) – кут  $0^\circ$

Крім того, тривимірна схема дальнього поля для запропонованої системи представлена на рисунку 4.10 для кращого уявлення. Це допомагає отримати більш повне уявлення про розподіл поля далеко від антени та її випромінювальні характеристики в просторі.



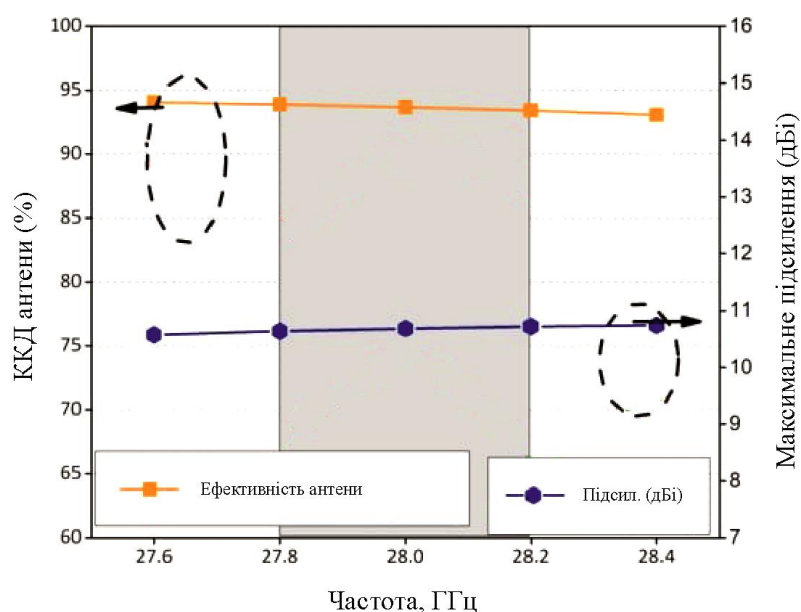


Рисунок 4.11 – Параметр продуктивності запропонованого масиву

Таблиця 4.2 – Порівняльний аналіз

Відомі антени	Пропускна здатність (ГГц)	Розмір Д × Ш (мм)	Елементи антени	Конфігурація	Підсилення (дБі)	ККД (%)
МІМО система нескінченної оболонки в mmWave діапазоні	1.9	29,9 × 29,5	4	Площинна	5.5	80
Дводіапазонна mmWave антена Е-подібної форми Н-прорізу	0,45	20 × 22	4	Площинна	6.5	75
Широкопasmовога дротова шестикутна антенна решітка	5	23 × 24	4	SIW	10	82
Антенна решітка з інтегрованим хвилеводом	2.2	70 × 63,5	4	SIW	14	62
Широкопasmовога вузькопasmовенева антена з високим коефіцієнтом підсилення	3	20 × 45	4	SIW	10.5	83
Планарна дводіапазонна 27/39 ГГц міліметрова МІМО	0,6	20 × 27	4	Площинна	9	89
Запропоновано	4	20 × 22	4	Площинна	10.2	90

#### 4.3 Висновок до четвертого розділу

У даному розділі представлено проектування простої та ефективної антени для використання в системах 5G у міліметровому діапазоні хвиль. Запропонована конструкція є доступною з точки зору вартості та легкою у виготовленні та інтеграції. Вона складається з сегмента кільця з квадратним вирізом, який вигравірується у верхній середній частині часткової площини заземлення. Щоб підвищити експлуатаційні характеристики, конструкція трансформується в чотириелементний масив з живильною мережею. За результатами моделювання, система демонструє високу ефективність з коефіцієнтом корисної дії 90%, посиленням понад 10 дБі та подвійним променевим профілем дальнього поля. Використання такої антенної системи може значно поліпшити зв'язок в мережах 5G і забезпечити стабільну та швидку передачу даних.

					КВРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

## ВИСНОВКИ

У даній роботі пропонується проста, ефективна, доступна з точки зору вартості та легка у виготовленні та інтеграції антенна система, призначена для використання в мережах 5G. Запропонована структура призначена для резонансу на центральній частоті 28 ГГц та складається з сегмента кільця з квадратним вирізом, який вигравірується у верхній середній частині часткової площини заземлення. Щоб підвищити експлуатаційні характеристики, запропонована конструкція трансформується в чотириелементний масив з живильною мережею. За результатами моделювання, система має коефіцієнт корисної дії 90%, посилення понад 10 дБі та подвійний променевий профіль дальнього поля. Враховуючи ці характеристики, можна стверджувати, що ця система знайде своє застосування в майбутніх мережах та підсистемах 5G.

Однією з ключових переваг запропонованої топології є її простота і ефективність. Використання сегмента кільця з квадратним вирізом у верхній середній частині часткової площини заземлення дозволяє досягти резонансу на центральній частоті 28 ГГц та забезпечити високу ефективність антенної системи. Ця проста конструкція сприяє зниженню вартості виробництва та спрощує процес інтеграції у різноманітні пристрої та обладнання.

