

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут електроенергетики
Факультет інформаційних технологій
Кафедра безпеки інформації та телекомунікацій

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня бакалавра

студента *Купріянова Кирила Вікторовича*

академічної групи *172-19-1*

спеціальності *172 Телекомунікації та радіотехніка*

спеціалізації¹

за освітньо-професійною програмою *Телекомунікації та радіотехніка*

на тему *Імітаційне моделювання випромінюючого пристрою для
технології 5G*

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	к.ф.-м.н., доц. Магро В.І.			
розділів:				
спеціальний	к.ф.-м.н., доц. Магро В.І.			
економічний	к.е.н., доц. Романюк Н.М.			
Рецензент				
Нормоконтролер	к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю.			

Дніпро
2023

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри
безпеки інформації та телекомунікацій
_____ д.т.н., проф. Корнієнко В.І.

« _____ » _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеня бакалавра

студенту Купріянову Кирилу Вікторовичу академічної групи 172-19-1
(прізвище ім'я по-батькові) _____ (шифр)

спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і назва спеціальності)

на тему Імітаційне моделювання випромінюючого пристрою для технології 5G

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 16.05.2023 № 350-с

Розділ	Зміст	Термін виконання
Розділ 1	Проаналізувати типи випромінюючих пристроїв для застосування в технології 5G	15.03.23-26.04.23
Розділ 2	Виконати імітаційне моделювання випромінюючого пристрою та провести розрахунок характеристик випромінювання даного пристрою	27.04.23 – 31.05.23
Розділ 3	Провести розрахунок вартості розробки випромінюючого пристрою для застосування в технології 5G та очікуваний час розробки даного пристрою	01.06.23 – 15.06.23

Завдання видано _____
(підпис керівника)

Магро В.І.
(прізвище, ініціали)

Дата видачі: _____

Дата подання до екзаменаційної комісії: _____

Прийнято до виконання _____
(підпис студента)

Купріянов К.В.
(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 72 с., 40 рис., 3 табл., 2 додатка, 29 джерел

Об'єкт дослідження – покращена трикутна мікросмужкова антена для роботи в діапазоні бездротової технології 5G.

Мета роботи – імітаційне моделювання випромінюючого пристрою що призначений для роботи в середньому діапазоні бездротової технології 5G.

Методи дослідження: імітаційне моделювання методом кінцевих різниць.

Результати роботи можуть бути застосовані в розробці випромінюючих пристроїв, що забезпечують передачу інформації в діапазоні бездротових технологій 5G. Розроблено оптимальну схему живлення антени, яка задовольняє умові роботи у діапазоні 5G і забезпечує мінімальне значення коефіцієнту відбиття на вході антени до смуги пропускання.

У першому розділі проаналізовані основні тенденції розвитку технології 5G. Виконаний огляд типів антен, що використовуються для 5G та їх приклади. Звернули увагу на зацікавленість у розвитку 5G технології. Розглянутий та проаналізований окремо мікросмужковий тип антени.

У спеціальній частині роботи проведена розробка та покращення випромінюючого пристрою для використання у середньому діапазоні мережі 5G, а саме 3.3 – 4.2ГГц, який забезпечує якісне співвідношення коефіцієнту відбиття та смуги пропускання.

В економічній частині проведено розрахунок витрат на розробку оптимізованого мікросмужкового випромінювача та аналіз існуючих аналогів.

МІКРОСМУЖКОВИЙ ВИПРОМІНЮВАЧ, КОЕФІЦІЄНТ ВІДБИТТЯ, ДІАГРАММА СПРЯМОВАНОСТІ, КОЕФІЦІЄНТ ПІДСИЛЕННЯ, П'ЯТЕ ПОКОЛІННЯ(5G), РЕЗОНАТОР З РОЗДІЛЕНИМИ КІЛЬЦЯМИ(РРК).

ABSTRACT

Explanatory note: 72 p., 40 figs., 3 tables, 2 annexes, 29 references

The object of research is an improved triangular microstrip antenna for operation in the 5G wireless technology range.

The purpose of this work is to simulate the radiating device designed to operate in the middle range of 5G wireless technology.

Research methods: simulation modeling by the finite difference method.

The results of the work can be used in the development of radiating devices that provide information transmission in the range of 5G wireless technologies. An optimal antenna power supply circuit has been developed that satisfies the condition of operation in the 5G band and provides a minimum value of the reflection coefficient at the antenna input to the bandwidth.

The first section analyzes the main trends in the development of 5G technology. The types of antennas used for 5G and their examples are reviewed. Attention is drawn to the interest in the development of 5G technology. The microstrip type of antenna is considered and analyzed separately.

In the special part of the work, the development and improvement of the radiating device for use in the middle range of the 5G network, namely 3.3 - 4.2 GHz, which provides a qualitative ratio of reflection coefficient and bandwidth, was carried out.

In the economic part, we calculated the costs of developing an optimized microstrip emitter and analyzed existing analogs.

MICROSTRIP EMITTER, RETURN-LOSS, RADIATION PATTERN, GAIN, FIFTH GENERATION (5G), SPLIT-RING RESONATOR (SRR).

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	10
1.1 Основні тенденції розвитку та особливості технології 5G	10
1.2 Огляд типів антен для використання у 5G та їх приклади	13
1.3 Зацікавленість в розвитку 5G технології великими телекомунікаційними компаніями	19
1.4 Діапазони частот для 5G технології	21
1.5 Проблематика переходу до масового застосування 5G	24
1.6 Мікросмужкова антена та її особливості	25
1.6.1 Мікросмужкова прямокутна антена	26
1.6.2 Щілинна антена	27
1.6.3 Інвертована F-антена	28
1.6.4 Друкована дипольна антена	30
1.6.5 Монопольна антена	30
1.7 Важливі характеристики конструкції антени	31
1.7.1 Робоча частота	32
1.7.2 Імпеданс	32
1.7.3 Зворотні втрати та VSWR(Коефіцієнт стоячої хвилі за напруженістю)	33
1.7.4 Діаграма спрямованості	34
1.7.5 Спрямованість і коефіцієнт підсилення антени	35
1.7.6 Ефективність антени	36
1.7.7 Смуга пропускання	36
1.7.8 Ширина променя в половину потужності	37
1.7.9 Бічні пелюстки	37
1.7.10 Поляризація	37
1.8 Структури живлення мікросмужкових антен	38
1.9 Висновки до першого розділу	41

1.10	Постановка задачі	41
2	СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	42
2.1	Побудова математичної моделі та перевірка коректності моделі. Дослідження параметрів трикутної структури	42
2.2	Створення структури з декількома робочими частотами	44
2.3.	Дослідження додаткових елементів. Додання двох додаткових резонаторів з розділеними кільцями(РРК) та отвору до досліджуваної антени.	46
2.4	Висновки до другого розділу	57
3	ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	58
3.1	Визначення трудомісткості мікросмужкової антени з резонуючою структурою	58
3.2	Витрати на створення мікросмужкової антенної структури	61
3.3	Капітальні витрати	62
3.4	Залежність ціни мікросмужкової антенної структури від попиту	63
3.5	Визначення економічної переваги розробленого випромінюючого пристрою	64
3.6	Існуючі аналоги	64
3.7	Висновки до третього розділу	65
	ВИСНОВОК	66
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	67
	ДОДАТОК А. Перелік документів на оптичному носії	71
	ДОДАТОК В. Відгук керівника кваліфікаційної роботи	72
	ДОДАТОК Г. Рецензія	73

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

РРК – резонатор з розділеними кільцями;

МІМО - Multiple Input Multiple Output

VR – віртуальна реальність

AR – розширена реальність

ІоТ – інтернет речей

LTE – Long Term Evolution

ІЧ – інфрачервоні хвилі

НВЧ – надзвичайно високі частоти

ІІ – Штучний інтелект

VSWR – Voltage Standing Wave Ratio (Коефіцієнт стоячої хвилі за напруженістю)

ІФА – інвертована F-антена

ВСТУП

У розділі передових телекомунікаційних технологій п'яте покоління мобільних мереж (5G) займає центральне місце. Завдяки своїй високій швидкості передачі даних, низькій затримці та великій пропускну здатності, 5G здатен революціонізувати спосіб, яким ми взаємодіємо зі світом, забезпечуючи широкопasmовий та безперервний доступ до інформації.

Бурхливий розвиток та розширення ринку інформаційних технологій постійно пропонує нам нові засоби, рішення та сервіси, котрі потребують стабільного та швидкого зв'язку. У цьому нам дуже допоможе 5G, можливості якого включають надзвичайно швидкий бездротовий інтернет, безперервний потік великих обсягів даних, інноваційні програми Інтернету речей (IoT) та багато іншого.

Одним з найсуттєвіших покращень, які принесла технологія 5G, є використання спектра міліметрових хвиль (mmWave), що працює на вищих частотах порівняно зі звичайними радіохвилями. Цей спектр надає ширший пропускну канал, що дозволяє передавати більше даних за коротший період часу. Крім того, технологія 5G використовує антени з технологією Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), які можуть одночасно передавати та приймати кілька потоків даних, підвищуючи пропускну здатність мережі та загальну ефективність. В майбутньому технологія 5G має потенціал трансформувати багато галузей завдяки своїй здатності передавати дані з високою швидкістю та малим затримкою. Використання технології 5G в Інтернеті речей (IoT), мережі зв'язаних пристроїв, датчиків і систем, є одним з найважливіших аспектів. Впровадження технології 5G може дозволити різним пристроям і системам взаємодіяти в режимі реального часу, що сприятиме автоматизації та оптимізації операцій.

Однак, успішна реалізація потенціалу 5G вимагає розробки та оптимізації антенної технології, яка є критично важливою для ефективного передавання та отримання сигналів у мобільних мережах нового покоління. Розробка антен для

5G поставила перед науково-дослідницькими групами та промисловими підприємствами завдання розробити інноваційні антенні рішення, які відповідають вимогам високої швидкості передачі, низької затримки та надійного покриття.

В кваліфікаційній роботі проведено імітаційне моделювання антенних систем, які забезпечують оптимальну продуктивність, компактність та ефективність для мереж 5G. Метою даної роботи є імітаційне моделювання випромінюючого пристрою що призначений для роботи в середньому діапазоні бездротової технології 5G.

1 СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Основні тенденції розвитку та особливості технології 5G

5G - це п'яте покоління мобільних телекомунікаційних мереж, яке відіграє важливу роль у подальшому розвитку зв'язку та технологій. Основні тенденції розвитку 5G включають наступні аспекти:

1. Висока швидкість передачі даних: 5G надає значно більшу швидкість передачі даних порівняно з попередніми поколіннями мобільних мереж. Це дозволяє користувачам отримувати та передавати великі обсяги інформації швидше і ефективніше.

2. Низька затримка (латентність): 5G має низьку затримку передачі даних, що є важливим для реалізації нових технологій, таких як автономні автомобілі, віртуальна реальність (VR) та розширена реальність (AR), безпілотні літальні апарати (дрони) та інші високопродуктивні застосунки.

3. Велика пропускна здатність: 5G надає значно більшу пропускну здатність, що дозволяє підключати велику кількість пристроїв до мережі одночасно. Це розширює можливості Інтернету речей (IoT), де мільйони датчиків та пристроїв можуть бути підключені до мережі одночасно.

4. Масштабованість: 5G має гнучкі архітектурні рішення, що дозволяють розгортання та масштабування мережі відповідно до потреб користувачів та конкретних застосунків. Це дозволяє операторам мереж побудувати ефективні та масштабовані інфраструктури.

5. Розвиток нових застосунків: 5G відкриває нові можливості для інновацій та розвитку різноманітних застосунків. Він стимулює впровадження технологій, таких як автономні автомобілі, розумні міста, промисловий Інтернет речей, дистанційне здоров'я та інші високотехнологічні рішення.

6. Сприяння цифровізації: 5G є важливою складовою цифрової трансформації суспільства і підприємств. Він сприяє розвитку економіки,

покращенню інфраструктури, доступу до послуг та підвищенню продуктивності[1].

Всі вище перелічені тенденції позитивно вплинуть на майбутнє як 5G технології, так і на подальші генерації мобільних мереж та зв'язку у цілому. Будуть досягатися нові горизонти в області пошуку нових робочих частот для різноманітних приладів, антен, технологій, що всебічно вдосконалюються ледве не кожен день.

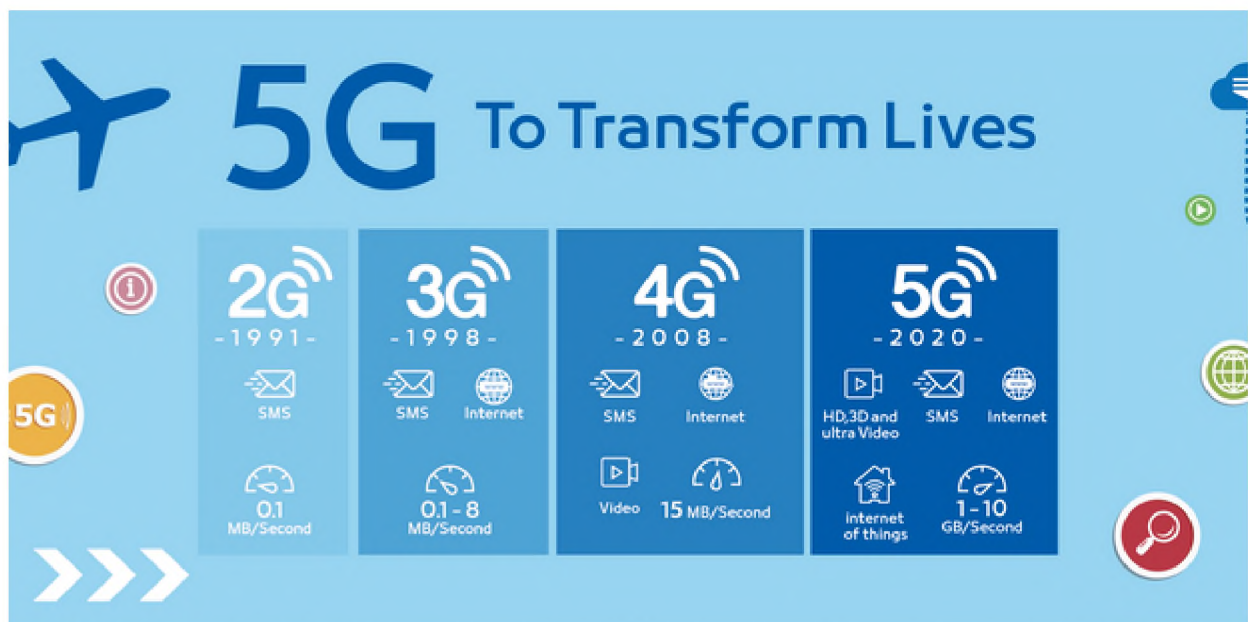


Рисунок 1.1 – Переваги технології 5G над попередниками для абонента мобільного та інтернет зв'язку [2]

Загалом, розвиток 5G передбачає зростання швидкості, пропускної здатності та низької затримки, що відкриває шлях для нових застосунків та інновацій, а також покращує взаємозв'язок між людьми, пристроями та суспільством в цілому.

Міліметрові хвилі займають частотний спектр від 30 ГГц до 300 ГГц. Вони знаходяться в спектрі між мікрохвилями (від 1 ГГц до 30 ГГц) та інфрачервоними (ІЧ) хвилями, які іноді називають надзвичайно високими частотами (НВЧ). Довжина хвилі (λ) знаходиться в діапазоні від 1 мм до 10 мм. Колись ця частина спектру практично не використовувалася просто тому, що

мало які електронні компоненти могли генерувати або приймати міліметрові хвилі.

Все змінилося за останнє десятиліття або близько того. Міліметрові хвилі стали практичними і доступними, і вони знаходять все нові і нові застосування. Найкраще те, що вони знімають тиск з нижчих частот і по-справжньому розширюють можливості бездротового зв'язку до зовнішніх меж радіотехнологій. Якщо ми піднінемося ще вище, то будемо використовувати світло.

Але все-таки має місце огляд плюсів і мінусів наших чудових міліметрових хвиль, бо у порівнянні пізнається істина, і також ми знаємо – нічого ідеального у світі нема.

Міліметрові хвилі відкривають більше спектру. Сьогодні спектр від постійного струму до мікрохвиль (30 ГГц) майже вичерпаний. Урядові установи по всьому світу розподілили весь "хороший" спектр. Існує дефіцит спектру та конфлікти. Розширення послуг стільникового зв'язку за допомогою технологій 4G, таких як LTE, залежить від наявності відповідного спектру. Проблема полягає в тому, що його не вистачає.

Як наслідок, спектр - це як першокласна нерухомість: він коштує дорого. Міліметрові хвилі частково вирішують проблему, надаючи більше простору для розширення. Ви можете взяти весь корисний спектр, який ми зараз використовуємо, від постійного струму до 30 ГГц, і перенести його в нижню частину діапазону міліметрових хвиль, і у вас все одно залишиться 240 ГГц.

Міліметрові хвилі також забезпечують високу швидкість передачі цифрових даних. Швидкість бездротової передачі даних у мікрохвильовому діапазоні і нижче зараз обмежена приблизно 1 Гбіт/с. У міліметровому діапазоні швидкість передачі даних може досягати 10 Гбіт/с і більше.

Погана новина полягає в тому, що хоча цей спектр дає нам певний простір для розширення, він не підходить для всіх типів бездротових додатків. Він має свої обмеження. Подолання цих недоліків стало викликом для того, щоб зробити міліметрові хвилі практичними і доступними. Цей час настав.

Одним з ключових обмежень міліметрових хвиль є обмежений діапазон. Закони фізики говорять, що чим коротша довжина хвилі, тим менша дальність передачі для даної потужності. При розумних рівнях потужності це обмеження в багатьох випадках обмежує дальність до менш ніж 10 метрів[3].

1.2 Огляд типів антен для використання у 5G та їх приклади

У мережах 5G використовуються різні типи антен для забезпечення оптимальної передачі та отримання сигналу. Основні типи антен, що застосовуються у 5G, включають наступні:

1. Масивні множинні вхідно-вихідні антени (Massive MIMO): Технологія Multiple-input/multiple-output (MIMO) є широко використовуваною технологією бездротового зв'язку, що дозволяє одночасно передавати та отримувати кілька сигналів даних по одному радіоканалу. MIMO використовується у комунікаціях Wi-Fi, а також у мережах 3G, 4G і 4G LTE.

Однак 5G впроваджує нову концепцію масивного MIMO, яка розширює можливості технології MIMO, забезпечуючи більше покриття та пропускну здатність мережі. Масивний MIMO використовує значно більше передавальних і приймальних антен, щоб покращити передачу сигналу та ефективність використання спектра. Для досягнення значного збільшення пропускну здатності MIMO, декілька абонентів повинні одночасно генерувати низхідний трафік. Різні фактори впливають на реальне покращення, яке може бути досягнуте за допомогою масивного MIMO.

Хоча не існує конкретного мінімального значення для кількості антен, необхідних для масивного MIMO, загальноприйнятий поріг системи складається з восьми передавальних і восьми приймальних антен. Проте ця кількість може бути значно більшою, включаючи системи з десятками або навіть сотнями антен.

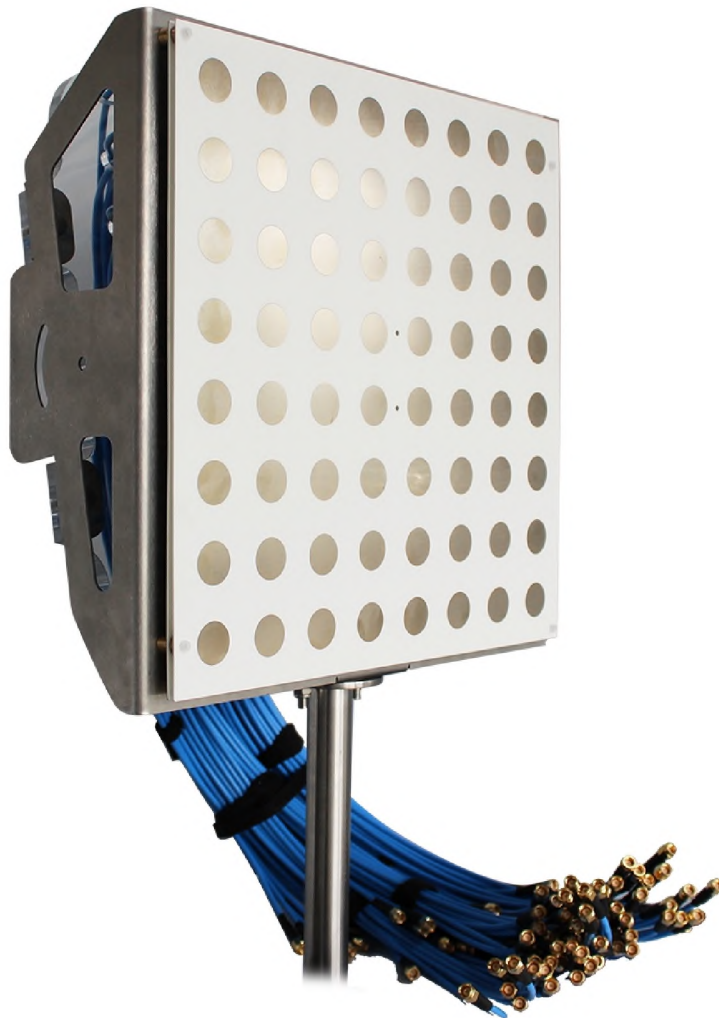


Рисунок 1.2 – Масивна 8x8 MIMO антена [4]

2. Антени з багатопучковим формуванням променя (Beamforming): Ця технологія дозволяє антенам сконцентрувати сигнал у певному напрямку, забезпечуючи кращу якість сигналу та покриття. Застосування багатопучкового формування променя дозволяє забезпечити швидкі та стабільні з'єднання з кінцевими пристроями. Формування діаграми спрямованості включає використання декількох випромінюючих елементів, які передають один і той самий сигнал з однаковою довжиною хвилі та фазою, об'єднаних для створення єдиної антени зі спрямованим потоком, який має більшу дальність і формується шляхом зосередження хвиль у певному напрямку. Перша загальна концепція такого формування променя була застосована в 1906 році для трансокеанського радіозв'язку.