Трансформація структури в чотириелементний масив з живильною мережею є ще однією важливою перевагою. Це дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики системи, зокрема, досягнути високого коефіцієнта корисної дії до 90% і посилення понад 10 дБі. Такий масив забезпечує покращену дальню зону покриття і збільшує стабільність зв'язку у мережах 5G.

В процесі дослідження використовувалися як теоретичні, так і експериментальні методи для вивчення характеристик та ефективності

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

запропонованої топології. Теоретичні методи дозволили виконати детальне моделювання системи та розрахувати її параметри, а експериментальні дослідження підтвердили отримані результати та продемонстрували можливість практичного використання антенної системи у мережах та підсистемах 5G. Цей підхід забезпечує надійність та достовірність отриманих результатів, підтримуючи довіру до розробленої технології.

					КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Лінії радіозв'язку та антенні пристрої. Навчальний посібник / [М.Д. Ільїнов, Т.Г. Гурський, І.В. Борисов, К.М. Гриценко]. – К.: ВІТІ, 2018. – 250 с.
2. Одарченко Р. С. Ключові напрямки досліджень стільникових мереж на шляху до 6G (огляд) // Р. С. Одарченко, Т. В. Дика, О. В. Жарова, М. С. Одарченко, В. М. Жога, О. П. Слободян – Наукоємні технології No 3(55), 2022, с. 215-228.
3. Кравченко В. І. Дослідження роботи бездротової системи 5G при різних умовах навколишнього середовища // Наук. зап. Укр. н.-д. ін-ту зв'язку. – 2019. – № 4.
4. Kiani, S.H.; Altaf, A.; Abdullah, M.; Muhammad, F.; Shoaib, N.; Anjum, M.R.; Damaševičius, R.; Blažauskas, T. Eight Element Side Edged Framed MIMO Antenna Array for Future 5G Smart Phones. *Micromachines* 2020, 11, 956.
5. Przesmycki, R.; Bugaj, M.; Nowosielski, L. Broadband Microstrip Antenna for 5G Wireless Systems Operating at 28 GHz. *Electronics* 2021, 10, 1.
6. Hilt, A. Availability and Fade Margin Calculations for 5G Microwave and Millimeter-Wave Anyhaul Links. *Appl. Sci.* 2019, 9, 5240.
7. Kamal, M.M.; Yang, S.; Ren, X.c.; Altaf, A.; Kiani, S.H.; Anjum, M.R.; Iqbal, A.; Asif, M.; Saeed, S.I. Infinity Shell Shaped MIMO Antenna Array for mm-Wave 5G Applications. *Electronics* 2021, 10, 165.
8. Ван, Х. Зв'язок на міліметрових хвилях: комплексне дослідження // Конг, Л.; Конг, Ф.; Цю, Ф.; Ся, М.; Арнон, С.; Чен, Г. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2018, 20, 1616–1653.
9. Чакраборті, Р.; Кумарі, Н.; Мусам, М.; Мукерджі, А. Майбутнє 5G і міліметрових хвиль. У матеріалах Другої міжнародної конференції з електроніки, зв'язку та аерокосмічних технологій 2018 р. (ICESA), Коїмбатор, Індія, 29–31 березня 2018 р.; С. 1679–1683.
10. Сінгх, Р. За межами 5G: роль терагерцової спектру // Лер, В.; Сікер, Д.; Гук, С.М. – Доступно в Інтернеті: <https://ssrn.com/abstract=3426810/>

						КвРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			72

11. Жорнет, Дж.М.; Акйилдиз, І.Ф. Плазмонічна наноантена на основі графену для зв'язку в терагерцовому діапазоні в наномережах. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2013, 31, 685–694.

12. Фейсал А. Надмасивні системи МІМО на терагерцевих діапазонах: перспективи та виклики // Фейсал, А.; Sardeddeen, Н.; Dahrouj, Н.; Аль-Наффурі, Т.Й.; Алуїні, М.С. / arXiv 2019, arXiv:1902.11090.

13. Сивик О. С. Аналіз напрямків розвитку майбутніх телекомунікаційних технологій // *Зв'язок.* - 2021. - № 3.

14. Raheel, K.; Altaf, A.; Waheed, A.; Kiani, S.H.; Sehrai, D.A.; Tubbal, F.; Raad, R. E-Shaped H-Slotted Dual Band mmWave Antenna for 5G Technology. *Electronics* 2021, 10, 1019.

15. Ullah, H.; Tahir, F.A. A broadband wire hexagon antenna array for future 5G communications in 28 GHz band. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2019, 61, 696–701.

16. Choubey, P.N.; Hong, W.; Hao, Z.C.; Chen, P.; Duong, T.V.; Mei, J. A wideband dual-mode SIW cavity-backed triangular-complimentary-split-ring-slot (TCSRS) antenna. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2016, 64, 2541–2545.

17. Park, S.J.; Shin, D.H.; Park, S.O. Low side-lobe substrate-integrated-waveguide antenna array using broadband unequal feeding network for millimeter-wave handset device. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2015, 64, 923–932.

18. Ullah, H.; Tahir, F.A. A Novel Snowflake Fractal Antenna for Dual-Beam Applications in 28 GHz Band. *IEEE Access* 2020, 8, 19873–19879.

19. Zhang, J.; Ge, X.; Li, Q.; Guizani, M.; Zhang, Y. 5G millimeter-wave antenna array: Design and challenges. *IEEE Wirel. Commun.* 2016, 24, 106–112.

20. Yang, B.; Yu, Z.; Dong, Y.; Zhou, J.; Hong, W. Compact tapered slot antenna array for 5G millimeter-wave massive MIMO systems. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2017, 65, 6721–6727.

21. Shoaib, N.; Shoaib, S.; Khattak, R.Y.; Shoaib, I.; Chen, X.; Perwaiz, A. MIMO antennas for smart 5G devices. *IEEE Access* 2018, 6, 77014–77021.

22. Jilani, S.F.; Alomainy, A. Millimetre-wave T-shaped antenna with defected ground structures for 5G wireless networks. In *Proceedings of the 2016 Loughborough*

					КВРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Antennas & Propagation Conference (LAPC), Loughborough, UK, 14–15 November 2016; pp. 1–3.

23. Khalily, M.; Tafazolli, R.; Rahman, T.; Kamarudin, M. Design of phased arrays of series-fed patch antennas with reduced number of the controllers for 28-GHz mm-wave applications. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2015, 15, 1305–1308.

24. Ullah, H.; Tahir, F.A. A high gain and wideband narrow-beam antenna for 5G millimeter-wave applications. *IEEE Access* 2020, 8, 29430–29434.

25. Ali, W.; Das, S.; Medkour, H.; Lakrit, S. Planar dual-band 27/39 GHz millimeter-wave MIMO antenna for 5G applications. *Microsyst. Technol.* 2021, 27, 283–292.

26. Максимюк Т. А. Моделі конвергенції гетерогенних мереж мобільного зв'язку 5-го покоління на основі технології D2D // *Телекомунікац. та інформ. технології.* - 2015. - № 3.

27. Одарченко Р. С. Обґрунтування основних вимог до систем безпеки стільникових мереж 5-го покоління // *Безпека інформації.* - 2015. - № 3.

28. Степанов С. В. Важливість упровадження 5G // *Зв'язок.* - 2019. - № 2.

29. Русек, Ф. Розширення MIMO: можливості та виклики з дуже великими масивами // Русек, Ф.; Перссон, Д.; Лау, Б.К.; Ларссон, Е.Г.; Марцетта, Т.Л.; Едфорс, О.; Туфвессон, Ф. *Процес сигналу IEEE. Mag.* 2013, 30, 40–60.

30. Ларссон, Е.Г. Масивний MIMO для бездротових систем нового покоління // Ларссон, Е.Г.; Туфвессон, Ф.; Едфорс, О.; Т.Л. Марцетта / *IEEE Commun. Mag.* 2014, 186–195.

31. A. A. Althuwayb, M. Alibakhshikenari, B. S. Virdee, H. Benetatos, F. Falcone, and E. Limiti, “Antenna on chip (AoC) design using metasurface and SIW technologies for THz wireless applications,” *Electronics*, vol. 10, no. 9, 1120 pages, 2021.

32. B. S. Virdee and S. Salekzamankhani, “High-isolation antenna array using SIW and realized with a graphene layer for sub-terahertz wireless applications,” *Scientific Reports*, vol. 11, Article ID 10218, 2021.

					КВРТР.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

33. M. Alibakhshikenari, B. S. Virdee, M. Khalily et al., “High-gain on-chip antenna design on silicon layer with aperture excitation for terahertz applications,” IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 19, no. 9, pp. 1576–1580, 2020.

34. S. Zhang, A. A. Glazunov, Z. Ying, and S. He, “Reduction of the envelope correlation coefficient with improved total efficiency for mobile LTE MIMO antenna arrays: mutual scattering mode,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, no. 6, pp. 3280–3291, 2013.

35. L. Zhao and K.-L. Wu, “A dual-band coupled resonator decoupling network for two coupled antennas,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 7, pp. 2843–2850, 2015.

36. A. Zhao and Z. Ren, “Size reduction of self-isolated MIMO antenna system for 5G mobile phone applications,” IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 18, no. 1, pp. 152–156, 2019.

37. C. F. Ding, X. Y. Zhang, C.-D. Xue, and C.-Y.-D. Sim, “Novel pattern-diversity-based decoupling method and its application to m antenna,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 66, no. 10, pp. 4976–4985, 2018.

38. M. S. Khan, A. D. Capobianco, A. Naqvi, B. Ijaz, S. Asif, and B. D. Braaten, “Planar, compact ultra-wideband polarisation diversity antenna array,” IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 9, no. 15, pp. 1761–1768, 2015.