Збільшення кількості випромінюючих елементів у складі антени призводить до звуження променя. Побічним ефектом формування променя є поява бічних пелюсток. Це небажане випромінювання сигналу, яке виходить з основної пелюстки в різних напрямках. Погане проектування антен може призвести до небажаної інтерференції бічних пелюсток сигналу, що впливає на формування діаграми спрямованості. Збільшення кількості випромінюючих елементів у складі антени дозволяє сильніше зосередити головний промінь і зменшити вплив бічних пелюсток.

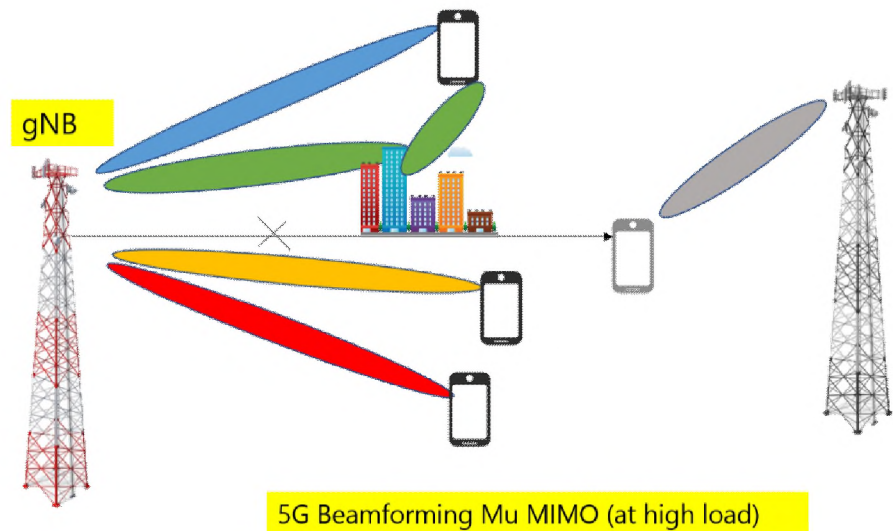


Рисунок 1.3 –Антенa з багатопучковим формуванням [5]

Хоча на сьогоднішній день цифрове формування променя на процесорі базової смуги є найпоширенішим методом, аналогове формування променя в радіочастотній області може сприяти підсиленню антени, що допомагає зменшити втрати сигналу на міліметрових хвилях 5G і зробити його більш ефективним.

3. Антени високих частот (Millimeter wave, mmWave): Для досягнення високої швидкості та пропускної здатності, 5G використовує антени високих частот, такі як mmWave. Ці антени мають короткий діапазон передачі, але надають значну широкопasmову пропускну здатність. Вони використовуються для високошвидкісного бездротового зв'язку в

міських середовищах та щільних зонах. Радіохвилі, які використовуються в 4G і 3G технологіях, операційні на частотах нижче 6 ГГц. У порівнянні з цим, 5G технологія працює в діапазоні частот 24-40 ГГц, що відноситься до міліметрового діапазону хвиль. Також вона працює на нижчих частотах, менших за 6 ГГц. Цей ширший діапазон частот дозволяє передавати великі обсяги даних за короткий проміжок часу, що в результаті призводить до швидкого та надійного зв'язку.

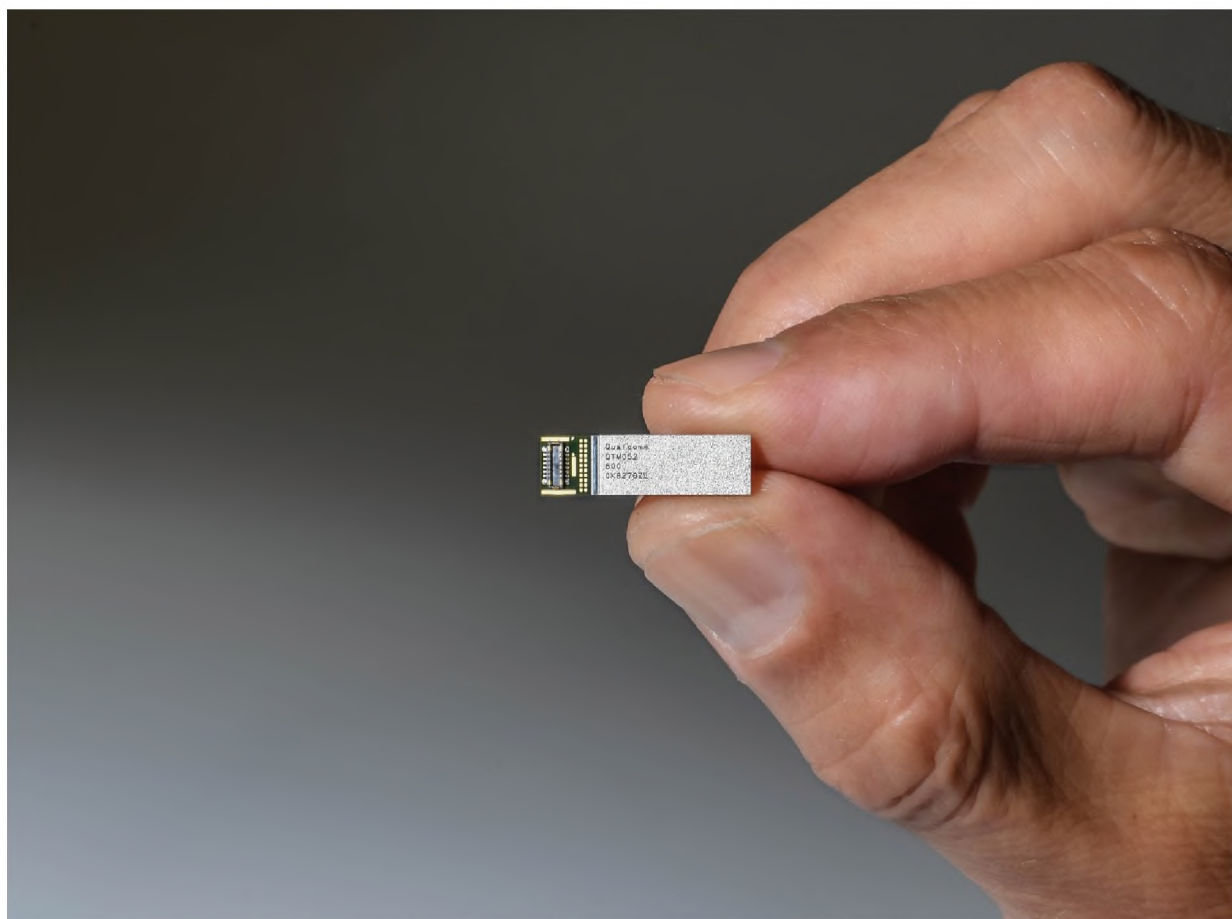


Рисунок 1.4 – Антена високих частот [6]

4. Антени для внутрішнього покриття: У місцях з високою щільністю користувачів, таких як офіси, торгові центри або аеропорти, застосовуються спеціальні антени для внутрішнього покриття. Ці антени можуть бути розташовані всередині будівель та забезпечувати надійний сигнал 5G усередині приміщення.



Рисунок 1.5 – Антена для внутрішнього покриття [7]

Візьмімо для прикладу промислові та комерційні приміщення. Сучасні виробничі та логістичні об'єкти широко використовують автоматизацію. Однак завдяки внутрішнім мережам 5G, пристрої зможуть взаємодіяти один з одним у десятки разів швидше, ніж за допомогою 4G. За допомогою штучного інтелекту (ШІ), машини на складальних лініях або в розподільчих центрах зможуть надавати інформацію в режимі реального часу про все, що можна уявити. Від виявлення несправних компонентів до оптимізації розподілу ресурсів і передбачення зростання замовлень - 5G допоможе відкрити еру повністю автономних промислових і комерційних процесів.

5. Антени для мобільних пристроїв: 5G також вимагає розробки спеціальних антен для мобільних пристроїв, таких як смартфони, планшети та інші пристрої. Ці антени зазвичай вбудовані в пристрої та оптимізовані для отримання та передачі сигналів у мобільних умовах.



Рисунок 1.6 – Вбудована антена для мобільного пристрою [8]

Розробка антен для мобільних телефонів завжди була викликом для інженерів, а створення антен для нових частотних діапазонів 5G ще більше підвищує рівень складності. Особливої уваги заслуговують два діапазони частот: діапазон 1, що охоплює частоти до 6 ГГц, та діапазон 2 для зв'язку на високочастотних міліметрових хвилях (мм-хвилі) понад 24 ГГц. Деякі з цих діапазонів все ще узгоджуються, а конкретні частоти залежатимуть від географічного розташування. Початкове впровадження телефонів було спрямоване на антени для діапазону до 6 ГГц, і мільйони абонентів по всьому світу вже користуються послугами мобільного зв'язку 5G. Підтримка мм-хвиль спочатку використовувалася для широкосмугового зв'язку з будинками та стаціонарною інфраструктурою, але поступово знаходить свій шлях і в мобільних телефонах.

1.3 Зацікавленість в розвитку 5G технології великими телекомунікаційними компаніями

Кілька компаній працюють над розробкою та впровадженням технології 5G. Одним з найбільших інвесторів у технологію 5G є китайська транснаціональна компанія з виробництва телекомунікаційного обладнання та побутової електроніки Huawei. Huawei є однією з провідних корпорацій у цьому секторі. У багатьох країнах, таких як Китай і Великобританія, вже є мережі, встановлені компанією Huawei з використанням стандарту 5G. Вони були в авангарді розвитку технології 5G і працювали над різними продуктами з підтримкою 5G, включаючи смартфони, планшети та домашні роутери, серед іншого.

Крім того, американський транснаціональний гігант з виробництва напівпровідникового та телекомунікаційного обладнання Qualcomm володіє значними активами в технології 5G і є основним інвестором у цьому секторі. Компанія є одним з найвідоміших постачальників модемів 5G і сформувала стратегічні альянси з кількома іншими компаніями, щоб сприяти створенню продуктів з підтримкою 5G. Платформа Snapdragon користується популярністю серед виробників смартфонів, і компанія також працює над іншими пристроями з підтримкою 5G, включаючи ноутбуки та товари для ринку "розумного дому". Ericsson - шведська міжнародна мережева та телекомунікаційна компанія, яка розробляє та впроваджує технологію 5G з моменту її заснування. Штаб-квартира компанії розташована у Стокгольмі, Швеція. Ericsson створив стратегічні альянси з кількома найвідомішими телекомунікаційними компаніями світу для побудови та розгортання мереж 5G у країнах по всьому світу.

Nokia – фінська багатонаціональна компанія, що займається телекомунікаціями, інформаційними технологіями та побутовою електронікою, яка бере активну участь у розробці технології 5G відтоді, як ця ідея вперше з'явилася на світ. Компанія Nokia була заснована в 1865 році зі штаб-квартирою

в Еспоо, Фінляндія. Nokia створила різноманітні технології та рішення 5G, включаючи радіостанції та базові станції 5G, а також співпрацювала з кількома найвідомішими телекомунікаційними компаніями світу для впровадження мереж 5G по всьому світу.

Транснаціональна компанія Samsung, що базується в Південній Кореї, бере активну участь у дослідженні та розробці технології 5G з моменту її першого зародження. Samsung створив різні продукти та рішення 5G, включаючи смартфони, модеми та базові станції 5G, і об'єднався з кількома найвідомішими телекомунікаційними компаніями світу для встановлення мереж 5G повсюдно.

Intel - це глобальний технологічний бізнес, що базується в США, який активно сприяє розвитку технології 5G з моменту її першого зародження. Intel створила широкий спектр технологій та рішень 5G, включаючи модеми та напівпровідники 5G, а також об'єднала зусилля з кількома найвідомішими телекомунікаційними компаніями для створення та впровадження мереж 5G по всьому світу.

AT&T - багатонаціональна американська телекомунікаційна компанія, що базується в США і бере активну участь у розгортанні мереж 5G в цій країні. AT&T сформувала стратегічні альянси з кількома іншими компаніями для виробництва продуктів з підтримкою 5G і розпочала розгортання мереж 5G у кількох місцях по всій території США.

Загалом, ці та інші компанії працюють разом, щоб прискорити розробку і розгортання технології 5G, яка, як очікується, матиме великий вплив на широкий спектр секторів, включаючи освіту і розваги, на додаток до охорони здоров'я і виробництва[9].

Як можна зрозуміти, перспективи розвитку 5G знаходяться на високому рівні завдяки великим інвестиціям та зацікавленості великих гравців у цій галузі. На додаток до Huawei, Qualcomm, Ericsson, Nokia та Intel існує ще низка інших компаній, які активно вкладають зусилля в розробку та впровадження технології 5G. Серед них можна відзначити Verizon Communications та Corning.

Ці інвестиції та зацікавленість компаній у розробку та впровадження 5G свідчать про великий потенціал цієї технології. Очікується, що 5G перетворить спосіб, яким ми спілкуємося, працюємо та живемо. Вона надасть можливість для розвитку інноваційних застосувань, таких як автономні автомобілі, розумне місто, розширена реальність та віртуальна реальність. Крім того, 5G відкриє нові перспективи для промисловості, охоплюючи такі сфери, як виробництво, логістика, охорона здоров'я та багато інших.

Залучення великих компаній із різних країн світу підтверджує широке застосування 5G та його потенціал для створення інноваційного та підключеного світу. З кожним роком очікується ширше поширення мереж 5G, що забезпечить зростання швидкості передачі даних, зниження затримки та покращення продуктивності та зручності для користувачів.

1.4 Діапазони частот для 5G технології.

Постачальники послуг зв'язку повинні використовувати комбінацію різних діапазонів спектра для забезпечення послуг 5G, оскільки зв'язок визначає майбутнє нашого світу.

5G ставить перед операторами нові виклики. З одного боку, мережі 5G забезпечують високі швидкості мобільного ширококутового зв'язку і низькі затримки, що створює можливості для нових додатків, таких як штучний інтелект (ШІ), метaprостір і Інтернет речей (IoT). З іншого боку, реалізація 5G вимагатиме від постачальників послуг доступу до значних ресурсів спектра для реалізації цих нових послуг.

GSMA рекомендує регуляторам і державним установам, що керують розподілом спектра 5G, виділяти операторам 80-100 МГц суміжного спектра у основних діапазонах 5G і приблизно 1 ГГц спектра у діапазонах міліметрових хвиль.

Мережі 5G функціонують у трьох різних діапазонах частот, відомих як високочастотний, середньочастотний і низькочастотний. Кожен з цих

діапазонів має свої переваги та виклики, і кожен мобільний оператор впроваджує технологію 5G по-своєму.

Високошвидкісний або міліметровий діапазон (mmWave) 5G забезпечує дуже високу швидкість передачі даних, але має обмежений радіус дії. Частоти високочастотного діапазону 5G коливаються від 24 ГГц до 100 ГГц, що дозволяє досягати швидкостей в кілька гігабіт на секунду. Однак, ці високі частоти мають обмежену проникність через стіни і будівлі, тому вони ефективні на невеликих відстанях.

Середній діапазон 5G забезпечує помірну дальність дії та хорошу швидкість передачі даних. Він працює в діапазоні 2-6 ГГц і має більший радіус дії, ніж високочастотний діапазон. Зазвичай цей діапазон є найбільш популярним для 5G і використовується, наприклад, у студентських містечках. GSMA описує діапазон від 3,3 ГГц до 3,8 ГГц як ідеальний, оскільки багато країн світу вже визначили його для 5G.

Низькочастотний діапазон 5G має великий радіус дії, але меншу швидкість передачі даних. Він працює на частотах нижче 2 ГГц і використовується, зокрема, для забезпечення комерційно важливого покриття 4G LTE. Додатково, датчики Інтернету речей можуть використовувати низькочастотний діапазон 5G для моніторингу великих територій, таких як вітрові та сонячні електростанції.

C діапазон є частиною середньочастотного діапазону і має великий потенціал для нових можливостей використання 5G. Цей діапазон відкриває двері до інноваційних застосувань технології 5G.

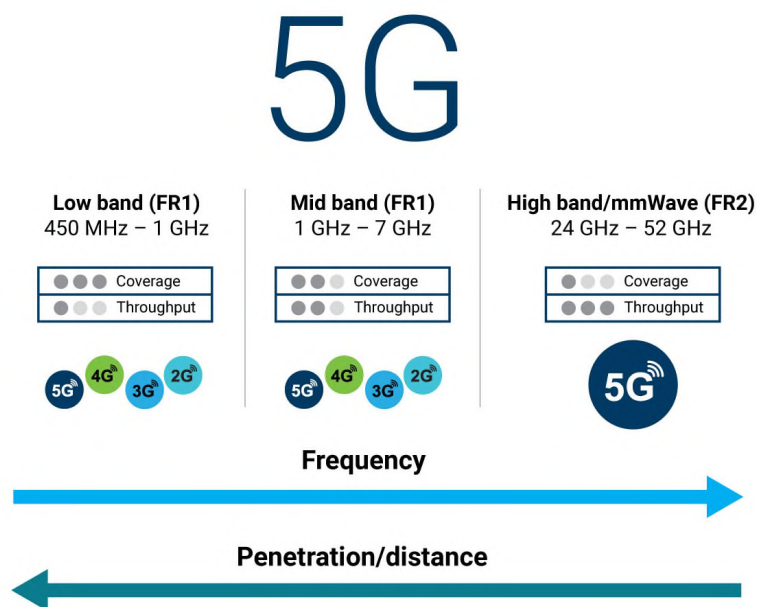


Рисунок 1.7 – Загальні характеристики діапазону роботи 5G [16]

Після всього вищесказаного, може з'явитися питання – наскільки швидким є С-діапазон? Відповідь на це питання нам належить дізнатись далі.

У сучасних неавтономних стільникових мережах 5G більша частина трафіку даних все ще передається через 4G LTE, а 5G забезпечує невелику додаткову пропускну здатність. Це забезпечує підвищену швидкість без необхідності доопрацювання основних мережевих технологій. Більш конкретно, мобільний пристрій може поєднувати три канали 4G шириною 5, 10 або 20 МГц плюс один канал 5G для додаткової пропускну здатності 5-20 МГц. Такий об'єднаний спектр забезпечує загальну смугу пропускання між 20-80 МГц і швидкість між 100-200 Мбіт/с.

Під час нашого власного тестування ми побачили значне покращення в тих місцях, де було розгорнуто С-діапазон. Завдяки ширшому каналу С-діапазону ми спостерігали канали шириною від 60 до 100 МГц зі швидкістю мережі 5G 600-700 Мбіт/с або в 4-5 разів більше, ніж забезпечує 4G LTE. До 2023 року пристрої 5G наступного покоління почнуть об'єднувати багато каналів С-діапазону для ще швидших швидкостей у гігабітному та мультігігабітному діапазоні[17].

Навіщо мені потрібен С-діапазон? Які переваги я отримаю з нього, коли можу і надалі користуватись 4G?

Для того, щоб 5G пропонував помітно кращий досвід, ніж 4G, йому потрібен новий спектр. І ширші канали - до 100 МГц на канал - для забезпечення більшої пропускної здатності і швидкості. Для порівняння, сьогодні мережі 4G мають лише 20 МГц на канал. Таким чином, 5G може передавати в 5 разів більше інформації через один канал С-діапазону[17].

- Більші швидкості та більша пропускна здатність, ніж у 4G, зі швидкістю до 100 Мбіт/с на мобільних пристроях
- Зв'язок на більших відстанях між вишками стільникового зв'язку
- Великі обсяги спектру для мобільних операторів

1.5 Проблематика переходу до масового застосування 5G

5G технологія, як будь-яка нова інновація, також стикається з деякими проблемами та викликами. Нижче перераховано деякі з них:

1. Інфраструктура: Впровадження технології 5G вимагає значних змін у мережевій інфраструктурі. Для надання покриття 5G потрібно встановлювати багато нових базових станцій, антен та іншого обладнання. Це може вимагати значних інвестицій та інфраструктурних змін, особливо у віддалених та менш розвинених районах.
2. Потужність та енергоефективність: Високі швидкості передачі даних 5G потребують більшої потужності, що може призводити до збільшення споживання електроенергії. Це створює проблеми з енергоефективністю та може мати вплив на довготривалість роботи батарей в мобільних пристроях.
3. Покриття та зони тіні: 5G використовує високочастотні сигнали, які мають короткий радіус покриття та низьку здатність проникнення через стіни та перешкоди. Це може створювати проблеми з покриттям

у внутрішніх приміщеннях та в густонаселених міських районах. Крім того, відсутність базових станцій на віддалених територіях може призводити до зон тіні, де покриття 5G буде обмеженим або відсутнім.

4. Вплив на здоров'я та безпеку: Через використання високочастотних хвиль, деякі люди висловлюють обурення щодо можливих впливів на здоров'я від випромінювання. Хоча наукові дослідження продовжуються, багато організацій здоров'я, таких як Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) та Інститут радіаційної безпеки, вважають, що експозиція від 5G є безпечною[10]. Проте, важливо продовжувати дослідження та наглядати за можливими ризиками.
5. Кібербезпека: З використанням все більш підключеного світу, мережі 5G стають предметом зростаючих загроз кібербезпеки. З більшою кількістю підключених пристроїв і збільшенням обміну даними, необхідно забезпечити надійність та захищеність мережі 5G від хакерських атак та зловмисного використання інформації.

Незважаючи на ці виклики, розвиток та впровадження 5G технології продовжуються, а компанії та уряди працюють над знаходженням рішень для подолання цих проблем і використання потенціалу, який 5G може принести.

1.6 Мікросмужкова антена та її особливості

Мікросмужкові антени набувають все більшої популярності через свої переваги порівняно з традиційними антенами, такими як рупорні, спіральні чи параболічні. Незважаючи на те, що вони мають вищий коефіцієнт підсилення і ширшу смугу пропускання, їх типова габаритна структура і великі розміри не підходять для компактних бездротових пристроїв. Зате мікросмужкові антени мають кілька важливих переваг, таких як низька вага, низький профіль, компактні розміри і легкість в установці. Проте, вони мають деякі обмеження, зокрема низьку пропускну здатність, низьку ефективність і коефіцієнт підсилення, що можуть бути розглянуті як їх слабкі сторони [11].

Будь-яка мікросмужкова антена складається з тонкого листа діелектрика, який зазвичай має нанесене тонке мідне покриття з обох сторін. На одній стороні розташовані випромінюючий елемент, ланцюги живлення, керування та узгодження. Металева сторона антенної плати виступає в ролі екрану. Концепція мікросмужкового випромінювача була запропонована Дешампсом в 1953 році [12] і патентована Гуттоном і Байзінно в Франції [12]. Проте перша реалізація такої антени з'явилася лише через 20 років. Дослідження, проведені протягом 1970-х років, отримали поштовх завдяки наявності діелектричних матеріалів з низьким коефіцієнтом втрат і властивостями, що відповідають температурі та механічним умовам, а також покращеній технології фотолітографії та вдосконаленим теоретичним моделям. Першу мікросмужкову антену розробили Ховелл і Мансон [13]. Після цього розпочалося інтенсивне вивчення та розробка мікросмужкових антен і систем, оскільки вони пропонують численні переваги.

1.6.1 Мікросмужкова прямокутна антена

Застосування випромінювачів, побудованих на основі несиметричних мікросмужкових ліній, знаходить широке використання. Ще одним типом друкованих мікросмужкових антен є вібратори різних конфігурацій та щілини, вирізані в металевій стінці симетричної передавальної мікросмужкової лінії. Особливістю цих антен є плоскі стрічкові спіралі та криволінійні випромінювачі. Елементи випромінюючих структур можуть мати різноманітну геометричну форму, таку як прямокутну, круглу, трикутну, еліптичну, кільцеву та інші. Ці структури можуть працювати як у резонансному, так і в нерезонансному режимах і можуть бути збуджені за допомогою мікросмужкової лінії, коаксіального кабелю, електромагнітного зв'язку тощо. Приклад такого типу антени наведений на рис. 1.8 [14].

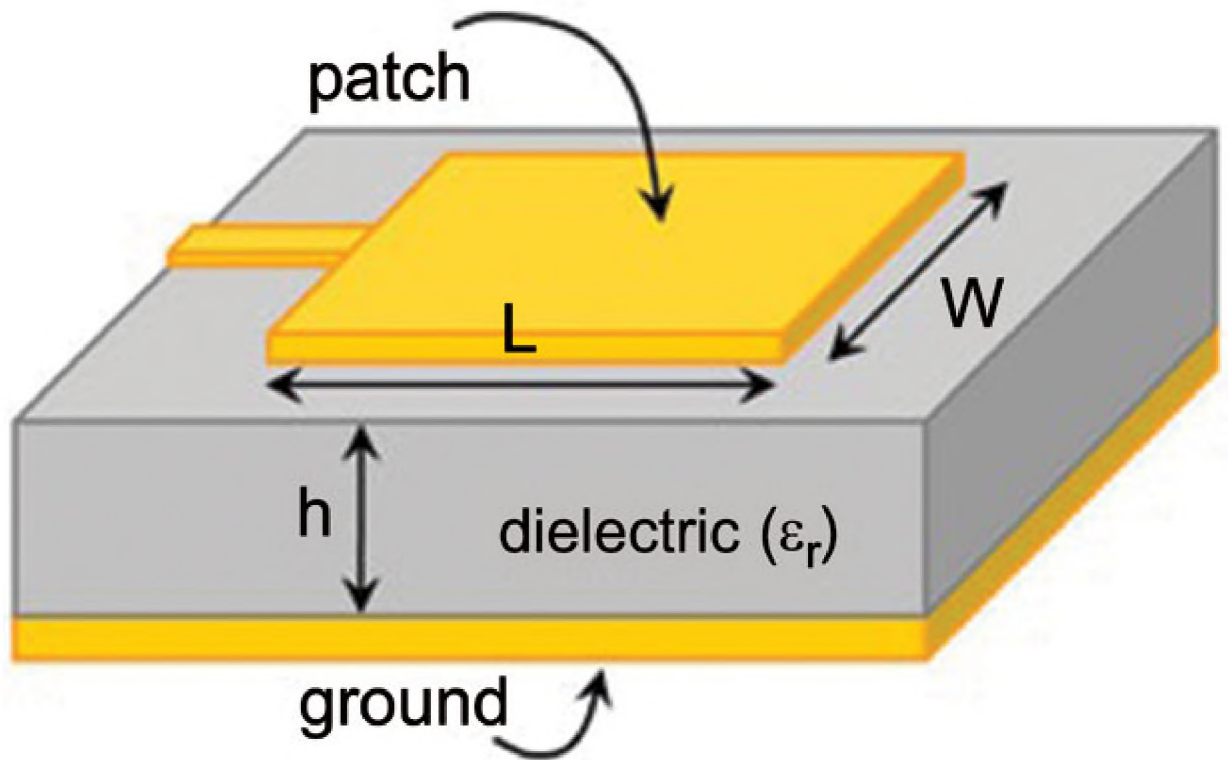


Рисунок 1.8 – Прямокутна мікросмужкова антена [21]

Випромінювач складається з прямокутного смужкового провідника, який розташований на тонкому діелектричному шарі з провідною підкладкою. Збудження випромінювача відбувається за допомогою пласкої лінії передачі. Розмір "L" зазвичай дорівнює $\lambda_d/2$, де λ_d - довжина хвилі в діелектрику. На краях резонатора складові поля, що перпендикулярні провідній підкладці, знаходяться у протифазі. Складові поля, що паралельні провідній підкладці, складаються у фазі і створюють поле випромінювання з лінійною поляризацією, напрямлену перпендикулярно до площини підкладки. Розмір "W" випромінювача може бути різним і впливає на широкосмуговість антени.

1.6.2 Щілинна антена

Друковані щілинні антени складаються з діелектричної підкладки, на якій розташована металева площа. Щілинний елемент створюється шляхом видалення металу з металевої сторони, а найпоширенішими формами щілинних антен є прямокутна і кільцева форми. Щілинні антени мають двонаправлену діаграму спрямованості з ширшою смугою пропускання, ніж мікросмужкові

антени. Головною складністю полягає у їх інтеграції в електроніку. Для поліпшення можливості інтеграції, зазвичай використовують схеми живлення копланарного хвилеводу (CPW). Для створення однонаправленої діаграми спрямованості використовується металева площина заземлення як рефлектор. Конічні щілинні антени використовуються, коли необхідна ширша смуга пропускання і випромінювання в одному напрямку діаграми спрямованості [18].

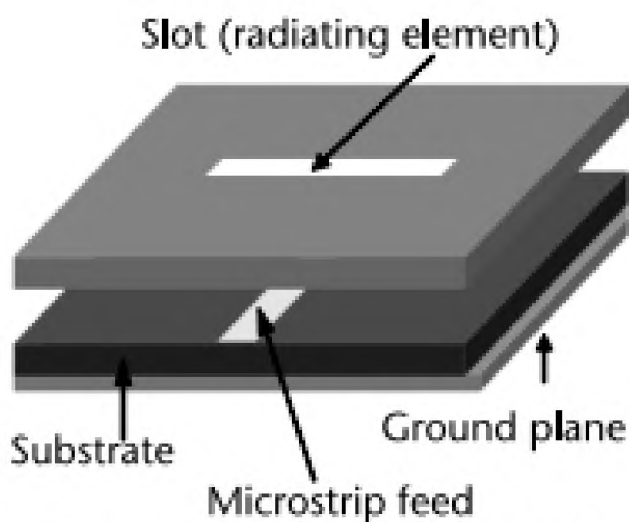


Рисунок 1.9 – Щілинна антена [22]

Останнім часом велику увагу привертають щілинні антени, які інтегруються в підкладку структур інтегрованих хвилеводів (SIW). Головними перевагами щілинних антен SIW є їх компактність і простота інтеграції порівняно з мікросмужковими антенами або звичайними щілинними антенами, завдяки особливостям поширення напрямлених хвиль у структурі SIW.

1.6.3 Інвертована F-антена

Інвертовані F-антени (IFA) є дуже поширеним типом антен у більшості смартфонів і бездротових пристроях. Візуально антени іноді нагадують форму літери F. Інвертована F-антена - це, по суті, складений монополь з індуктивним шлейфом, доданим для компенсації ємності, що вноситься при розташуванні антенного елемента ближче до землі. IFA також може бути спроектована для

забезпечення багатодіапазонної роботи шляхом складання двох або більше структур типу F, або ж діаграма спрямованості може бути меандрованою, щоб зменшити її розмір.

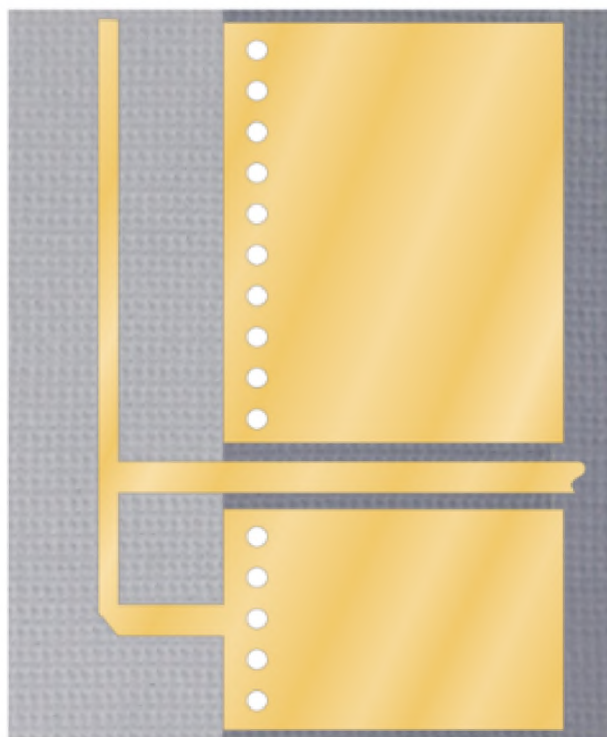


Рисунок 1.10 – Інвертована F-антена [23]

ІФА (інвертовані F-антени) є широко поширеним типом антен, який зустрічається у багатьох смартфонах та бездротових пристроях. Вони мають вигляд, що нагадує літеру "F". ІФА насправді є складним моноподем з додатковою індуктивною петлею, яка використовується для компенсації ємності, що виникає при розташуванні антенного елемента недалеко від землі. ІФА також можуть бути сконструйовані для роботи в кількох діапазонах шляхом комбінування двох або більше структур типу "F".

Для комбінування декількох антен на одній пластиковій підкладці широко використовується техніка селективної металізації, особливо популярна в мобільних телефонах. Крім ІФА, також можуть використовуватися інші типи антен, такі як петлі, інвертовані L-подібні антени та монополі, для підтримки різних радіотехнологій, які використовуються в сучасних мобільних пристроях. Зазвичай ІФА розробляються на замовлення, враховуючи наявний простір на друкованій платі або геометрію виробу. Витрати на проектування невеликі і

окупаються протягом життєвого циклу виробу. Крім того, при виборі дизайну, який базується на трасуванні друкованої плати, IFA можуть бути дуже ефективними і економічними рішеннями.

1.6.4 Друкована дипольна антена

Для бездротових систем, які базуються на протоколах Wi-Fi, Bluetooth, WiMAX і WSN, широко використовуються друковані дипольні антени.

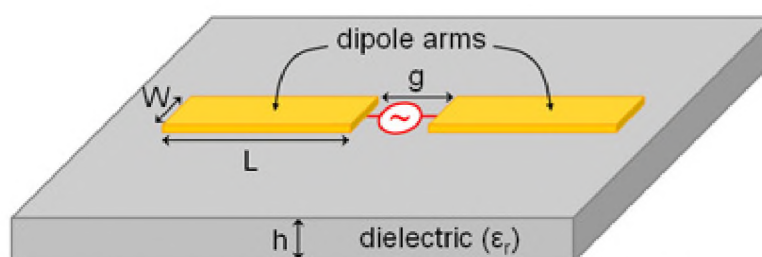


Рисунок 1.11 – Дипольна антена [24]

Ці антени складаються з двох випромінюючих елементів, які живляться в протифазі. Плечі антени можуть бути розташовані на одній стороні підкладки або на різних сторонах. Залежно від розташування плечей використовуються різні схеми живлення. Найпоширенішими схемами живлення є копланарні хвилеводні лінії, які виконують функцію чверті лінійних балунів, а також пряме коаксіальне з'єднувальне живлення. Щодо дипольних плечей можуть використовуватися різні форми.

1.6.5 Монопольна антена

Друковані монопольні антени складаються лише з одного резонансного елемента (одного плеча), безпосередньо з'єднаного з лінією передачі.

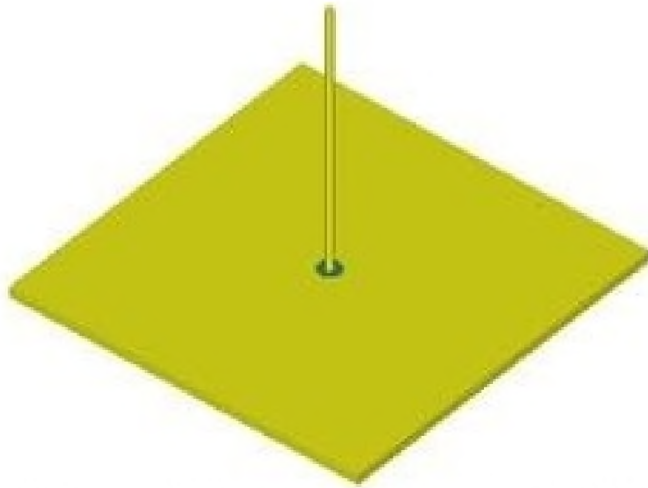


Рисунок 1.12 – Монопольна антена [25]

Монопольні друковані антени складаються з одного резонансного елемента (плеча), який прямо підключений до лінії передачі. При правильному проектуванні деякі монопольні антени можуть мати ширшу смугу пропускання, ніж дипольні антени. Ця характеристика робить монопольні друковані антени ідеальними для компактних і широкосмугових пристроїв. Монопольні антени широко застосовуються у мобільних та невеликих бездротових пристроях зв'язку.

1.7 Важливі характеристики конструкції антени

Оглядаючи наявну літературу [18], можна виділити кілька параметрів антен, які корисно описати інженерам, що займаються проектуванням антен. Перед тим, як розпочати проектування антени, важливо мати розуміння типових проектних характеристик антени. Часто може бути заплутано деякі характеристики антени та їх використання при проектуванні. Наприклад, коефіцієнт підсилення антени і посилення коефіцієнта підсилення - це два різних визначення. Основні характеристики або параметри антени включають частоту, коефіцієнт підсилення, смугу пропускання, імпеданс, зворотні втрати, ширину смуги пропускання в половину потужності (HPBW), бічні кути, поляризацію, крос-поляризацію та співвідношення напруги до стоячої хвилі (VSWR).

1.7.1 Робоча частота

Резонансна точка антени або розрахункова частота f_c - це характеристика антени, на якій вона резонує. Робоча частота антени (або смуга частот) - це діапазон частот, в межах якого характеристики антени відповідають заданому стандарту. Центральна частота антени між високочастотною точкою f_H і низькочастотною точкою f_L розраховується, як показано в (1.1):

$$f_c = \frac{f_H - f_L}{2} \quad (1.1)$$

1.7.2 Імпеданс

Імпеданс антени встановлює зв'язок між напругою та струмом, що входять до антени, і складається з резистивної (реальної) та реактивної (уявної) складових. Індуктивні та ємнісні елементи імпедансу антени змінюються залежно від частоти. Антена має два типи опору, пов'язані з нею: опір випромінювання та омичний опір, як показано на рисунку 1.13. Опір випромінювання перетворює електричну енергію на випромінювання. Омичний опір виникає внаслідок втрат у структурі антени, які перетворюють електричну енергію на тепло. Для досягнення ефективного випромінювання і забезпечення високої ефективності, опір випромінювання має бути значно більшим за омичний опір. Для ефективного передавання енергії в системі, імпеданс антени та імпеданс лінії передачі повинні бути взаємно збігатися.

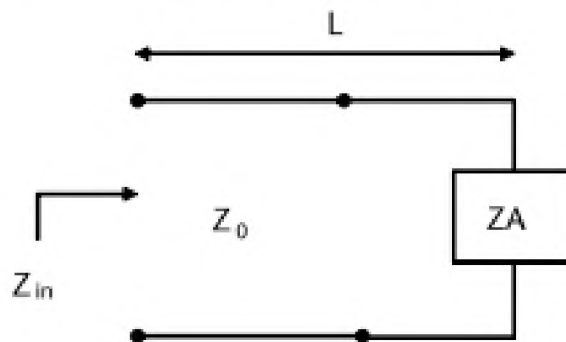


Рисунок 1.13 – Модель опору антени

1.7.3 Зворотні втрати та VSWR(Коефіцієнт стоячої хвилі за напруженістю)

Зворотні втрати в антені вимірюються для оцінки ефективності передачі потужності від лінії передачі до антени. Якщо потужність, яка досягає тестової антени (P_{in}), дорівнює вхідній потужності, а потужність, яка відбивається назад до джерела (P_{ref}), то ступінь невідповідності між вхідною та відбитою потужностями визначається відношенням P_{in}/P_{ref} . Зворотні втрати можуть бути виражені через коефіцієнт напруженості стоячої хвилі (VSWR), який виникає на вході антени внаслідок відбиття, або через відносний рівень зворотного сигналу у децибелах. Від'ємне значення коефіцієнта відбиття в децибелах є мірою зворотних втрат. Оскільки потужність пропорційна квадрату напруги, зворотні втрати можна визначити за допомогою формули (1.2).

$$RL(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{ref}} \quad (1.2)$$

Зворотні втрати та коефіцієнт напруженості стоячої хвилі (VSWR) є взаємопов'язаними показниками. VSWR вимірює відбиту потужність від джерела. Цей показник обчислюється шляхом порівняння прямої напруги хвилі, яка йде до навантаження, з напругою хвилі, яка відбивається від навантаження. Ідеально збалансована система має VSWR 1:1. Чим більше перше число, тим менше збалансованість і менша ефективність системи. У випадку антени, зазвичай VSWR складає 2:1, що означає, що 88,9% енергії, яку передавач надсилає в антену, випромінюється у вільний простір, а 11,1% відбивається назад до джерела або втрачається у вигляді тепла під час передачі. Смуга пропускання антени також може вимірюватись у термінах зворотних втрат, наприклад, смуга пропускання -10 dB.

1.7.4 Діаграма спрямованості

Діаграма спрямованості антени відображає залежність потужності, яку випромінює антена, від напрямку в просторі. Ця зміна потужності, що відбувається у різних точках простору, вимірюється у дальній зоні антени. Якщо діаграма спрямованості однакова у всіх напрямках, то вона вважається ізотропною діаграмою спрямованості. У реальних антен такої ідеальної діаграми спрямованості не існує, проте ізотропна діаграма спрямованості використовується як стандарт для порівняння коефіцієнта підсилення та діаграм спрямованості реальних антен. Для зручності, діаграму спрямованості можна побудувати у двовимірній (2-D) площині для різних азимутів і кутів нахилу. Ці діаграми називаються діаграмами спрямованості в азимутальній площині та діаграмами спрямованості в площині нахилу. Діаграма спрямованості може бути представлена у полярних або прямокутних координатах. Більш детальною є діаграма спрямованості в прямокутних координатах, особливо коли вона складається з різних бічних пелюсток, а рівні цих пелюсток відіграють важливу роль. Багато характеристик антени, таких як коефіцієнт підсилення, спрямованість, напрямок головної пелюстки, ширина діаграми спрямованості, бічні пелюстки та положення нуля, обчислюються на основі діаграми спрямованості антени, як показано на рисунку 1.14.