39. K.-L. Wong, C.-Y. Tsai, and J.-Y. Lu, “Two asymmetrically mirrored gap-coupled loop antennas as a compact building block for eight-antenna MIMO array in the future smartphone,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 4, pp. 1765–1778, 2017.

40. Iavich M., Gnatyuk S., Odarchenko R., Bocu R., Simonov S. (2021) The Novel System of Attacks Detection in 5G. In: Barolli L., Woungang I., Enokido T. (eds) Advanced Information Network- ing and Applications. AINA 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 226. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-75075-6\\_47](https://doi.org/10.1007/978-3-030-75075-6_47) (Scopus)

					КВРПТ.2021008.01.08 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

ДОДАТОК А  
Презентаційні матеріали



# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

## АНТЕННА РЕШІТКА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ 5G В МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ ХВИЛЬ

Виконав:  
здобувач 3 курсу, група ТР1с-21-1      Таран М.Р.

Науковий керівник:  
асистент      Норик В.Г.

### МЕТА:

оцінка ефективності та широкосмугових характеристик антенної решітки для її можливого використання у сучасних бездротових системах зв'язку

### ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ:

компактна кільцева щілинна антенна решітка для роботи на частоті 28 ГГц в міліметровому діапазоні

### АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ:

полягає у потребі розробки антенної решітки для оптимізації технології 5G, спеціально адаптованої до міліметрового діапазону хвиль



## ВІЗУАЛЬНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ АНТЕНИ ТА ОПИС ОКРЕМОГО ЕЛЕМЕНТА

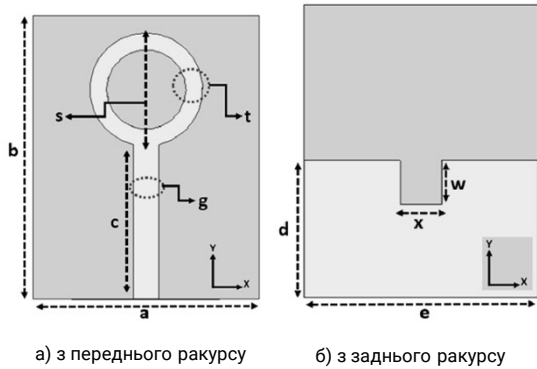


Рис. 1 – Запропонована антена конструкція з різних ракурсів

### Характеристики

Відносна діелектрична проникність матеріалу	$\epsilon = 2,2$
Тангенс втрат матеріалу	$\tan \delta = 0,0009$
Розміри елемента антенної решітки	8 мм × 10 мм × 0,254 мм
Товщина мідної плівки	0,035 мм

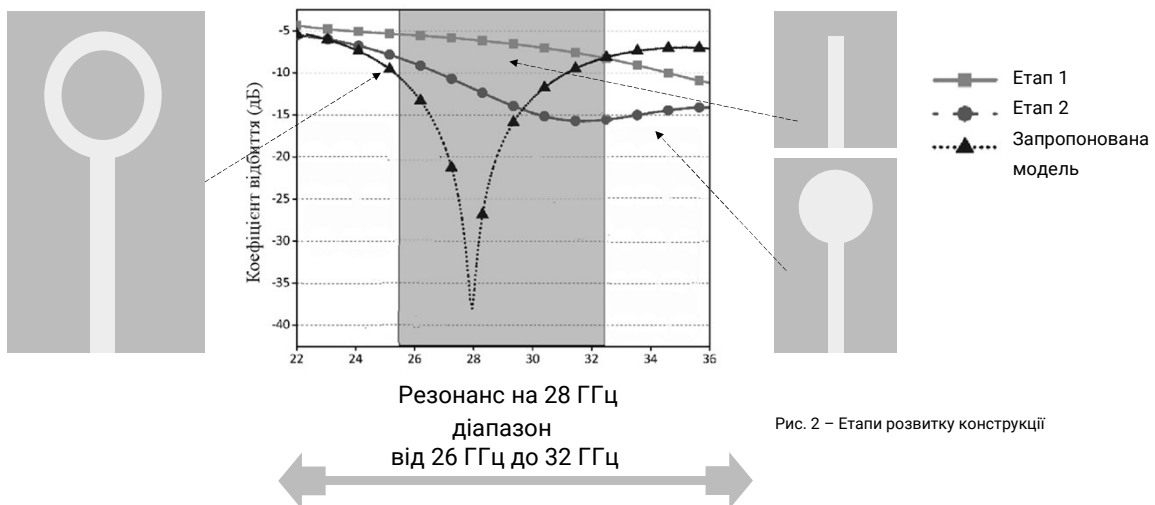
Таблиця 4.1 – Параметри конструкції

Параметр	Значення в мм	Параметр	Значення в мм
a	8	b	10
c	6	g	0,9
s	1,5	t	0,6
d	4,65	e	8
w	1,5	x	1,5

## ЕВОЛЮЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ АНТЕНИ: ОПТИМІЗАЦІЯ ТА РЕЗОНАННС

### Характеристики системи:

1. Проста у виготовленні та інтеграції.
2. Ефективна та доступна з точки зору вартості.
3. Призначена для використання в мережах 5G.