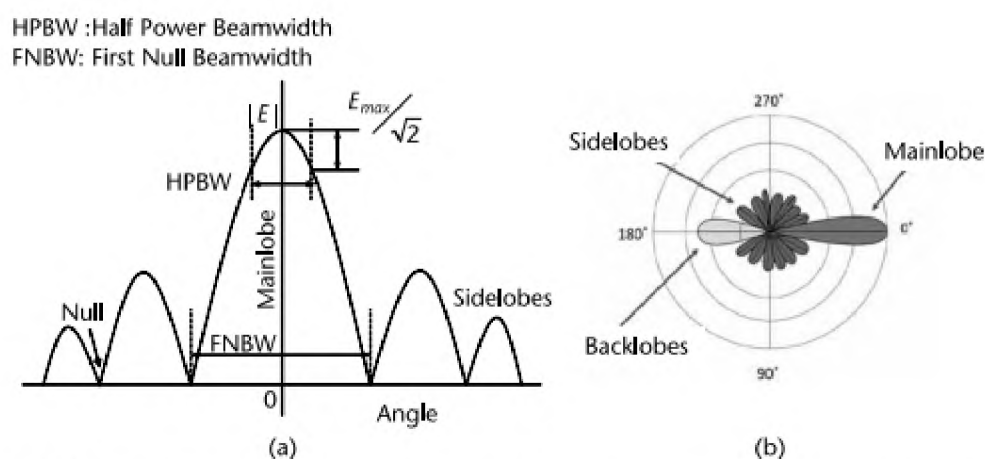


Рисунок 1.14 - Діаграми спрямованості та параметри антени: (а) прямокутна діаграма спрямованості, та (b) полярна діаграма спрямованості.

1.7.5 Спрямованість і коефіцієнт підсилення антени

Здатність антени фокусувати енергію, яку вона випромінює, у певному напрямку, визначається за допомогою діаграми спрямованості. Спрямованість вимірює, наскільки більшою є пікова щільність випромінюваної потужності антени у певному напрямку порівняно з еталонним випромінювачем (зазвичай ізотропним випромінювачем або диполем) з такою ж потужністю джерела. Коефіцієнт підсилення виражається відносно стандартної антени. Дві найпоширеніші еталонні антени для вимірювання спрямованості - це ізотропна антена та резонансний напівхвильовий диполь. Ізотропна антена розподіляє енергію рівномірно у всіх напрямках. Реальні ізотропні антени не існують, але вони надають прості та однорідні теоретичні діаграми спрямованості, з якими порівнюють діаграми спрямованості реальних антен. Резонансний напівхвильовий диполь є використовується як стандарт для порівняння коефіцієнта підсилення антен. Коефіцієнт підсилення вимірюється в децибелах (dB) відносно ізотропного випромінювача (dBi) або відносно дипольної антени (dBd). Коефіцієнт підсилення диполя на 2,15 дБ більший, ніж у ізотропної антени, тобто $dBi = dBd + 2,15$ дБ. Важливо враховувати, в яких одиницях виражається коефіцієнт підсилення - dBd чи dBi, і правильно перераховувати його при порівнянні коефіцієнтів підсилення декількох антенних систем. Фактична ефективність антени вимірюється кількістю енергії, яку антена випромінює у вільний простір. Антени не є 100% ефективними і мають внутрішні втрати. Коефіцієнт підсилення антени враховує ці втрати. Коефіцієнт підсилення антени можна розрахувати за формулою (1.3):

$$\text{Коеф. підсилення} = 4\pi \frac{\text{Інтенсивність випромінювання}}{\text{Загальна потужність}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (1.3)$$

Коефіцієнт підсилення може бути поняттям, яке викликає плутанину. Багато інженерів знайомі з тим, що коефіцієнт підсилення відноситься до здатності підсилювача збільшувати вхідний сигнал. Однак, між коефіцієнтом підсилення

підсилювача та коефіцієнтом підсилення антени є значна різниця. Підсилювач вкладає енергію в систему, роблячи її активним пристроєм.

1.7.6 Ефективність антени

Ефективність антени - це показник того, скільки вкладеної енергії в антену випромінюється у вільний простір, а не втрачається у вигляді тепла на самій структурі антени або відбивається назад до джерела. Параметри, такі як імпеданс антени та співвідношення стояння хвиль (VSWR) при центральній частоті, відіграють важливу роль у вимірюванні ефективності. У високоефективній антені більша частка вхідної потужності, яка надходить до антенного з'єднання, випромінюється в оточуючий простір, тоді як у низькоефективній антені значна частина потужності втрачається, відбивається назад або поглинається всередині антени.

1.7.7 Смуга пропускання

Смуга пропускання антени визначається як діапазон частот, в якому антена може ефективно випромінювати або приймати енергію. Зазвичай вказується величина смуги пропускання у вимірах VSWR або децибелів. Наприклад, можна сказати, що антена працює в діапазоні від 50 до 100 МГц з VSWR менше 1,5 або -10 dB. Ця інформація вказує, що коефіцієнт відбиття в даному діапазоні частот менше 0,2. Іншими словами, лише 4% потужності випромінюється назад передавачем з усієї потужності, що надходить до антени. Смугу пропускання можна також визначити за допомогою діаграми спрямованості або відношення VSWR до відбитої потужності. Зазвичай смугу пропускання виражають у відсотках, оскільки вона є постійною відносно частоти. Зазвичай наші антени мають номінальну смугу пропускання 10%, але це значення може змінюватися залежно від конкретної антени та вимог до її продуктивності.

1.7.8 Ширина променя в половину потужності

Ширина променя антени - це кут, з якого випромінюється найбільша енергія. Цей кут визначається таким чином, що енергія випромінювання зменшується до половини (50%) свого максимального рівня. Цей кут часто позначається як HPBW або "точка -3 dB". HPBW вимірюється в радіанах або градусах.

1.7.9 Бічні пелюстки

Бічні пелюстки в діаграмі спрямованості антени - це промені, які не є основними. У добре спроектованій антені, густина потужності в бічних пелюстках зазвичай значно нижча, ніж в головному промені. Рівень потужності в бічних пелюстках вимірюється в децибелах відносно піку головного променя, наприклад, -13 dB. В антенних решітках існує кілька методів для контролю рівнів бічних пелюсток, залежно від конкретного застосування.

1.7.10 Поляризація

Усі електромагнітні хвилі та випромінювання мають поляризацію. Поляризація антени визначається орієнтацією електричного поля або E-площини. Поляризація може бути лінійною, круговою або еліптичною. Лінійна поляризація зазвичай буває горизонтальною або вертикальною. Двополюсні антени можуть мати як вертикальну, так і горизонтальну поляризацію завдяки окремим портам. Кругова поляризація виникає, коли E-площина випромінювальної хвилі антени обертається вздовж осі поширення. Залежно від напрямку обертання, поляризація може бути правою або лівою. Антени ніколи не є ідеально поляризованими. Кількість енергії в площині, перпендикулярній до площини E або протилежній круговій поляризації, вимірюється за допомогою крос-поляризації. Зазвичай це виражається відносно пікового коефіцієнта підсилення антени.

1.8 Структури живлення мікросмушкових антен

Лінія живлення використовується для передачі енергії для збудження випромінювання, і це може бути здійснено через прямий або непрямий контакт. Існує різноманітні методи підведення енергії, і серед них чотири найпопулярніші включають коаксіальне підведення зонда, мікросмужкову лінію, апертурний зв'язок і безконтактне з'єднання [19].

Коаксіальне підведення зонда представляє собою метод, при якому внутрішній провідник коаксіального кабелю з'єднується з антеною, а зовнішній провідник підключається до площини заземлення. Цей метод має переваги, такі як простота виготовлення, легкість узгодження та низький рівень паразитного випромінювання. Однак недоліком коаксіального живлення є його вузька смуга пропускання та складність моделювання, особливо при застосуванні на товстій підкладці.

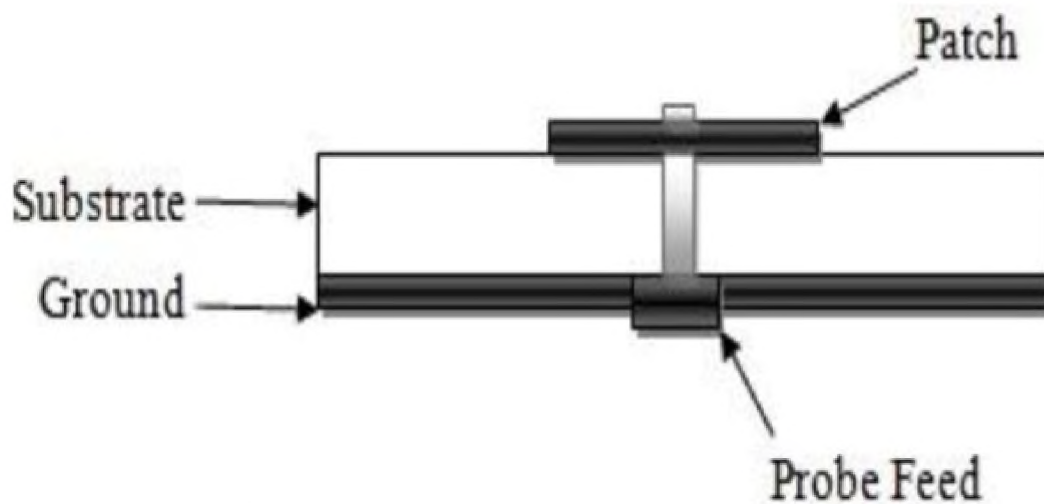


Рисунок 1.15 – Коаксіальна структура живлення антени [26]

Мікросмужкова лінійна подача є простим способом виготовлення, оскільки вона представляє собою просту провідну смужку, що з'єднується з антеною і може розглядатися як її продовження. Цей метод легко моделювати і адаптувати, контролюючи положення вставки. Однак, недоліком цього методу є те, що зі збільшенням товщини підкладки збільшується поверхнева хвиля, що призводить до збільшення паразитного випромінювання та обмеження смуги пропускання.

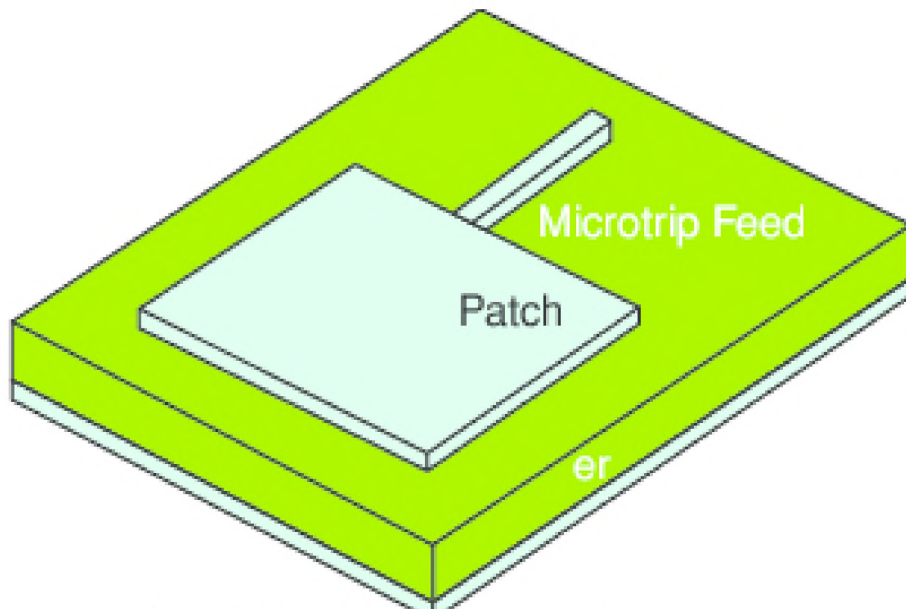


Рисунок 1.16 – Мікросмужкова структура живлення антени [27]

Апертурна подача передбачає використання двох різних підкладок, розділених площиною заземлення. На нижньому боці нижньої підкладки розташована мікросмужкова лінійна подача, яка передає енергію до антени через щілину в площині заземлення, що розділяє дві підкладки. Це розташування дозволяє незалежно оптимізувати механізм подачі та випромінювальний елемент. Зазвичай верхня підкладка має велику товщину та низьку діелектричну проникність, тоді як нижня підкладка має меншу товщину та високу діелектричну проникність. Площина заземлення, розташована посередині, ізолює механізм подачі від випромінювального елемента та мінімізує вплив паразитного випромінювання на формування діаграми спрямованості та чистоту поляризації. Однією з переваг є можливість самостійної оптимізації елементів механізму подачі. Це дозволяє досягти більш точного керування характеристиками антени та покращити її продуктивність.

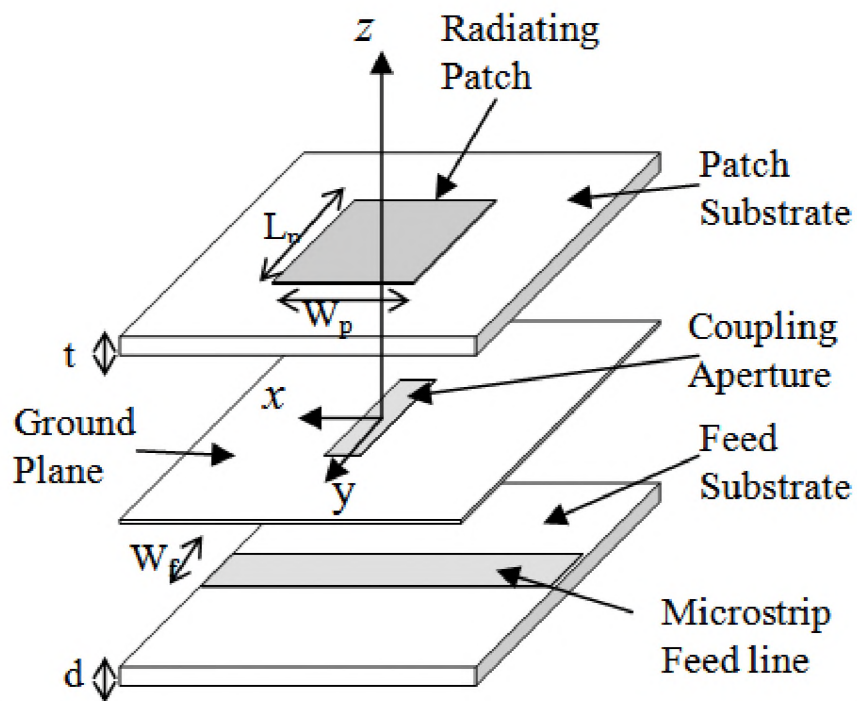


Рисунок 1.17 – Апертурна подача живлення антени [28]

Безконтактний зв'язок відрізняється найбільшою смугою пропускання і низьким рівнем паразитних випромінювань. Однак, його виготовлення є складним процесом. Для контролю узгодження використовуються параметри, такі як довжина живильного шлейфу та співвідношення ширини до довжини антени. Механізм з'єднання має ємнісний характер. Основним недоліком цього методу подачі є складність виготовлення через наявність двох діелектричних шарів, які потребують точного вирівнювання. Крім того, він призводить до збільшення загальної товщини антени.

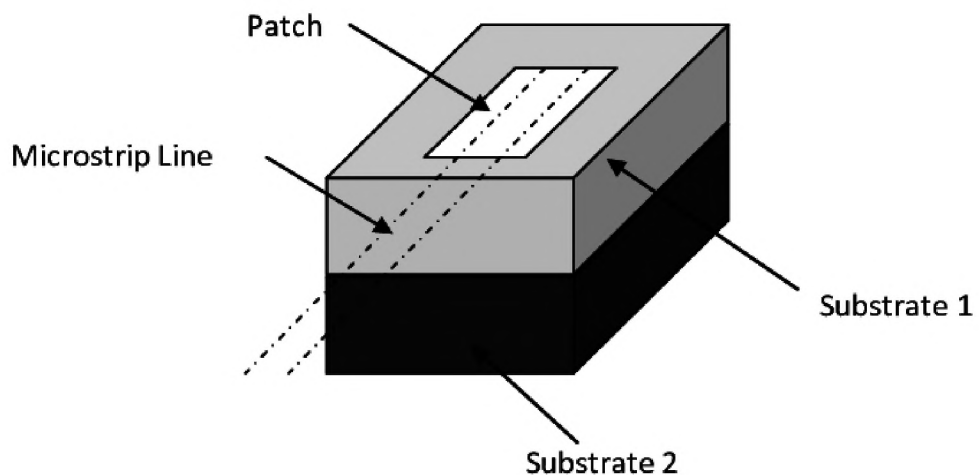


Рисунок 1.18 – Безконтактна структура живлення антени [29]

1.9 Висновки до першого розділу

Огляд конструкцій та характеристик мікросмушкових антен дає нам зрозуміти, що кожна антена має власні переваги та недоліки і тому деяке їх використання може бути обмеженим там, де інша антени впорається з поставленою задачею ефективніше. Важливі характеристики випромінювача залежать від багатьох факторів, таких, наприклад, як форма, розмір чи положення у просторі. Тому існує потреба у вдосконаленні наявних рішень для ефективної роботи в середньому діапазоні 5G.

1.10 Постановка задачі

Спираючись на викладене вище, метою кваліфікаційної роботи є імітаційне моделювання випромінюючого пристрою що призначений для роботи в середньому діапазоні бездротової технології 5G.

Для реалізації заданої мети треба вирішити наступні задачі:

1. Виконати імітаційне моделювання трикутної антени;
2. Оптимізувати узгодження трикутної антени з фідером живлення;
3. Дослідити характеристики випромінювання трикутної антени з покращеним ступенем узгодженості.

2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

2. 1 Побудова математичної моделі та перевірка коректності моделі.

Дослідження параметрів трикутної структури

З практичної точки зору, дуже важливим явищем в антенах є $S(1,1)$ параметр, або ж втрати при поверненні (return loss), який ми і будемо досліджувати в залежності від частоти. За умовну мету візьмемо -30 dB.

Побудова досліджуваної антени починається з трикутної антени, шириною у 14мм, та висотою у 16мм, як зображено на Рисунку 2.1 (а). Резонансна частота може бути розрахована на основі рівняння (2.1) без урахування ефекту окантовки [10]. Параметри c , a , ϵ_r - швидкість світла, довжину сторони трикутної антени та діелектричну проникність, відповідно.

$$f_r = \frac{2c}{3a\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

Резонансна частота може бути визначена з більшою точністю, якщо a і ϵ_r у наведеному вище рівнянні замінити на ефективну діелектричну проникність ϵ_{eff} і a_{eff} . За розрахунками, трикутна антена резонує на частоті 7 ГГц, і результати перевірені на основі моделювання трикутної антени за допомогою методу кінцевих різниць, де за основу взята FR4 з ϵ_r 4.3, шириною(W) 18мм, довжиною(L) 34мм та товщиною(h) 1.6мм, як показано на рисунку 2.3. Навколишній простір антени – повітря. Антена та металізація на звороті – ідеальний електричний провідник. Тангенс кута діелектричних втрат($\tan \delta$) – 0.02.

$$\epsilon_{reff} = \frac{(\epsilon_r+1)}{2} + \frac{(\epsilon_r-1)}{2} \left(1 + 12 \times \frac{h}{W}\right)^{-1} = 3.72 \quad (2.2)$$

$$a_{eff} = a + \frac{h}{\sqrt{\epsilon_r}} = 14.77 \quad (2.3)$$

$$f_r = \frac{2c_0}{3a_{eff}\sqrt{\epsilon_{reff}}} = 7\text{GHz} \quad (2.4)$$

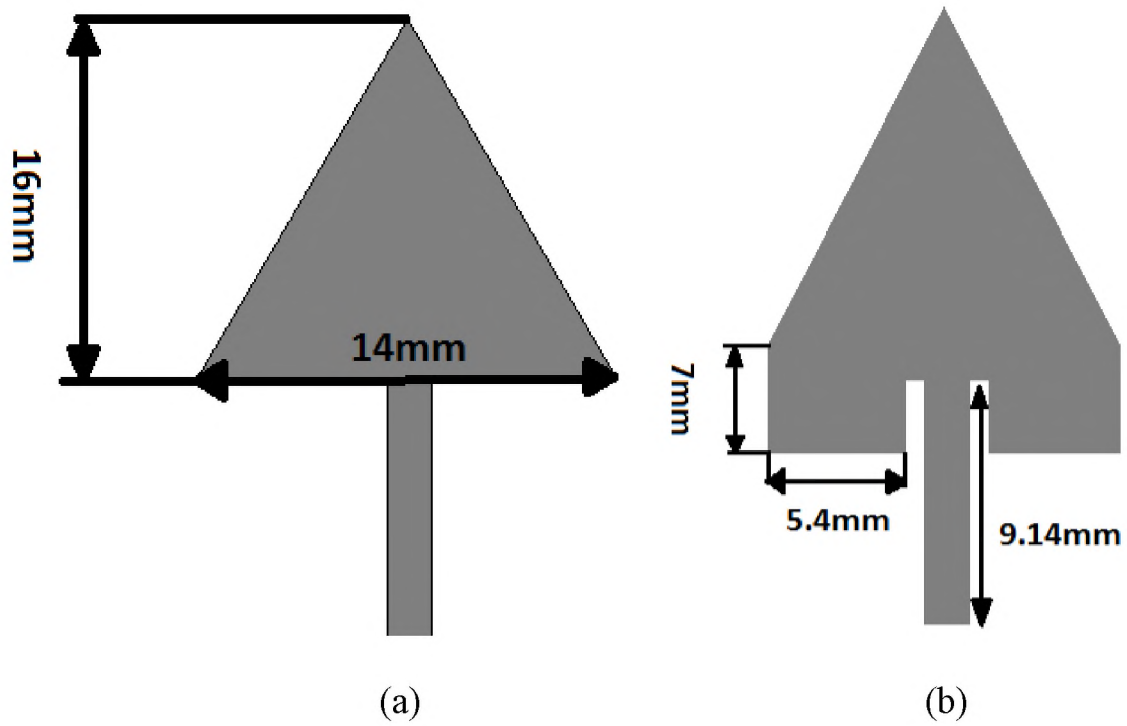


Рисунок 2.1 – Трикутна мікросмужкова антена:
 (a) – загальний вигляд трикутної антени; (b) – вдосконалена трикутна антена

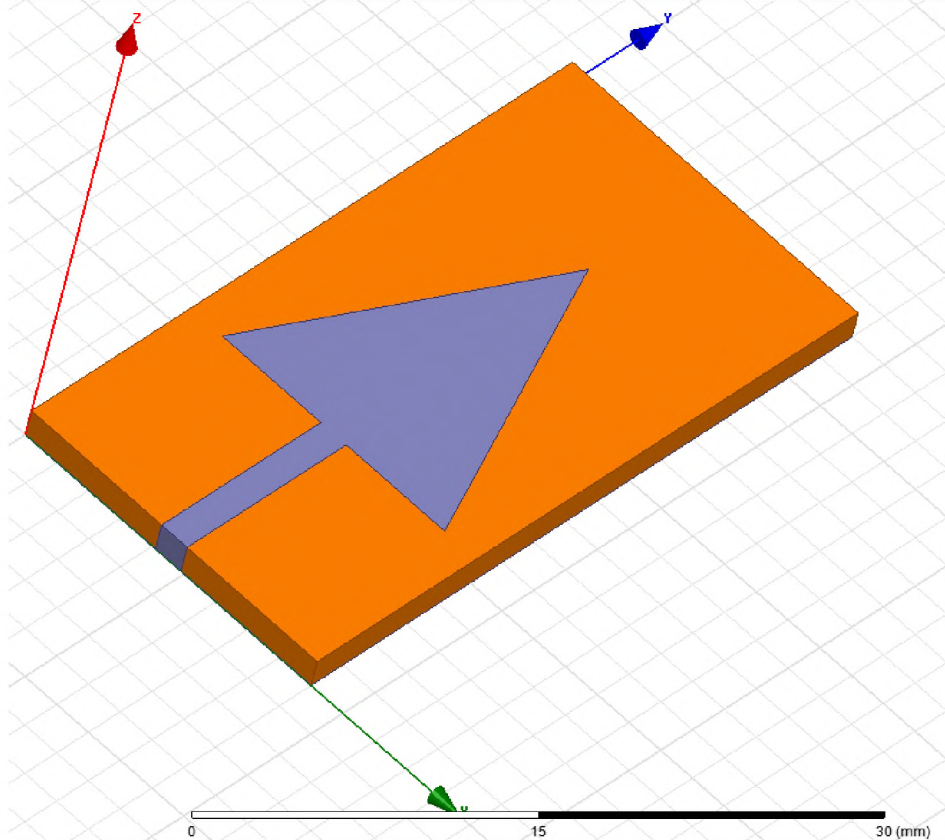


Рисунок 2.2 – Імітаційна модель трикутної антени

Було змодельовано та досліджено модель трикутної антени (Рисунок 2.2). За результатами дослідження на рис.2.3 було виявлено, що дана антена резонує на двох частотах – 5 ГГц та 9.25 ГГц з коефіцієнтами відбиття -10.8 dB та -7.78 dB відповідно.

Але у контексті 5G технологій узгодження вище -10 dB ми не беремо до уваги.

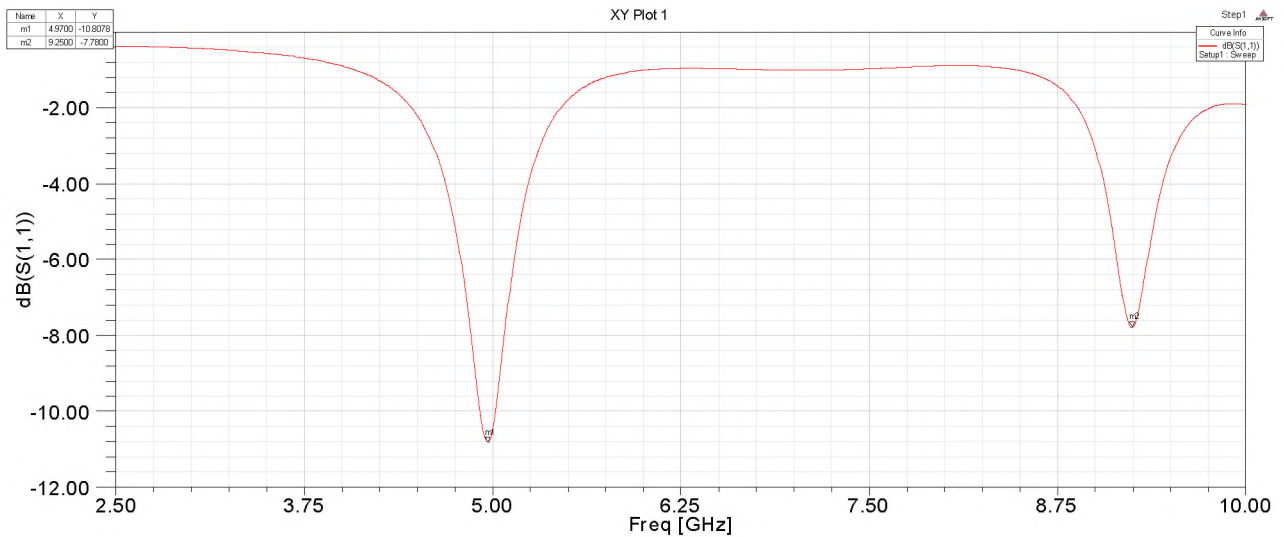


Рисунок 2.3 – Залежність параметру S(1,1) від частоти для трикутної антени розміром 14мм×16мм

Даний графік суттєво відрізняється від літературного джерела [20], у якому була тільки одна точка резонансу, проте ми отримали дві робочі частоти.

2.2 Створення структури з декількома робочими частотами

Наступним кроком буде додавання та об'єднання через додаткову накладку шириною 3.2мм та довжиною 1.86мм, двох прямокутних структур шириною(W) в 5.4мм та довжиною(L) 7мм кожна до трикутної антени, очікуючи на збільшення коефіцієнту відбиття. Вдосконалена антена показана на рис.2.1 (b). Дана конструкція резонує на частоті 4 ГГц.

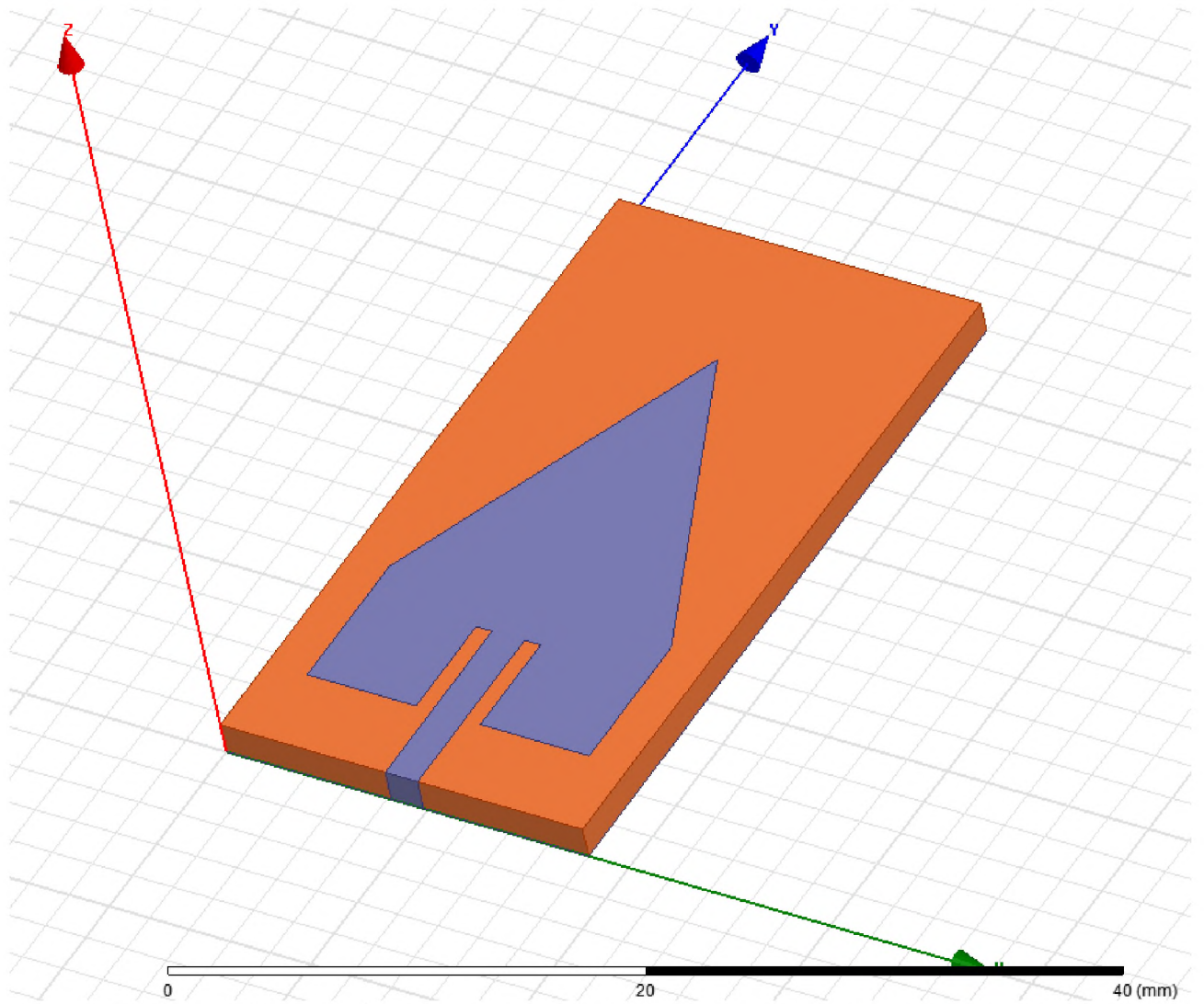


Рисунок 2.4 – Імітаційна модель вдосконаленої трикутної антени

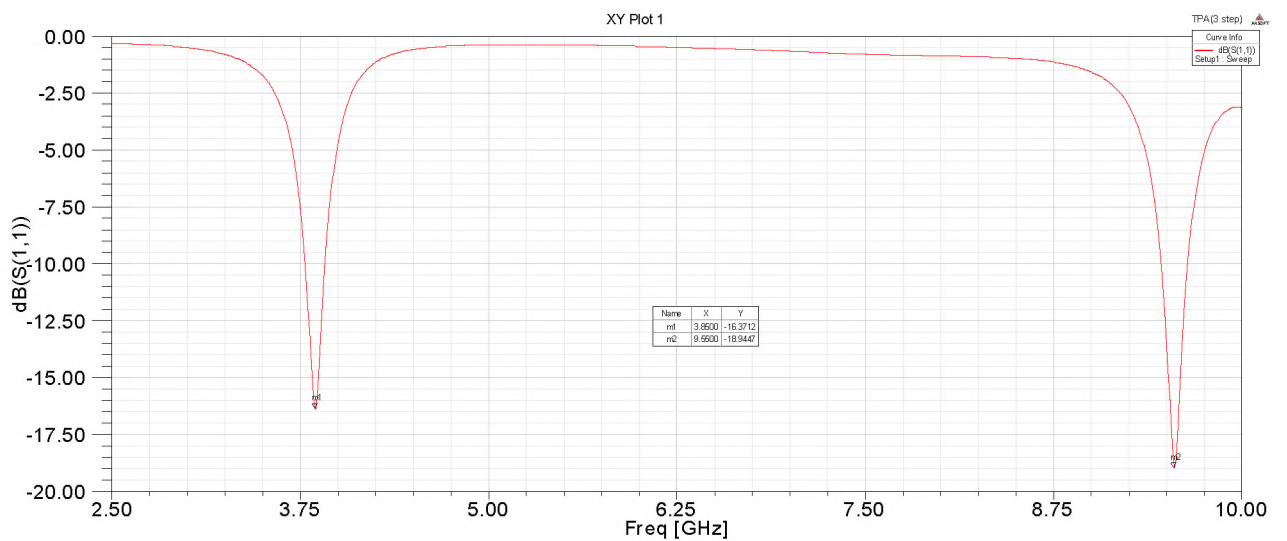


Рисунок 2.5 – Залежність параметру $S(1,1)$ від частоти для вдосконаленої антени

З графіка представленого на рис.2.6 видно, що додавання до трикутної антени двох прямокутних антен та їх об'єднання впливає на збільшення коефіцієнту відбиття з -10.8 dB до 16.3 dB та з -7.78 dB до -18.9 dB як і очікувалось, проте робоча частота зміниться з 5 ГГц та 9.25 ГГц на 3.85 ГГц та 9.55 ГГц відповідно.

2.3. Дослідження додаткових елементів. Додання двох додаткових резонаторів з розділеними кільцями(РРК) та отвору до досліджуваної антени.

Наявна антена вже досить життєздатна, але задля спроби досягнення кращих результатів коефіцієнту відбиття додамо РРК структуру, яка показана на рис. 2.6. Її загальні розміри також вказані на рис. 2.6. Від даної структури очікується покращення параметру $S(1,1)$ та збільшення смуги пропускання. У разі, якщо не вдасться досягти покращення параметрів за допомогою РРК структури, то оберемо інший спосіб досягнення поставленої задачі.

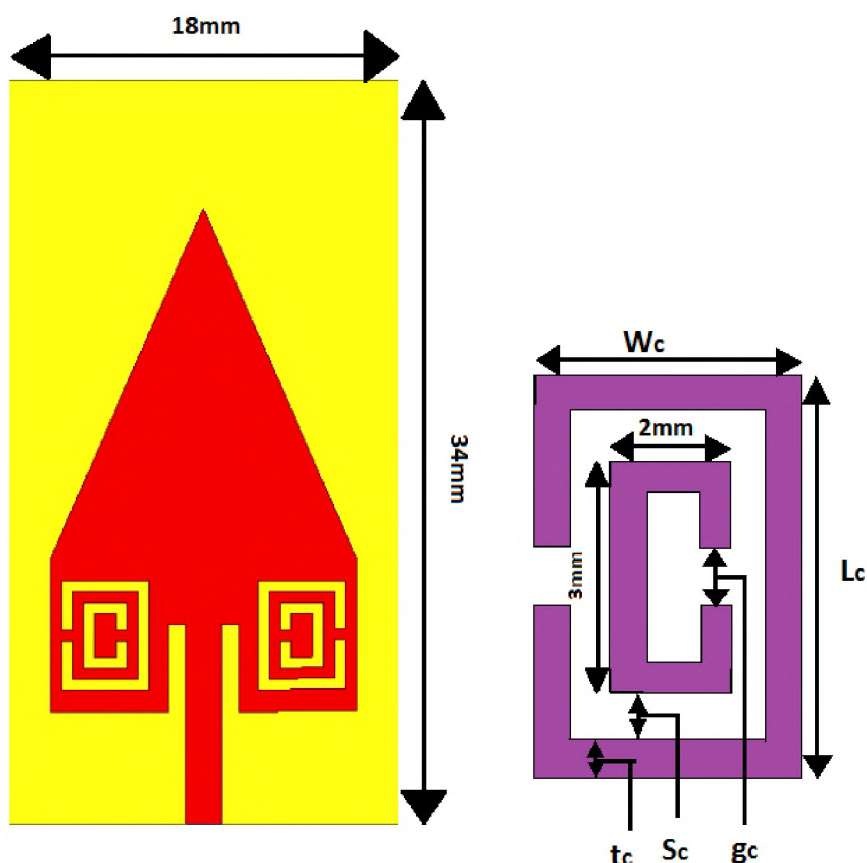


Рисунок 2.6 – Схематичне зображення антени та резонаторів на ній

Таблиця 2.1 – Розміри елементів РРК

Розміри РРК структури (мм)	
Lc	5
Wc	4
gc	0.5
tc	0.5
Sc	0.5

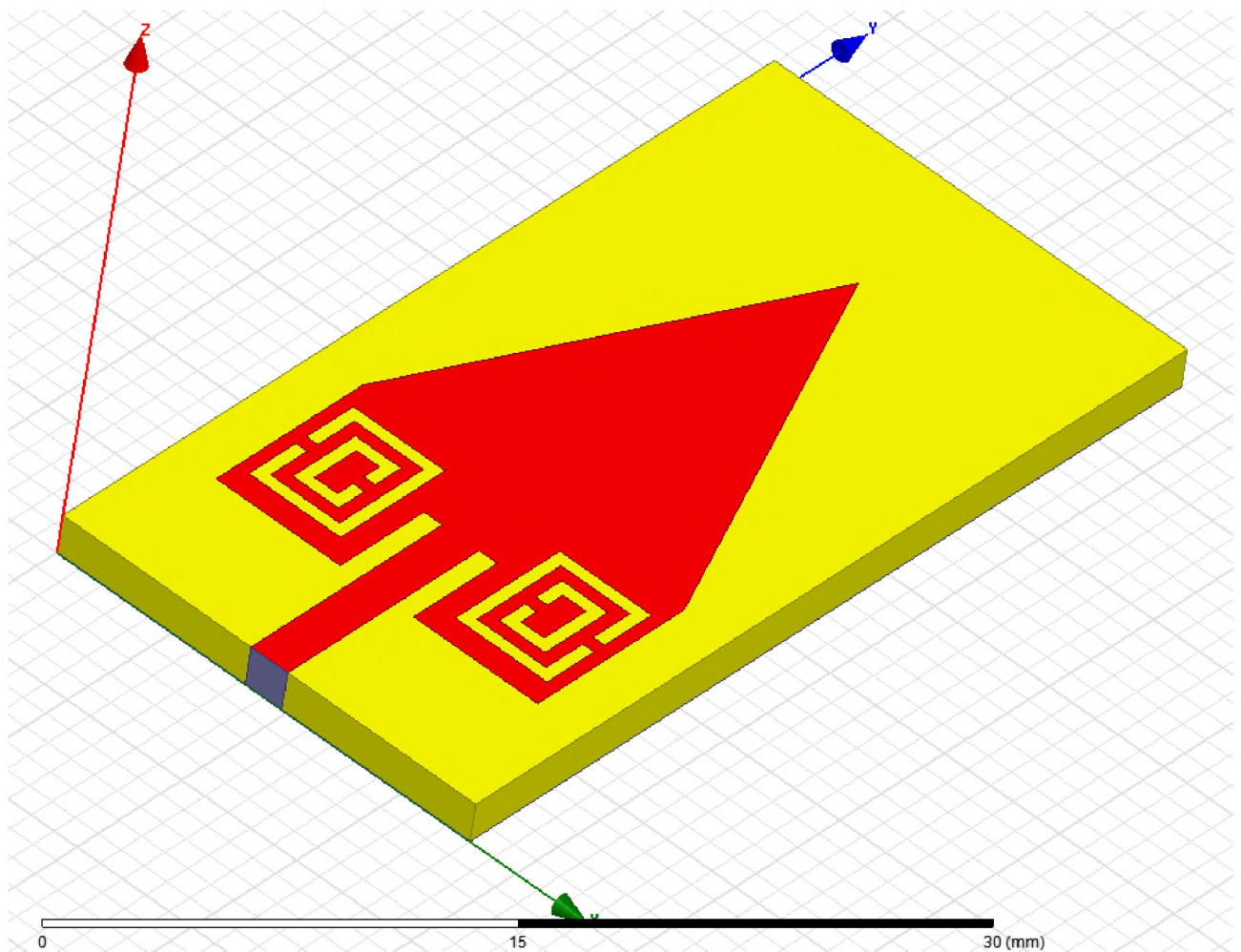


Рисунок 2.7 – Імітаційна модель досліджуваної антени з РРК структурою

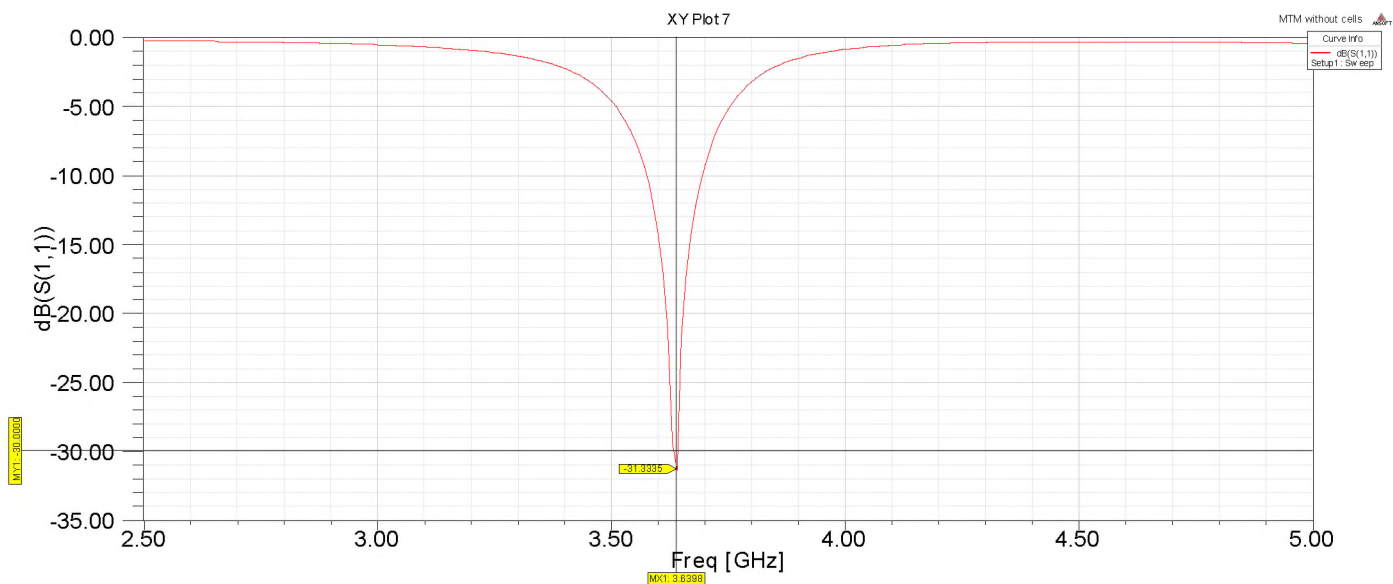


Рисунок 2.8 – Залежність параметру $S(1,1)$ від частоти для досліджуваної антени з РПК структурою при розриві $g_c=0.5\text{мм}$

З рис.2.8 ми можемо одразу відмітити зсув робочої частоти антени до 3.64 ГГц з узгодженням -31 dB та смугою пропускання в 85МГц при -30 dB. Як і очікувалось – РПК структура покращила параметр $S(1,1)$ та збільшила смугу пропускання.