## Дослідження розподілу поверхневого струму та параметричні випробування

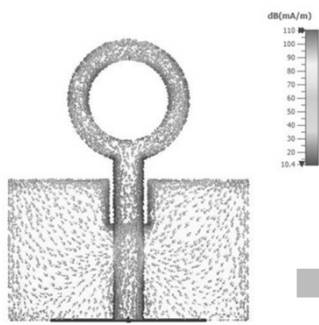


Рис.3 – Розподіл поверхневих струмів

Дослідження розподілу  
поверхневого струму

Аналіз S-параметрів та  
параметричні випробування

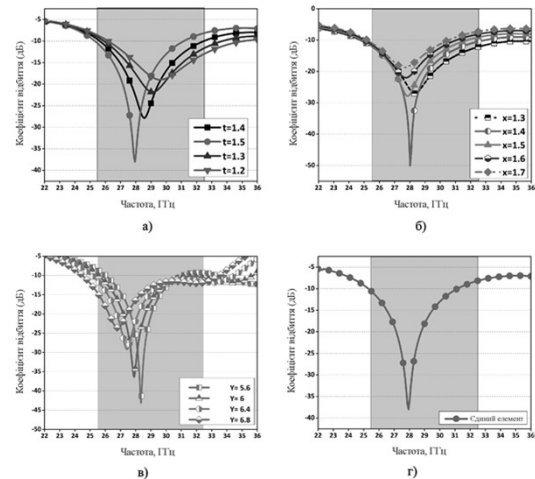


Рис. 4 – Аналіз коефіцієнта відбиття антени:  
а) Смуга 1 розмаху. б) Згортка смуги 2. в) Розгортка довжини подачі.  
г) Кінцевий одиничний елемент

## Дослідження впливу параметра "t" на характеристики антени

### Параметри досліджень:

- Параметр "t" (ширина між двома колами) змінювався від 1,2 мм до 1,4 мм з кроком 0,1 мм.

### Виявлені залежності:

- Зі збільшенням ширини "t" частота зміщується від вищого краю діапазону до нижнього.
- Імпеданс антени покращувався, що призводило до кращого узгодження

Цей аналіз дозволяє краще розуміти вплив ширини між колами на характеристики антени та оптимізувати її параметри для досягнення кращої продуктивності

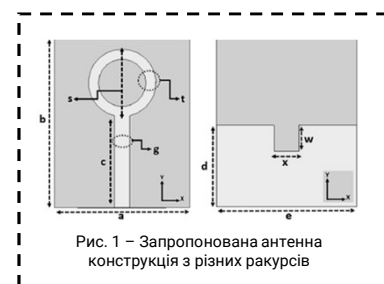


Рис. 1 – Запропонована антенна конструкція з різних ракурсів

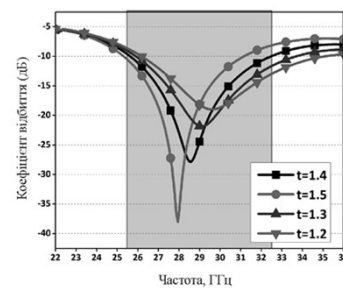


Рис. 4 – Аналіз коефіцієнта відбиття антени:  
а) залежність частоти та імпедансу антени від параметра "t"

## Дослідження впливу параметра "x" на характеристики антени

### Параметри досліджень:

- Змінна "x" (ширина прямокутної форми прорізу) варіювалася для п'яти різних значень від 1,3 мм до 1,7 мм.

### Виявлені залежності:

- Параметр "x" впливає на узгодження імпедансу між антеною та портом живлення.
- За допомогою змінної "x" можливо досягти кращого узгодження імпедансу, як показано на рис. 4б.

Це дослідження підкреслює можливість оптимізації характеристик антени шляхом варіювання параметрів конструкції, таких як ширина прорізу в заземленій площині

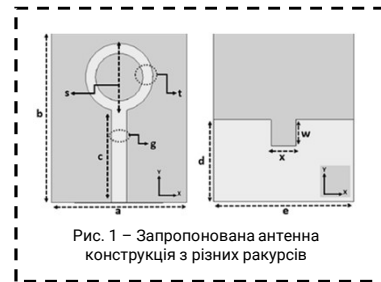


Рис. 1 – Запропонована антенна конструкція з різних ракурсів

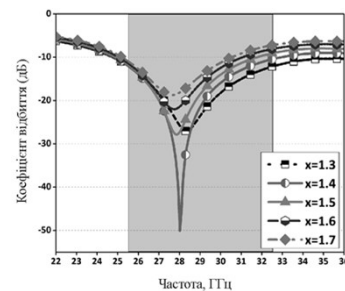


Рис. 4 – Аналіз коефіцієнта відбиття антени:  
б) залежність параметрів антени від значення "x"

## Дослідження впливу довжини каналу на характеристики антени

### Параметри досліджень:

- Зміна довжини каналу

### Виявлені залежності:

- Збільшення довжини каналу призводить до резонансу антени на нижчій частоті діапазону.
- Електрична та фізична довжина антени збільшуються, що призводить до зміни частоти резонансу.