Тепер у ході подальшого дослідження спробуємо змінити розміри одного з параметрів РПК структури, а саме – розриву (g_c) в діапазоні від 0.5мм до 2 мм(з кроком 0.5мм) і подивимося як це вплине на узгодження антени.

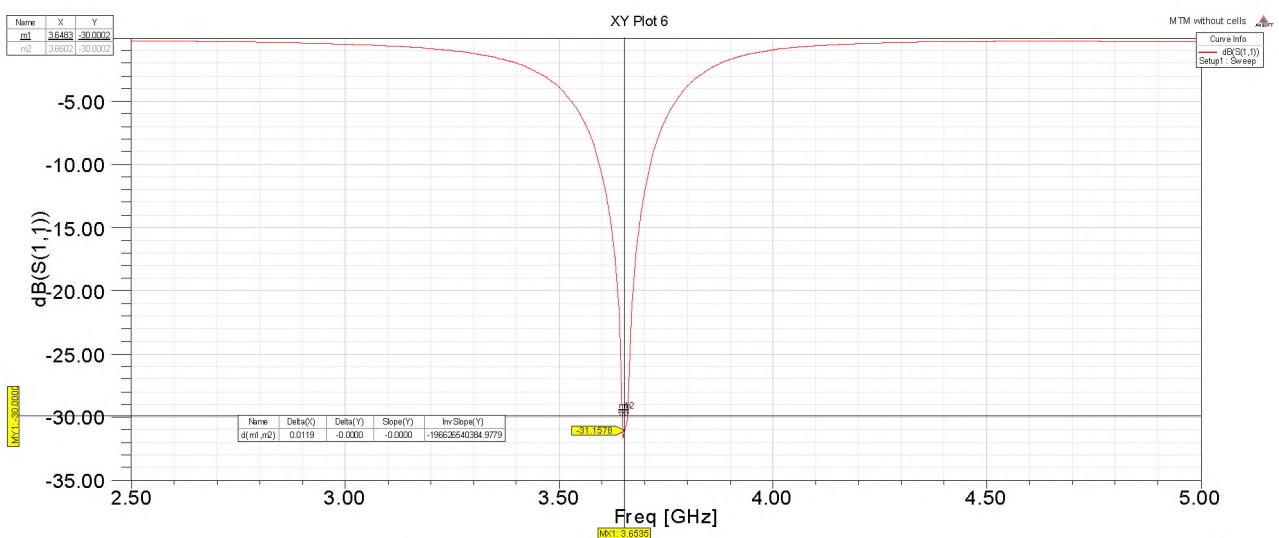


Рисунок 2.9 – Залежність параметру $S(1,1)$ від частоти для досліджуваної антени з РПК структурою при розриві $g_c=1\text{мм}$

З рис.2.9 видно, що збільшення розриву в РРК структурі до 1мм ніяк не вплинуло на узгодження та робочу частоту, вони залишились на попередньому рівні у -31dB та 3.64 ГГц, проте дещо збільшилась смуга пропускання до 120 МГц.

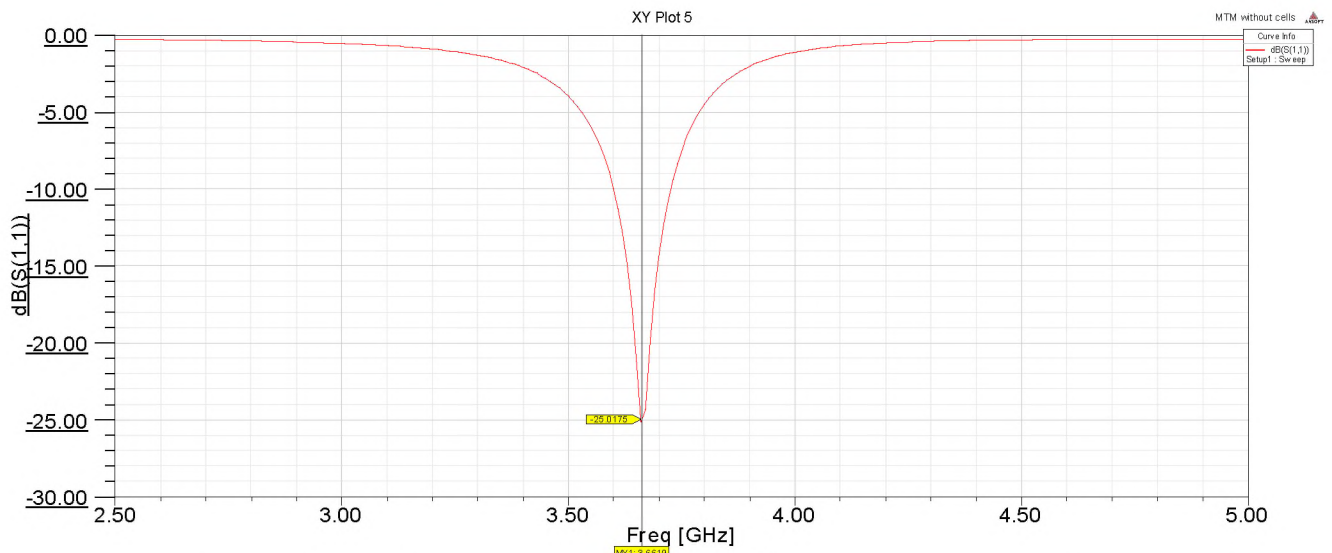


Рисунок 2.10 – Залежність параметру $S(1,1)$ від частоти для досліджуваної антени з РРК структурою при розриві $g_c=1.5$ мм

З рис.2.10 одразу видно погіршення узгодження антени до -25 dB без зміни в робочій частоті.

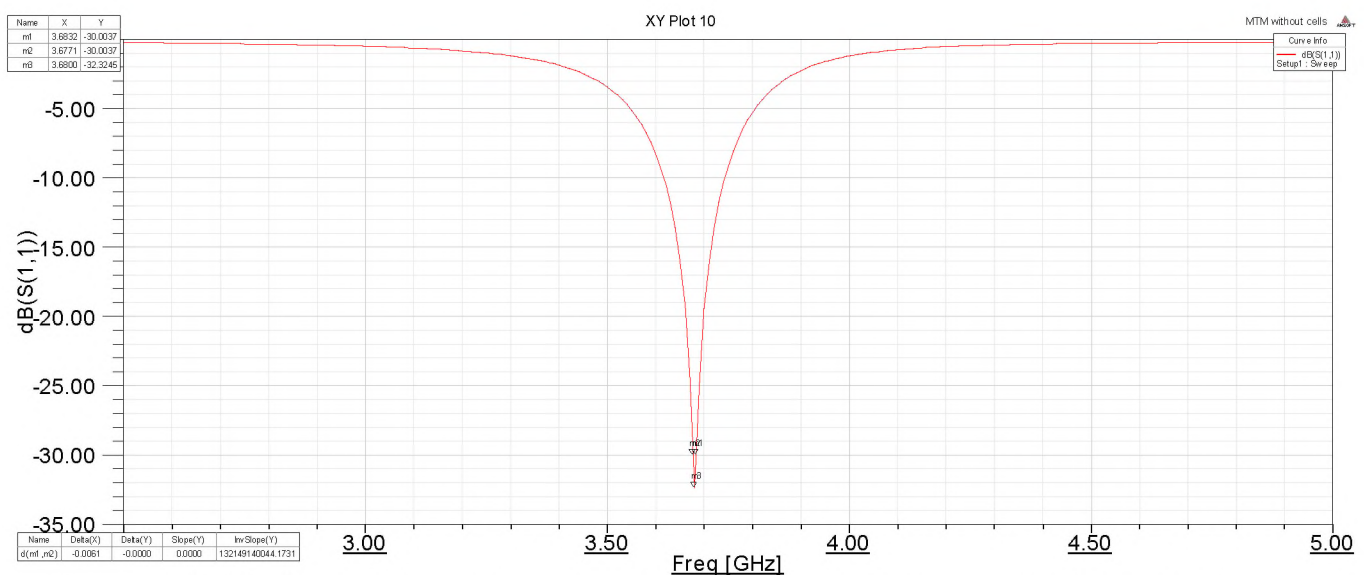


Рисунок 2.11– Залежність параметру $S(1,1)$ від частоти для досліджуваної антени з РРК структурою при розриві $g_c=2$ мм

З рисунку 2.11 видно, що збільшення розриву g_c до 2 мм в РРК покращило рівень узгодження до -32 dB, але на рівні -30 dB смуга пропускання зменшилася до 61 МГц.

Проведено дослідження оптимального розміру розриву в РРК структурі для досліджуваної антени. У ході дослідження з'ясували, що найкращими параметрами володіє антена з розривом $g_c=1$ мм, оскільки має більшу смугу пропускання в 120 МГц при -30 dB і незмінним узгодженням -31 dB та робочою частотою 3.64 ГГц, що зображено на рис.2.9

Таблиця 2.2 – Характеристики при зміні розриву g_c в РРК структурі досліджуваної антени

g_c , мм	$S(1,1)$, dB	f_{min}, f_{max} , ГГц	$\Delta f/f_{сер}$, %
0.5	-31	3.6330	23
		3.6414	
1	-31	3.6483	32
		3.6602	
1.5	-25	3.6551	37
		3.6707	
2	-32	3.6771	16.5
		3.6832	

Аналізуючи дані з таблиці 2, робимо висновок, що оптимальним розміром для розриву в РРК структурі варто вважати 1 мм, при якому маємо найкраще співвідношення $S(1,1) = -31$ dB та $\Delta f/f_{сер} = 32\%$, що є найкращим співвідношенням поміж інших отриманих даних.

Наступним кроком у вдосконаленні досліджуваної антени буде пошук додаткової точки резонансу задля покращення параметру $S(1,1)$ та збільшення смуги пропускання. Аби досягти рішення поставленої задачі в антені був зроблений отвір радіусом $R=0.4$ мм показаний на рис. 2.12. У подальшому будемо намагатися добитися кращого результату завдяки зміні радіусу отвору.

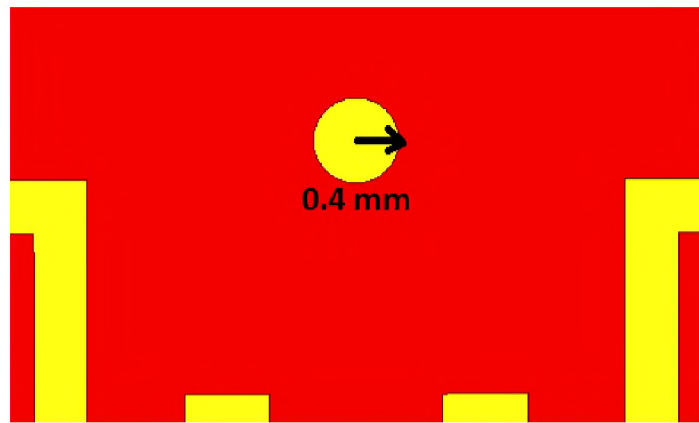


Рисунок 2.12 – Схематичне зображення отвору радіусом(R)=0.4мм у досліджуваній антені

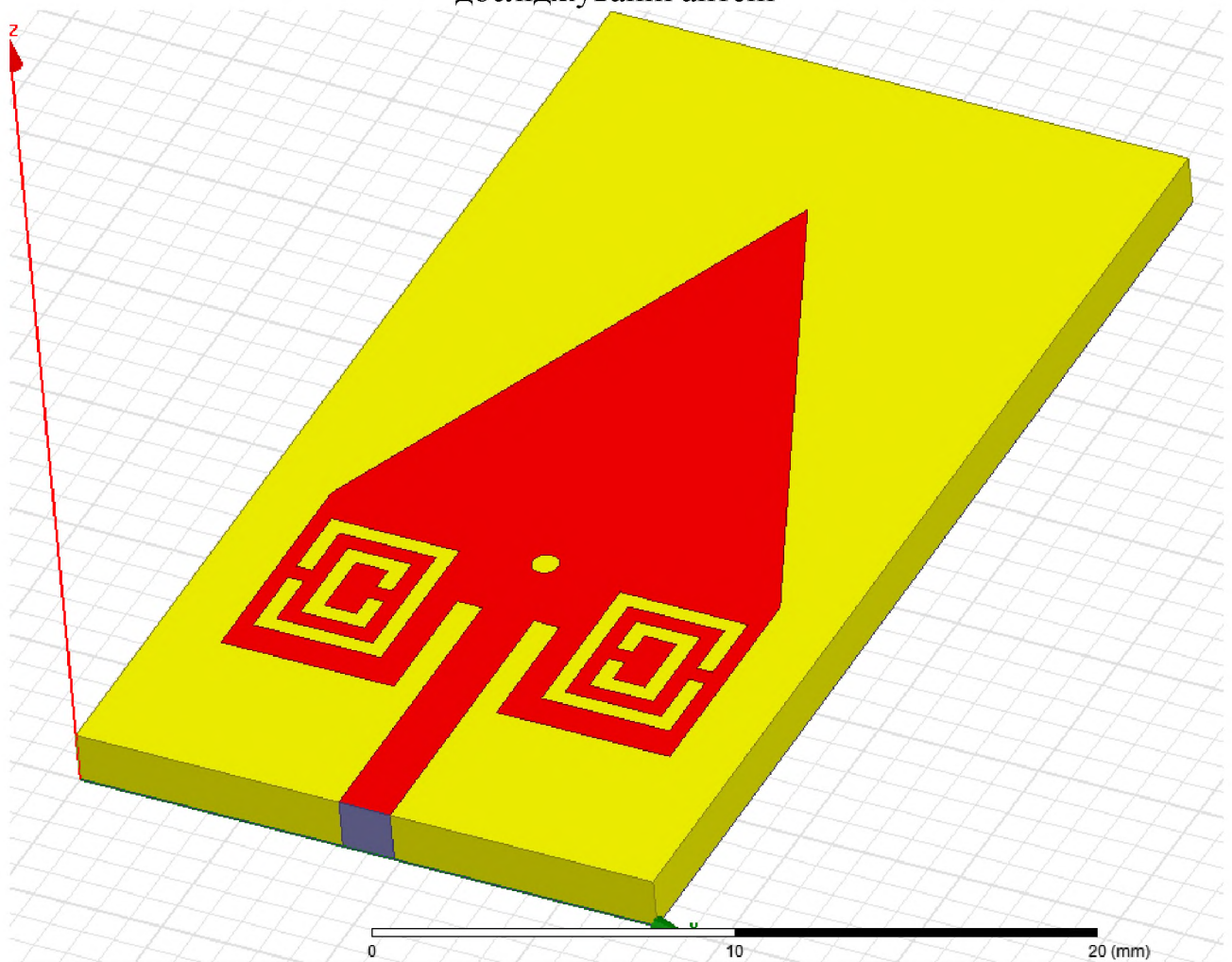


Рисунок 2.13 – Імітаційна модель досліджуваної антени з РРК структурою та отвором радіусом 0.4 мм

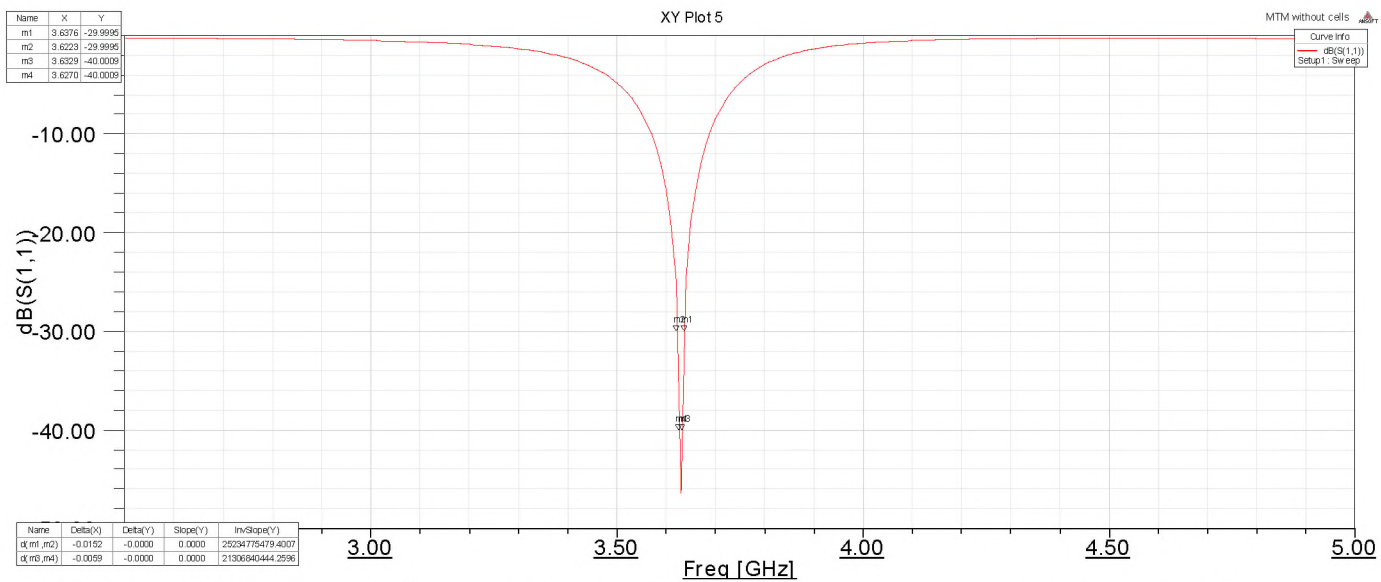


Рисунок 2.14 – Залежність параметру $S(1,1)$ від частоти для досліджуваної антени з отвором, радіус якого дорівнює 0.4 мм

З рис 2.14 можна побачити, що додавання додаткового отвору радіусом 0.4 мм до антени з РРК структурою покращує рівень узгодження до -46 dB на робочій частоті 3.63 ГГц. Також можемо фіксувати збільшення смуги пропускання на -30 dB/152 МГц та -40 dB/59 МГц.

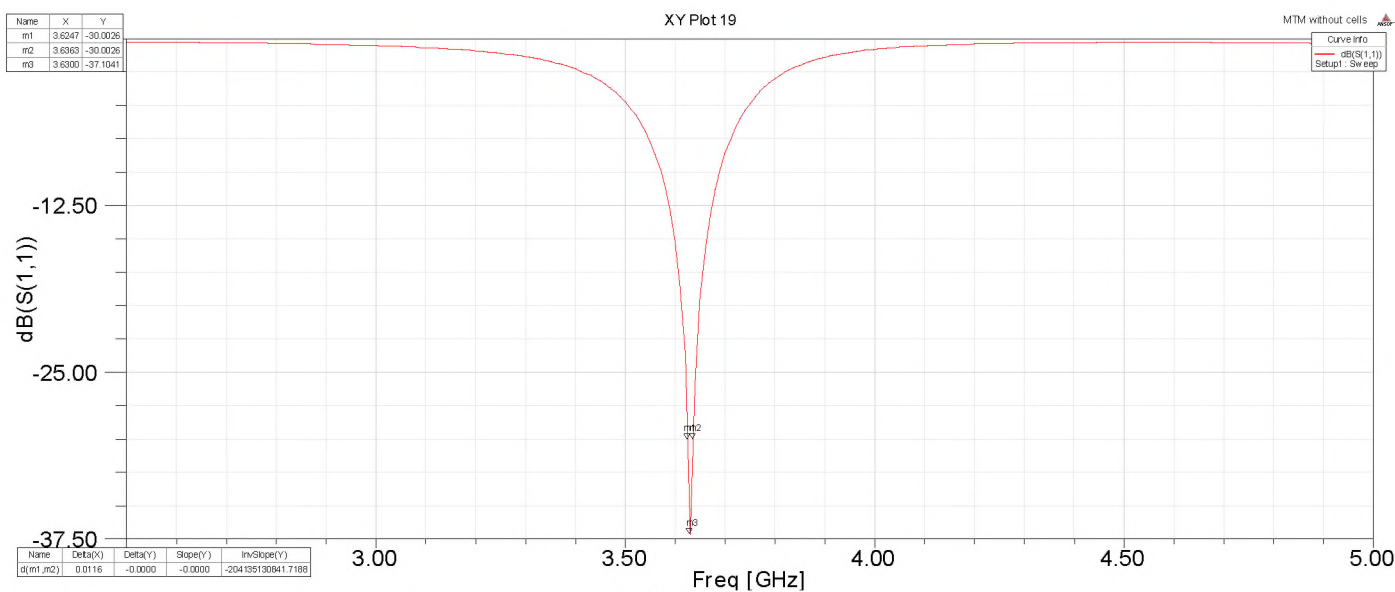


Рисунок 2.15 – Залежність параметру $S(1,1)$ від частоти для досліджуваної антени з отвором, радіус якого дорівнює 0.5 мм

З рис 2.15 можемо зробити висновки, що збільшення радіусу отвору до 0.5 мм тягне за собою погіршення рівня узгодження до -37 dB та зменшення

смуги пропускання до 116 МГц при -30 dB. Отже тепер спробуємо зменшити радіус отвору до 0.3 мм з результатом на рис.2.16.

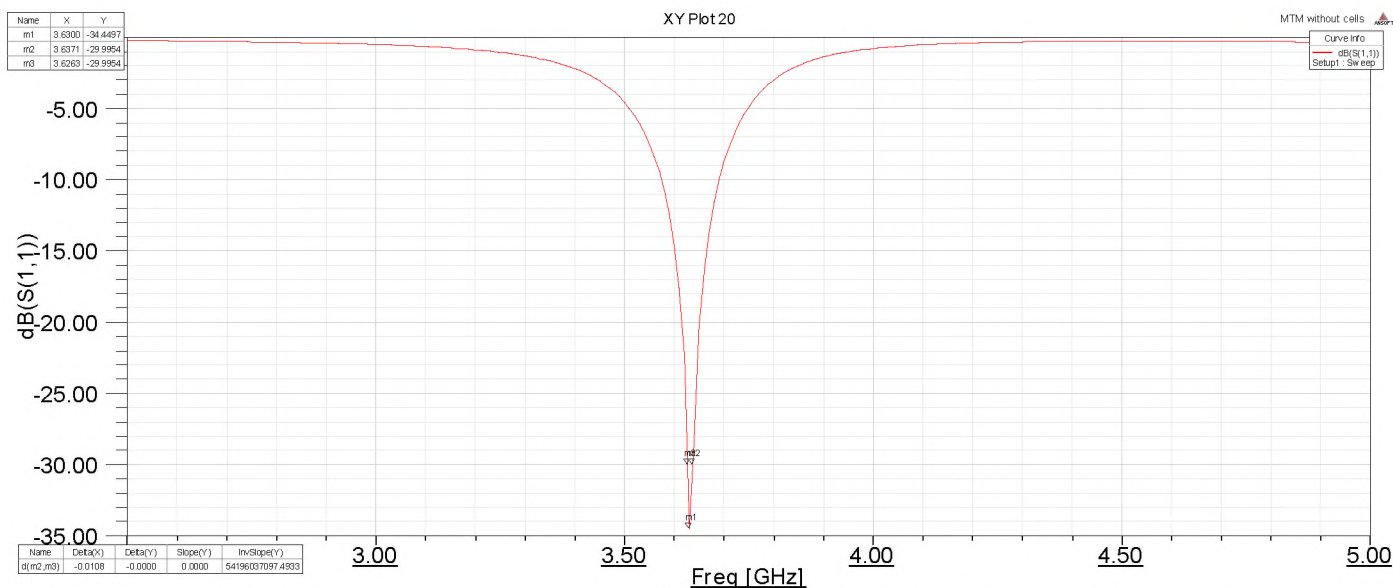


Рисунок 2.16 – Залежність параметру $S(1,1)$ від частоти для досліджуваної антени з отвором, радіус якого дорівнює 0.3 мм

З рис. 2.16 видно, що зменшення радіуса отвору до 0.3 мм погіршило значення узгодження антени до -34 dB та зменшило смугу пропускання до 108 МГц при -30 dB.

Проведено дослідження оптимального розміру отвору в досліджуваній антені з РПК, в очікуванні на покращення параметру $S(1,1)$ та збільшення смуги пропускання. У ході дослідження з'ясували, що досягнення найкращих параметрів можливе при $R=0.4$ мм, де коефіцієнт узгодження антени дорівнює -46 dB на робочій частоті 3.63 ГГц, а смуга пропускання на рівні -30 dB/152 МГц та -40 dB/59 МГц.

Таблиця 2.3 – Характеристики при зміні радіусу(R) отвору в антені з РПК

R , мм	$S(1,1)$, dB	f_{min}, f_{max} , ГГц	$\Delta f/f_{cep}$, %
0.3	-34	3.6263	29
		3.6371	
0.4	-46	3.6223	41
		3.6376	
0.5	-37	3.6247	31
		3.6363	

Аналізуючи дані з табл.3, можемо зробити висновок, що найбільш оптимальним радіусом отвору для досліджуваної антени з РРК структурою треба вважати 0.4 мм, оскільки саме при такому значенні R ми маємо найкращий параметр $S(1,1) = -46$ dB, смугу пропускання в 152 МГц при -30 dB та $\Delta f/f_{сер}=41\%$.

Для отриманих оптимальних розмірів виконаємо побудову тривимірної діаграми спрямованості антени. Результат ми бачимо на рис. 2.17

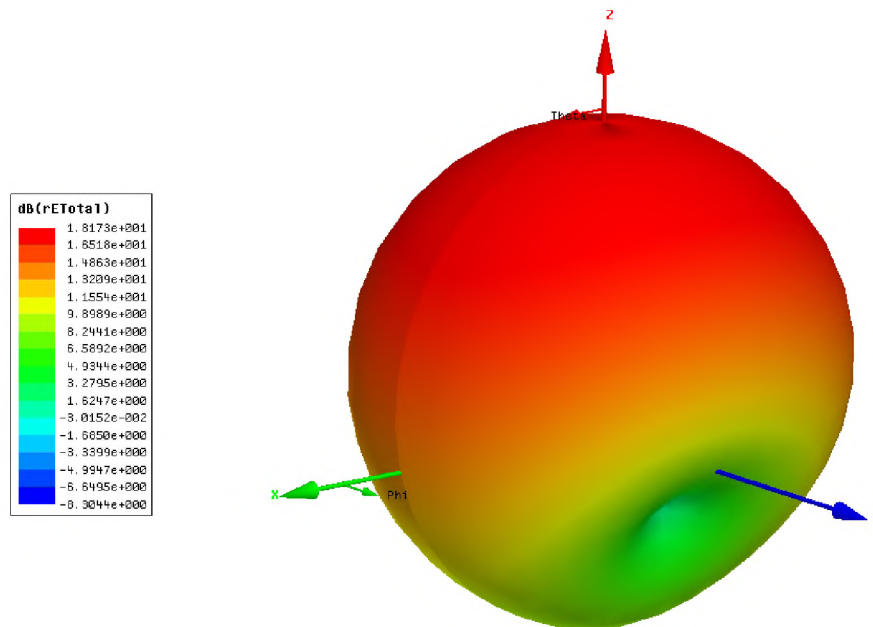


Рисунок 2.17 – Тривимірна діаграма спрямованості досліджуваної антени

Аналіз рис 2.17 свідчить про те, що випромінювання від антени направлене вгору та загальний вигляд тривимірної діаграми спрямованості нагадує приплюснутий знизу еліпс.

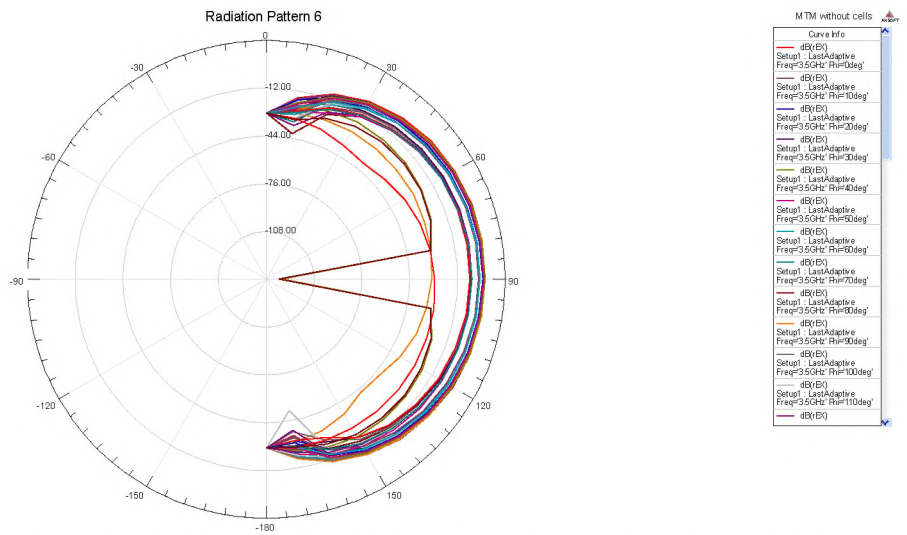


Рисунок 2.18 – Двовимірна діаграма спрямованості досліджуваної антени для площини X

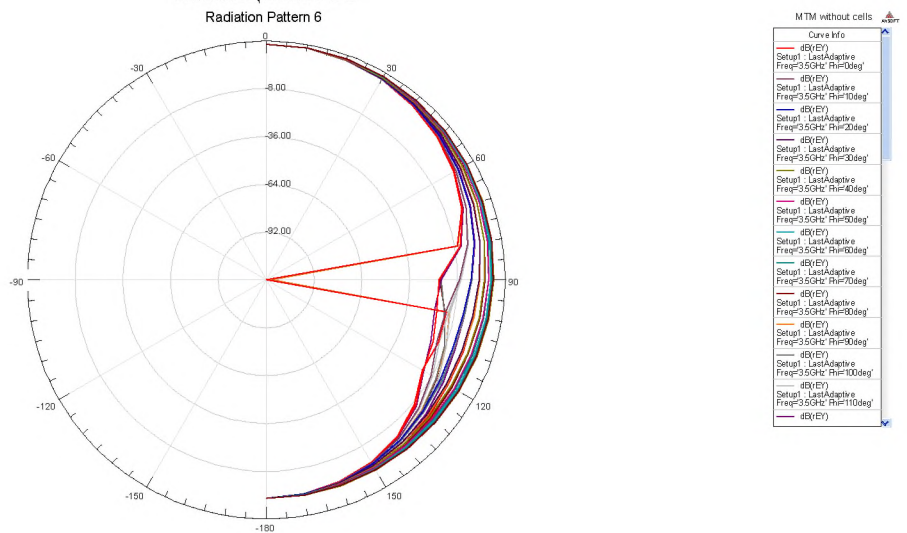


Рисунок 2.19 – Двовимірна діаграма спрямованості досліджуваної антени для площини Y

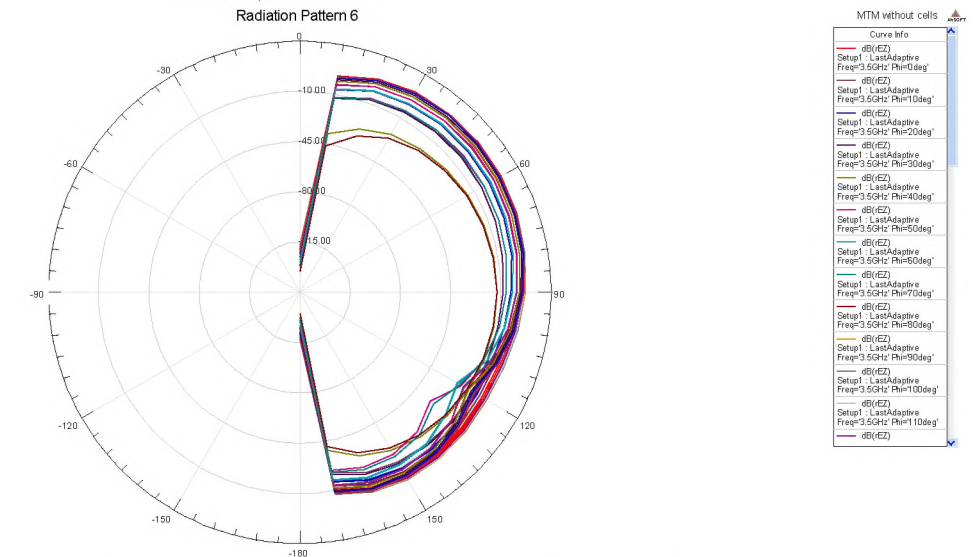


Рисунок 2.20 – Двовимірна діаграма спрямованості досліджуваної антени для площини Z

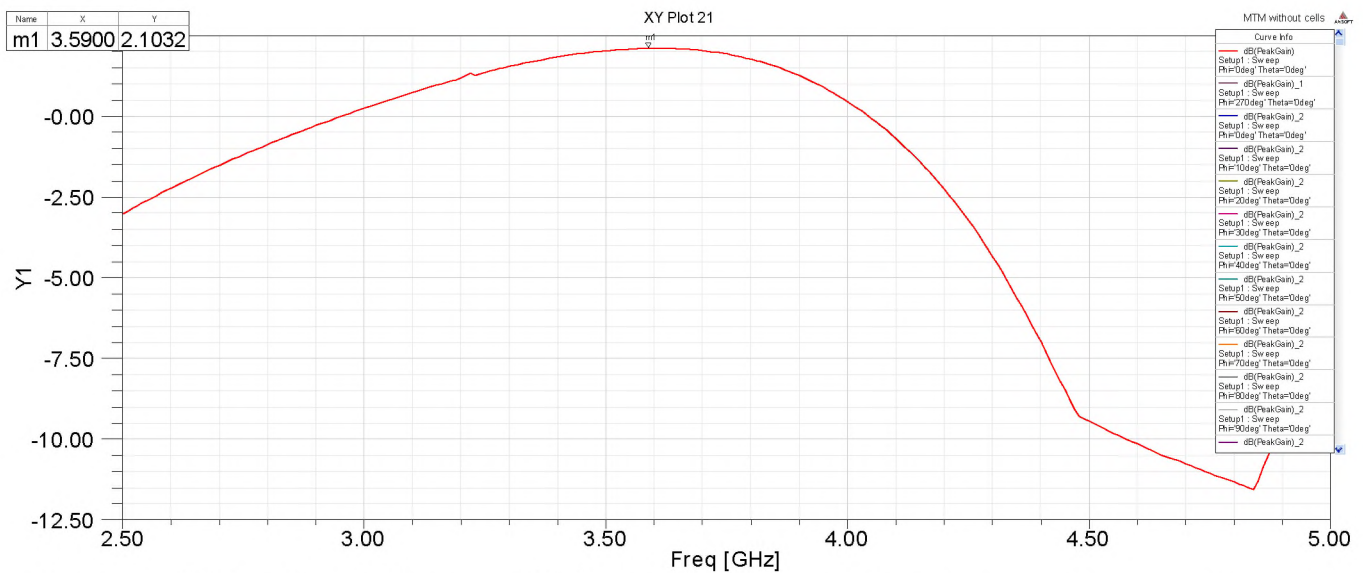


Рисунок 2.21 – Залежність коефіцієнта підсилення від частоти для антени з оптимальним ступенем узгодження

Як видно з рис. 2.21, максимальний коефіцієнт підсилення досліджуваної антени досягається на частоті 3.59 ГГц і дорівнює 2.1 dB.

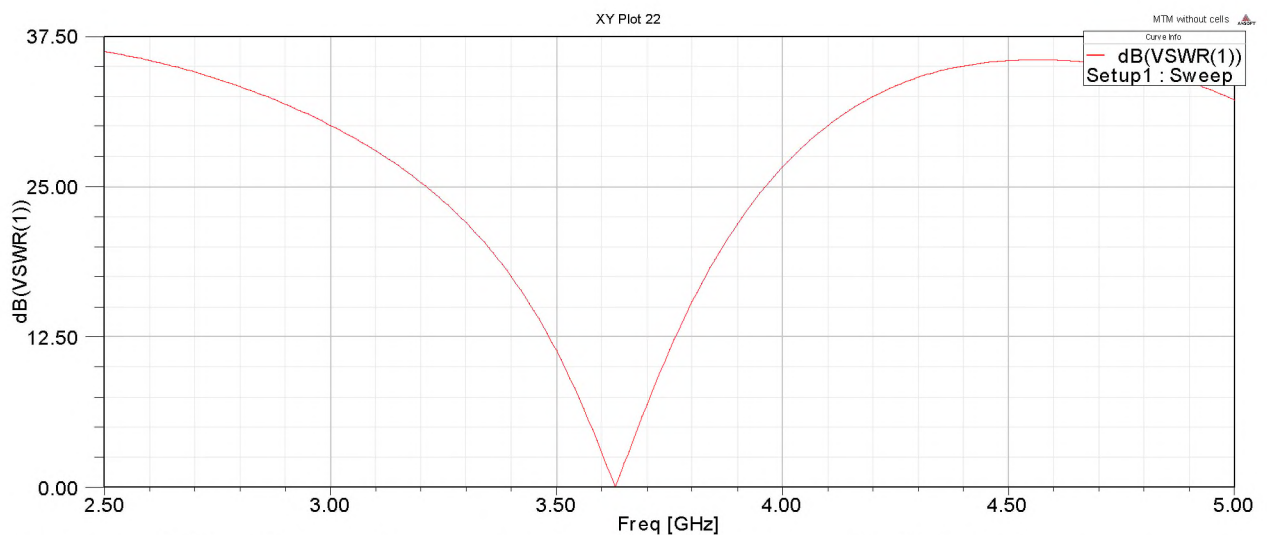


Рисунок 2.22 – Залежність коефіцієнта стоячої хвилі(VSWR) від частоти для оптимізованої конструкції антени

З рис 2.22 можна бачити, що відношення падаючої хвилі до відбитої на частоті 3.63 ГГц дорівнює 1

2.4 Висновки до другого розділу

Під час виконання кваліфікаційної роботи було проведено дослідження класичної мікросмужкової антени. Було проведено імітаційне моделювання класичної мікросмужкової антени. Результати дослідження показали, що ефективність антени залежить від її геометрії та параметрів. Було встановлено, що зміна розмірів та форми антени може значно впливати на її характеристики, такі як коефіцієнт відбиття, діаграма спрямованості та пропускна здатність. Також було виявлено, що вони мають свої переваги та обмеження. Враховуючи ці фактори, можна знайти оптимальну конфігурацію антени для конкретних вимог і застосувань, зокрема і в мережі 5G, а також знизити вартість.

Проведено імітаційне моделювання покращеної трикутної мікросмужкової антени. Виявлено, що дана конструкція недостатньо ефективна для використання у мережі 5G.

Проведено імітаційне моделювання покращеної трикутної антени з РРК структурою та отвором. Дослідження показали, що дана конструкція задовольняє вимогам, до роботи у мережі 5G.

3 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Останнім часом зростає роль освоєння середнього діапазону частот для масового застосування 5G технології. Для цього нам необхідна якісна антенна структура.

Метою кваліфікаційної роботи є імітаційне моделювання випромінюючого пристрою що призначений для роботи в середньому діапазоні бездротової технології 5G.

Для досягнення поставленої мети у кваліфікаційній роботі запропонована оптимальна модель мікросмужкового випромінювача з РРК структурою та отвором. При цьому антенна структура повинна бути простою в технічній реалізації і також економічно вигідною.

3.1 Визначення трудомісткості мікросмужкової антени з резонуючою структурою

Трудомісткість розробки мікросмужкової антенної РРК структури може бути розрахована на основі системи моделей з різною точністю оцінки. Трудомісткість розробки антени можна розрахувати за формулою:

$$t = t_{ТЗ} + t_{И} + t_{A} + t_{П} + t_{Д}, \text{ чол-год} \quad (3.1)$$

де $t_{ТЗ}$ – витрати праці на підготовку і опис технічного завдання (15 чол-год);
 $t_{И}$ – витрати праці на дослідження методів моделювання;
 t_{A} – витрати праці на розробку моделі в пакеті;
 $t_{П}$ – витрати праці на створення структурної схеми антени;
 $t_{Д}$ – витрати праці на підготовку документації.