Дослідження підтверджує, що збільшення довжини каналу антени може бути використано для досягнення резонансу на нижчій частоті, що може бути важливим для забезпечення зв'язку на низьких частотах.

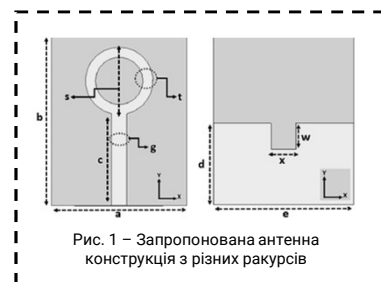


Рис. 1 – Запропонована антенна конструкція з різних ракурсів

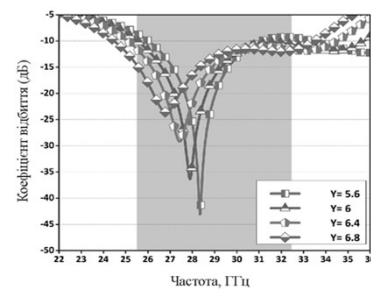


Рис. 4 – Аналіз коефіцієнта відбиття антени:  
в) залежність резонансної частоти антени від довжини каналу

## Визначення S-параметрів остаточного окремого елемента

### Параметри досліджень:

- Завершення параметричних досліджень.
- Вибір оптимальних параметрів антени.

### Показники успішної оптимізації:

- Представлення S-параметрів остаточного окремого елемента на рис. 4г.
- Відображення характеристик антени після вивчення різних конструктивних параметрів.

Це підтверджує успішну оптимізацію антени та визначення її характеристик на основі проведених досліджень

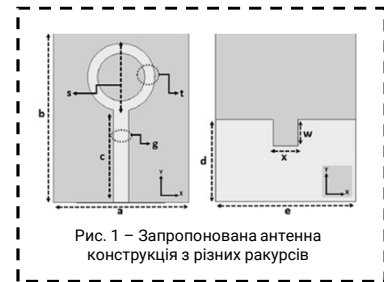


Рис. 1 – Запропонована антена конструкція з різних ракурсів

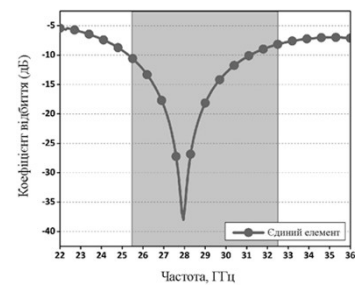


Рис. 4 – Аналіз коефіцієнта відбиття антени:  
г) Представлення S-параметрів остаточного окремого елемента

## Характеристики та структура лінійного масиву

- Ефективність становить понад 90%,
- Підсилення складає приблизно 4 дБі

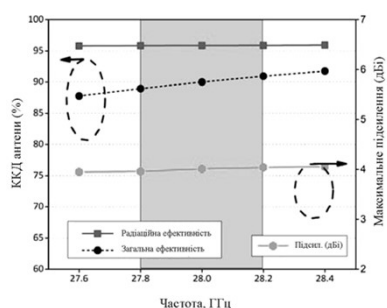


Рис. 5 – Показники ефективності запропонованої антени

- Лінія живлення, що складається з лінії передачі 50 Ом.
- Паралельне з'єднання 100 Ом.
- Лінія 70 Ом

### Опис структури:

- Складається з сегмента кільця з квадратним вирізом.
- Виріз вигравірується у верхній середній частині часткової площини заземлення.
- Конструкція трансформується в чотириелементний масив з живильною мережею для підвищення експлуатаційних характеристик.

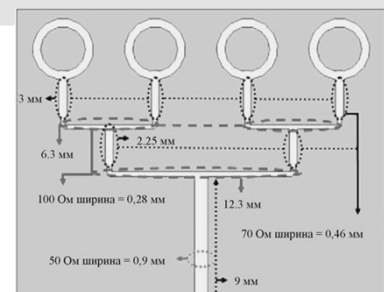


Рис. 6 – Перетворення лінійної решітки запропонованої антени

## Моделювання та аналіз результатів

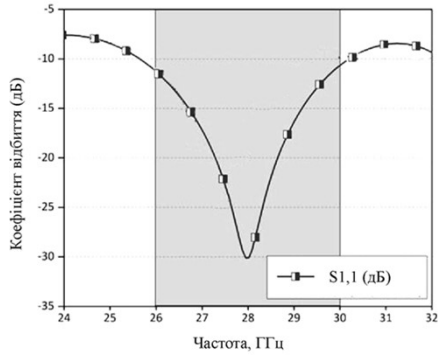
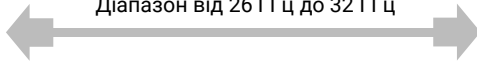


Рис.7 – Змодельований коефіцієнт відбиття запропонованої антенної решітки

Резонанс на 28 ГГц  
Діапазон від 26 ГГц до 32 ГГц



Розподіл поверхневого струму в масиві антен

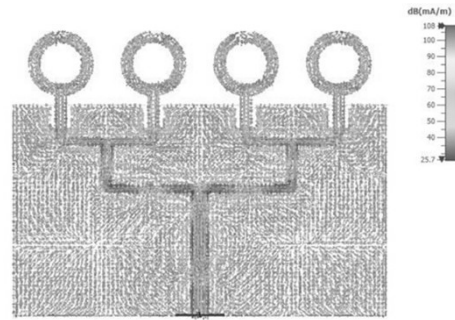


Рис. 8 – Розподіл поверхневого струму масиву

Кожна стрілка представляє напрямок та інтенсивність струму, що протікає по поверхні антен

## Характеристики випромінювання та тривимірна схема поля дальньої зони

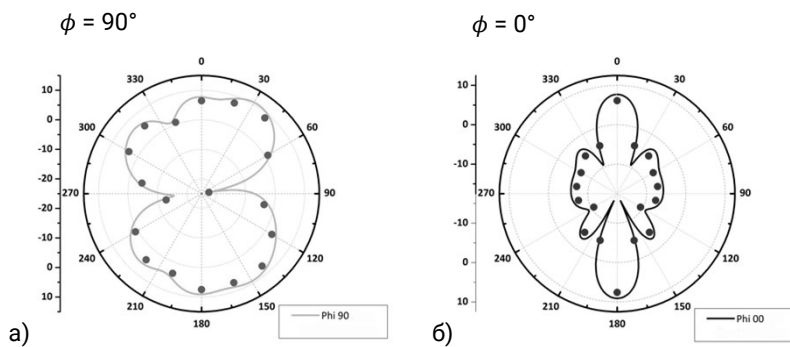


Рис. 9 – Змодельовані діаграми випромінювання: а) – кут 90°та б) – кут 0°

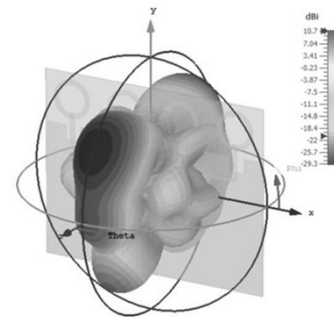


Рис.10 – 3D підсилення запропонованої решітки на 28 ГГц

## Результати та порівняння з попередніми дослідженнями

### Результати моделювання:

- Коефіцієнт корисної дії складає 90%.
- Посилення перевищує 10 дБі.
- Подвійний променевий профіль дальнього поля.

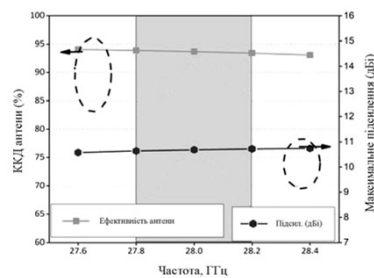


Рис.11 – Параметр продуктивності запропонованого масиву

Табл.2 – Порівняльний аналіз

Відомі антени	Пропускна здатність (ГГц)	Розмір Д × Ш (мм)	Елемент и антени	Конфігурація	Підсилення (дБі)	ККД (%)
МІМО система нескінченної оболонки в mmWave діапазоні	1.9	29,9 × 29,5	4	Площинна	5.5	80
Дводіапазонна mmWave антена E-подібної форми H-прорізу	0,45	20 × 22	4	Площинна	6.5	75
Ширококуткова дріткова шестигрупа антена решітка	5	23 × 24	4	SIW	10	82
Антена решітка з інтегрованим хвилеводом	2.2	70 × 63,5	4	SIW	14	62
Ширококуткова вузькопроменева антена з високим коефіцієнтом підсилення	3	20 × 45	4	SIW	10.5	83
Планарна дводіапазонна 27/39 ГГц міліметрова МІМО	0,6	20 × 27	4	Площинна	9	89
Запропоновано	4	20 × 22	4	Площинна	10.2	90

## ВИСНОВКИ

- Простота та ефективність конструкції:**  
Використання сегмента кільця з квадратним вирізом у верхній середній частині часткової площини заземлення дозволяє досягти резонансу на центральній частоті 28ГГц та забезпечує високу ефективність антенної системи.
- Зниження вартості та спрощення інтеграції:**  
Проста конструкція сприяє зниженню вартості виробництва та спрощує процес інтеграції у різноманітні пристрої та обладнання.
- Трансформація в чотириелементний масив:**  
Трансформація структури в чотириелементний масив з живильною мережею підвищує експлуатаційні характеристики системи.
- Високі характеристики системи:**  
Система досягає коефіцієнта корисної дії 90% та посилення понад 10 дБі, що забезпечує покращену дальню зону покриття та стабільність зв'язку у мережах 5G.
- Надійність та достовірність результатів:**  
Використання як теоретичних, так і експериментальних методів дослідження гарантує надійність та достовірність отриманих результатів, підтримуючи довіру до розробленої технології.