Складові витрати праці визначаються через умовну кількість елементарних операцій в розробці схеми живлення. Умовне число елементарних операцій:

$$Q = q \cdot C \cdot (1 + p), \quad (3.2)$$

де q – число базових елементарних операцій розробки антени (700);
 C – коефіцієнт складності розроблюваної антени (1);
 p – коефіцієнт корекції моделі антени в ході її розробки (0.125).

Звідси умовне число елементарних операцій розробки антени:

$$Q = 1 \cdot 700 \cdot (1 + 0.125) = 787.5 \quad (3.3)$$

Витрати праці на вивчення опису завдання t_{II} визначаються з урахуванням уточнення опису та кваліфікації інженера:

$$t_{II} = (Q \cdot B) / 80 \cdot K, \quad (3.4)$$

де B – коефіцієнт збільшення витрат праці внаслідок недостатнього опису завдання;

K – коефіцієнт кваліфікації розробника, що визначається залежно від стажу роботи з даної спеціальності. При стажі роботи від 1 до 5 років, він складає 1.

Прийmemo збільшення витрат праці внаслідок недостатнього опису завдання не більше 50% ($B = 1.5$). З урахуванням коефіцієнта кваліфікації $K = 1$ отримаємо витрати праці на вивчення опису завдання:

$$t_{II} = (787.5 \cdot 1.5) / (80 \cdot 1) = 14.76 \text{ чол-год.} \quad (10.55) \quad (3.5)$$

Витрати праці на розробку антени визначаються за формулою:

$$t_A = \frac{Q}{20 \cdot K}, \quad (3.6)$$

де Q – умовне число елементарних операцій в розробці антени;

K – коефіцієнт кваліфікації розробника.

Підставивши відповідні значення у формулу (3.2), отримаємо:

$$t_A = 787.5 / (20 \cdot 1) = 39.37 \text{ чол-год.} \quad (3.7)$$

Витрати на створення нової структурної схеми антени:

$$t_{II} = \frac{Q}{25 \cdot K}, \quad (3.8)$$

$$t_{II} = 787.5 / (25 \cdot 1) = 31.5 \text{ чол-год.}$$

Витрати на підготовку документації визначаються за формулою

$$t_D = t_{\partial p} + t_{\partial o}, \quad (3.9)$$

де $t_{\partial p}$ – трудомісткість підготовки матеріалів і рукописи;

$t_{\partial o}$ – трудомісткість редагування, друку та оформлення документації.

$$t_{\partial p} = Q / (20 \cdot 1), \quad (3.10)$$

$$t_{\partial o} = 0,75 \cdot t_{\partial p}. \quad (3.11)$$

Підставляючи відповідні значення, отримаємо:

$$t_{\partial p} = 787.5 / (20 \cdot 1) = 39.37 \text{ чол-год.}$$

$$t_{\partial o} = 0,75 \cdot 39.37 = 29.52 \text{ чол-год.}$$

$$t_D = 39.37 + 29.52 = 68.89 \text{ чол-год.}$$

Повертаючись до формули (3.1), отримаємо повну оцінку трудомісткості розробки мікросмужкової антенної РРК структури:

$$t = 15 + 14.76 + 39.37 + 31.5 + 68.89 = 169.52 \text{ чол-год.}$$

3.2 Витрати на створення мікросмужкової антенної структури

Витрати на створення мікросмужкової антенної резонансної структури ($K_{\text{по}}$) включають витрати на заробітну плату розробника ($Z_{\text{зп}}$) і вартість машинного часу, необхідного для його розробки на ЕОМ ($Z_{\text{мв}}$):

$$K_{\text{по}} = Z_{\text{зп}} + Z_{\text{мв}}, \text{ грн.} \quad (3.12)$$

Заробітна плата розробника визначається за формулою:

$$Z_{\text{зп}} = t \cdot C_{\text{зп}}, \text{ грн.} \quad (3.13)$$

де t – загальна трудомісткість розробки моделі антени, чол.г;

$C_{\text{зп}}$ - середня годинна заробітна плата інженера з нарахуваннями.

З урахуванням того, що середня годинна зарплата розробника становить 94 грн/год, отримуємо:

$$Z_{\text{зп}} = 169.52 \cdot 94 = 15\,934.88 \text{ грн.}$$

Вартість машинного часу, необхідного для створення мікросмужкової антенної РРК структури на ЕОМ, визначається за формулою:

$$Z_{\text{мв}} = t_{\text{рс}} \cdot C_{\text{мч}}, \text{ грн.} \quad (3.14)$$

де $t_{\text{рс}}$ – трудомісткість розробки антени та створення моделі на ЕОМ, час;

$C_{\text{мч}}$ – вартість машинного часу ЕОМ (10 грн / год).

Підставивши у формулу (3.12) відповідні значення, визначимо вартість машинного часу, необхідного для створення антени:

$$Z_{\text{мв}} = 169.52 \cdot 10 = 1695,2 \text{ грн.}$$

Звідси витрати на розробку антени:

$$K_{\text{по}} = 11\,317,6 + 963,2 = 17\,630,08 \text{ грн.}$$

Очікуваний період розробки моделі антени:

$$T = \frac{t}{B_k \cdot F_p}, \text{ міс} \quad (3.15)$$

де B_k – число інженерів (дорівнює 1),

F_p – місячний фонд робочого часу (при 40-годинному робочому тижні $F_p=168$ годин).

Підставивши відповідні значення, отримаємо:

$$T = 169.52 / 1 \cdot 168 \approx 1 \text{ міс} \approx 30 \text{ днів}$$

3.3 Капітальні витрати

Капітальні витрати включають в себе кошти, які призначені для створення і придбання основних фондів і нематеріальних активів, що підлягають амортизації.

Монтажно–налагоджувані роботи складають 9% від вартості устаткування. Транспортно – заготівельні і складські витрати складають 6% від вартості устаткування

Таким чином, капітальні витрати на здійснення проектного варіанту складають:

$$K_{\text{гр}} = K_{\text{об}} + K_{\text{тр}} + K_{\text{мн}} \quad (3.16)$$

де $K_{\text{об}}$ – вартість обладнання (6000 грн)

$K_{\text{тр}}$ – транспортні витрати

$K_{\text{мн}}$ – витрати на монтаж і налагодження устаткування

$$K_{\text{тр}} = 6\% \times K_{\text{об}} = 360 \text{ грн.}$$

$$K_{\text{мн}} = 9\% \times K_{\text{об}} = 540 \text{ грн.}$$

$$K_{\text{гр}} = 6000 + 360 + 540 = 6900 \text{ грн.}$$

3.4 Залежність ціни мікросмужкової антенної структури від попиту

Ціна на розробку мікросмужкової антенної структури розраховується з урахуванням капітальних затрат $K_{\text{гр}}$ та витрат на розробку $K_{\text{роз}}$:

$$\Delta C = K_{\text{гр}} + \frac{K_{\text{роз}}}{N_{\text{моб}}} \quad (3.17)$$

де $N_{\text{моб}}$ – кількість кінцевих пристроїв.

Візьмемо 100 кінцевих пристроїв:

$$\Delta C = 6000 + 17\,630.08/100 = 6176,3008 \text{ грн}$$

Також приведемо розрахунок при кількості 10000 кінцевих пристроїв:

$$\Delta C = 6000 + 17\,630.08/10000 = 6001,763008 \text{ грн}$$

Отже видно, що при збільшенні попиту на кінцеві пристрої, ціна на розробку нових антенних структур буде рівномірно розподілятися між іншими пристроями, а загальна ціна кожного окремого кінцевого пристрою буде зменшуватися.

Крім того, якість зв'язку покращується за рахунок покращення характеристик прийому/передачі антени, що позитивно впливає на попит, отже й на прибуток підприємства.

3.5 Визначення економічної переваги розробленого випромінюючого пристрою

Розробка оптимізованої мікросмужкової антени з (РРК) має потенціал покращити характеристики антени, що сприятиме вдосконаленню якості передачі та прийому даних між пристроями. Оптимізована структура РРК антени забезпечує надійну передачу та прийом даних з мінімальними втратами і користується підвищеним попитом на ринку. На даний момент на ринку існує кілька аналогічних продуктів, середня вартість яких становить 40000 грн. Враховуючи витрати на розробку даної оптимізованої мікросмужкової РРК антени, пропонується встановити середню ціну у розмірі 23 600 грн., що є на 16400 грн. нижче від середньої вартості його аналогів.

3.6 Існуючі аналоги

Більшість розробників антенних структур патентують конструкцію своїх пристроїв. Тому рекомендації з вибору конструкції, геометричних розмірів та загальний процес, що відбувається в антенній структурі попадає під охорону як об'єкт інтелектуальної власності. Хоча нині типи мікросмужкових антен з резонансною структурою і використовуються в пристроях, але відомості про них в літературі є досить обмеженими. Тому метою кваліфікаційної роботи є

імітаційне моделювання випромінюючого пристрою що призначений для роботи в середньому діапазоні бездротової технології 5G.

3.7 Висновки до третього розділу

Виконавши розрахунок витрат на розробку оптимізованої мікросмужкової антени та аналізу існуючих аналогів, була виявлена її конкурентоспроможність, де призначена вартість у розмірі 23 600 грн.

Вартість розробки поліпшеної мікросмужкової РРК антени становить 17 630.08 грн.

Очікуваний час розробки складає 30 днів. Цей термін пов'язаний з досить великим часом на дослідження та аналіз існуючих моделей, розробкою оптимізованої моделі мікросмужкової антени, створення структурної схеми та підготовку документації.

Залежність ціни кожного окремого кінцевого пристрою від попиту показує, що чим більшу кількість буде виготовлено, тим менша ціна буде у кожного окремого пристрою.

ВИСНОВОК

В ході виконання кваліфікаційної роботи виконано наступне:

- виконане імітаційне моделювання класичної трикутної антени. У результаті проведених досліджень встановлено, що класична модель має ваду поганого узгодження з мікросмужковим фідером живлення, що виражається у великих значеннях параметру $S(1,1)$ (від $-10,8$ dB до $-7,78$ dB) та неможливість зсування робочої частоти;
- виконано імітаційне моделювання покращеної трикутної антени. Запропоновано з метою покращення узгодження антени додавання певних резонаторних структур до загальної конструкції антени. До трикутної антени було додано дві прямокутні структури. Математичне моделювання даної антени показало, додавання таких структур змінює робочу частоту до необхідної в середньому діапазоні 5G на рівні 3.85 ГГц, але коефіцієнт відбиття у $-16,3$ dB не відповідає заданим цілям у принаймні -30 dB ;
- виконане імітаційне моделювання покращеної трикутної антени з РРК структурою та отвором. У процесі покращення попередньої моделі антени, було додано дві РРК(резонатор з розділеними кільцями) структури та отвір. У ході дослідження було з'ясовано, що досліджувана антена з РРК без отвору, вже відповідає заданим вимогам при розмірі розриву в РРК $g_s=1$ мм, і має робочу частоту в 3.63 ГГц та коефіцієнт відбиття -31 dB та смугою пропускання у 120 МГц. Наступним кроком у покращенні отриманих характеристик досліджуваної антени було додавання отвору радіусом $(R)=0.4$ мм, що у подальшому виявилось оптимальним розміром. У результаті відбулося покращення коефіцієнту відбиття до -46 dB та збільшення смуги пропускання на рівнях узгодження -30 dB/152 МГц та -40 dB/59 МГц.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. What is 5G mobile technology » electronics notes. *Electronics Notes: reference site for electronics, radio & wireless*. URL: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/5g-mobile-wireless-cellular/technology-basics.php> (дата звернення: 08.06.2023).
2. [Переваги технології 5G над попередниками]. *Новини 24, останні події, свіжі репортажі, ексклюзиви | Телеканал 24*. URL: https://24tv.ua/resources/photos/news/620_DIR/201902/1119734_6537792.png?201902183236 (дата звернення: 08.06.2023).
3. Frenzel L. Millimeter waves will expand the wireless future. *ElectronicDesign*. URL: <https://www.electronicdesign.com/technologies/communications/article/21796260/millimeter-waves-will-expand-the-wireless-future> (дата звернення: 08.06.2023).
4. [8x8 масивна MIMO антена]. *5G Technology and Engineering - 5G Technology World*. URL: https://www.5gtechnologyworld.com/wp-content/uploads/2022/08/8x8_massive_MIMO_antenna.jpg (дата звернення: 08.06.2023).
5. [Антенна з багатопучковим формуванням]. URL: <https://www.rantcell.com/images/beam-forming-5g.png> (дата звернення: 15.06.2023).
6. *VentureBeat | Transformative tech coverage that matters*. URL: <https://venturebeat.com/wp-content/uploads/2018/10/QTM052-latest-in-hand.jpg?fit=3327,2218&strip=all> (дата звернення: 15.06.2023).
7. [Антенна для внутрішнього покриття]. *Креативність ЮА - Блог про техніку, технології та готові інструкції до ПК*. URL: <https://creativnost.com.ua/wp->

- content/uploads/pp_image_166739_kmr3f9shxtpost_5be48072b40e8.jpg (дата звернення: 15.06.2023).
8. [Вбудована антена для мобільного пристрою]. URL: https://images.prom.ua/4337218374_w600_h600_4337218374.jpg (дата звернення: 15.06.2023).
 9. Essay on 5G technology. *Fresh Essays Samples* |. URL: <https://samples.freshessays.com/essay-on-5g-technology.html> (дата звернення: 15.06.2023).
 10. Radiation: 5G mobile networks and health. *World Health Organization (WHO)*. URL: <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-5g-mobile-networks-and-health> (дата звернення: 15.06.2023).
 11. C.A. Balanis. Antenna theory analysis and design. 3rd edition. USA: John Willey and Sons (2005). p. 811. <https://books.google.co.id/books?id=iFEBcGAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Ante#v=onepage&q&f=false>
 12. Garg R. Microstrip antenna design handbook. – (Artech House antennas and propagation library). 2001 ARTECH HOUSE, INC.
 13. Антенны и устройства СВЧ (проектирование фазированных антенных решеток) под ред. Д. И. Воскресенского, Радио и связь 1994 г.
 14. [Прямокутна мікросмужкова антена]. *Welcome to Bentham Science Publisher*. URL: <https://www.eurekaselect.com/images/graphical-abstract/eeeng/12/4/009.jpg> (дата звернення: 14.06.2023).
 15. Siddiqui, M.G.; Saroj, A.K.; Devesh; Ansari, J.A. Multi-band fractaled triangular microstrip antenna for wireless applications. *Prog. Electromagn. Res. M* 2018, 65, 51–60.
 16. [Загальні характеристики діапазону роботи 5G]. URL: https://exfoprodstorage.blob.core.windows.net/media/13196/fig-2_5g-radio-frequency-spectrum-

- diagram.jpg?width=1000&height=753.5714285714286 (дата звернення: 14.06.2023).
17. Remmert H. What is c-band and why is it important for 5G?. *IIoT Devices and Services for M2M Networking | Digi International*. URL: <https://www.digi.com/blog/post/what-is-c-band-and-why-is-it-important-for-5g> (дата звернення: 13.06.2023).
 18. Pandey A. Practical microstrip and printed antenna design. Artech House, 2019. 25 – 34 с.
 19. Microstrip antenna design handbook / ред. G. Ramesh. Boston, MA : Artech House, 2001. 1 – 68 с.
 20. Metamaterial-Inspired electrically compact triangular antennas loaded with CSRR and 3×3 cross-slots for 5G indoor distributed antenna systems / A. K. Vallappil та ін. *MDPI*. URL: <https://doi.org/10.3390/mi13020198> (дата звернення: 01.06.2023).
 21. [Прямокутна мікросмужкова антена антена]. *Welcome to Bentham Science Publisher*. URL: <https://www.eurekaselect.com/images/graphical-abstract/eeeng/12/4/009.jpg> (дата звернення: 13.06.2023).
 22. Pandey A. Practical microstrip and printed antenna design. Artech House, 2019. 25 с.
 23. [Інвертована f-антена]. *Wikimedia Commons*. URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/thumb/7/7e/PIFA_antennae.png/440px-PIFA_antennae.png (дата звернення: 14.06.2023).
 24. [Дипольна антена]. *em: talk - Electromagnetics and Microwave Engineering*. URL: <https://www.emtalk.com/images/Designer/Tutorial2/dipole.jpg> (дата звернення: 14.06.2023).
 25. [Монопольна антена]. *aaronscher.com*. URL: https://aaronscher.com/Course_materials/Operation_Learn_Microwave_Office/AXIEM_monopole_antenna/documents/monopole_3D.jpg (дата звернення: 14.06.2023).

26. [Коаксіальна структура живлення антени].
URL: <https://d3i71xaburhd42.cloudfront.net/5296a75e1ee67d6d2fecc4d452c03b0c12223d19/1-Table1-1.png> (дата звернення: 14.06.2023).
27. [Мікросмужкова структура живлення антени]. *www.researchgate.net*.
URL: <https://www.researchgate.net/profile/Mohammad-Sharawi/publication/3227889/figure/fig2/AS:340396145168384@1458168173081/Patch-antenna-most-used-feeding-techniques-a-Probe-feed-through-ground-plane-b.png> (дата звернення: 14.06.2023).
28. [Апертурна подача живлення антени]. *www.researchgate.net*.
URL: <https://www.researchgate.net/publication/335960799/figure/fig3/AS:805456838656000@1569047283507/Aperture-Coupled-feed-technique.ppt> (дата звернення: 14.06.2023).
29. [Безконтактна структура живлення антени]. *www.researchgate.net*.
URL: <https://www.researchgate.net/publication/290603753/figure/fig3/AS:393493286539266@1470827518129/Proximity-coupled-Feed.png> (дата звернення: 14.06.2023).

ДОДАТОК А

Перелік документів кваліфікаційної роботи на оптичному носії

1. Пояснювальна записка Купріянов К.В.doc
2. Презентація до кваліфікаційною роботи.pptx

ДОДАТОК В. ВІДГУК КЕРІВНИКА КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ВІДГУК

на кваліфікаційну роботу ступеня бакалавр здобувача групи 172-19-1

Купріянова К.В. на тему:

«Імітаційне моделювання випромінюючого пристрою для технології 5G»

Мета кваліфікаційної роботи – імітаційне моделювання випромінюючого пристрою для технології 5G.

Обрана тема є актуальною у зв'язку з тим, що на сьогоднішній день почала широко впроваджуватись технологія покоління 5G і існує потреба в розробці ефективних випромінювачів. Це пов'язане з освоєнням нових частотних діапазонів, які призначені задовольнити потребу у бездротовому зв'язку зокрема в покоління 5G.

Наукова новизна результатів які отримані у кваліфікаційній роботі полягає в дослідженні оптимальної характеристик випромінювання антени технології покоління 5G.

Практичне значення результатів роботи полягає у покращенні характеристик випромінювання антени, яка працює у складі бездротової системи зв'язку.

Оформлення кваліфікаційної роботи виконано на відповідному рівні і відповідає вимогам, що пред'являються до робіт даної кваліфікації. В цілому кваліфікаційна робота ступеня бакалавр повністю задовольняє вимогам, що пред'являються і заслуговує оцінки «відмінно», а її автор, Купріянов Кирило Вікторович, присвоєння кваліфікації технічного фахівця в галузі електроніки та телекомунікацій.

Керівник кваліфікаційної роботи, доц.

Магро В.І.

РЕЦЕНЗІЯ

**на кваліфікаційну роботу студента групи 172-19-1 Купріянова К.В.
на тему: «Імітаційне моделювання випромінюючого пристрою для
технології 5G»
за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка**

Пояснювальна записка складається зі вступу, трьох розділів і висновків, розташованих на 59 сторінках, та містить 40 рисунків і 20 джерел.

Актуальність імітаційного моделювання випромінюючого пристрою для технології 5G, є безперечною.

В роботі, проведено аналіз основних тенденцій розвитку випромінюючих пристроїв бездротового зв'язку. Виконано огляд типів антен, які підходять для бездротових ліній зв'язку. Розглянуті основні характеристики випромінюючих пристроїв; поставлено задачі, вирішенню яких присвячений розділ 2.

Запропонована удосконалена конструкція випромінюючого пристрою бездротових ліній зв'язку. Досліджені характеристики випромінювання запропонованої конструкції антени, яка забезпечує необхідну форму діаграми напрямленості.

Наукова новизна результатів полягає у розробленні якісної антенної структури, яка задовольняє роботі кінцевих пристроїв у середньому діапазоні 5G і відповідно забезпечує низькі затримки, високу передачу даних та широку смугу пропускання в бездротовій лінії.

Практична цінність роботи полягає у тому, що запропонована конструкція може бути використана у проектуванні бездротових ліній зв'язку.

В цілому кваліфікаційна робота задовольняє усім вимогам, а її автор Купріянов Кирило Вікторович заслуговує на оцінку « » та присвоєння кваліфікації технічного фахівця в галузі електроніки та телекомунікацій.

Рецензент