МІНІСТЕРСТВО ОВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Таран Максим Романович

Тема роботи: Антенна решітка для підвищення ефективності технології 5G в міліметровому діапазоні хвиль

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 74

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Метою кваліфікаційної роботи є вивчення та оцінка ефективності запропонованої антенної решітки з точки зору її ефективності, широкосмугових характеристик та подвійної променевої характеристики для можливого використання в сучасних бездротових системах зв'язку. У даній кваліфікаційній роботі розглянуто компактну кільцеву цілинну антенну решітку нового типу, спеціально розроблену для роботи в міліметровому діапазоні хвиль на частоті 28 ГГц. Запропонована має високу ефективність та широкосмугову характеристику пропускання від 26 до 32 ГГц.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Кваліфікаційна робота відповідає виданому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: У відповідності до технічного завдання у першому розділі детально висвітлено розвиток антенних технологій з акцентом на поточний стан та перспективи для майбутніх комунікаційних систем, зокрема 6G. У другому розділі проведено аналіз характеристик та вимог мереж 5G, що сприяє розумінню їхніх технологічних особливостей. Третій розділ присвячено детальному розгляду принципів роботи, класифікації та характеристик антенних решіток, важливих для побудови сучасних комунікаційних систем. У четвертому описано процес проектування, моделювання та аналізу ефективних антенних конструкцій, оптимізованих для роботи в міліметровому діапазоні хвиль.
4. Позитивні сторони роботи: Тема дослідження є надзвичайно актуальною, оскільки технологія 5G зараз знаходиться на стадії активного впровадження, а питання оптимізації антенних систем є ключовим для її успішної реалізації.

Результати роботи мають значний практичний потенціал, зокрема запропонована антенна система може бути використана в реальних умовах для підвищення ефективності мереж 5G. Робота демонструє високий рівень теоретичних знань автора, що підтверджується детальним розглядом всіх аспектів досліджуваної теми.

5. Негативні сторони роботи: Хоча моделювання є важливим, додаткові практичні експерименти могли б ще більше підтвердити результати теоретичних досліджень. Деякі результати могли б бути краще візуалізовані для більш наочного представлення інформації.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає


7. Відгук про роботу в цілому: Робота представляє значний внесок у розвиток антенних технологій для систем 5G. Вона є актуальною та практично значущою, демонструє високий рівень теоретичних знань і володіння методами моделювання. Результати дослідження можуть бути використані для подальшого розвитку та оптимізації бездротових мереж нового покоління, що робить роботу цінним вкладом у цю наукову галузь.

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка кваліфікаційної роботи: Кваліфікаційна робота відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки добре (3,75/С), а її автор Таран М.Р., присвоєння кваліфікації бакалавра зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка»

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

«14» червня 2024р.



підпис

Ім'я користувача:  
Кафедра АКІТІТК

Дата перевірки:  
18.06.2024 18:41:19 EEST

Дата звіту:  
19.06.2024 01:45:35 EEST

ID перевірки:  
1016372200

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

ID користувача:  
100005862

Назва документа: Таран\_антиплагіат

Кількість сторінок: 76 Кількість слів: 14405 Кількість символів: 109734 Розмір файлу: 6.29 MB ID файлу: 1016179469

1392 слова позначені як "вилучені" та не враховуються у підрахунку слів

## 0.75% Схожість

Найбільша схожість: 0.2% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1016179466)

0.48% Джерела з Інтернету

56

Сторінка 78

0.48% Джерела з Бібліотеки

12

Сторінка 78

## 0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

## 0% Вилучень

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

Немає вилучених Інтернет-джерел

0% Вилученого тексту з Бібліотеки

3

Сторінка 78

## Модифікації

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

Замінені символи

26

# Anti-Plagiarism v-15.257

**Максимальне співпадіння з одним документом 2.0%**

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилки в документах: 8%

ID: 131435 Назва: БКР Антенна решітка для підвищення ефективності технології 5G в міліметровому діапазоні хвиль Додано в БД: 2024-06-19 Автора: Максим ТАРАН Керівники: Віталій НОРИК Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	96159	719	2791 (3%)	28 (4%)

## Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

Завідувачу кафедри АКІТгаР  
д-ру техн. наук, проф. Мартиноку В.В.  
Таран М.Р.

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курсу, групи ТР1с-21-1

### ЗАЯВА

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

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

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

03.06.2024  
дата

  
підпис

**РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ  
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ ТА РОБОТОТЕХНІКИ  
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ**

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

Назва: Антенна решітка для підвищення ефективності технології 5G в міліметровому діапазоні хвиль

Автор: Таран Максим Романович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма: Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології

Науковий керівник: Норик Віталій Григорович, асистент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

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

Підтвердження:

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

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

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

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 0.75% і адресується до 56 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_

Валерій МАРТИНЮК  
Денис МАКАРИШКІН  
Віталій НОРИК