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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Бакалавр
Освітній рівень

Однополярна антена для бездротових технологій
Назва теми

КвРТР.2021009.01.09 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 _____ Віктор ЯРОВЕНКО
Підпис Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник: _____ Віталій НОРИК
Підпис, дата Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер: _____ Людмила КОРЕЦЬКА
Підпис, дата Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

Зав. кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки: _____ Валерій МАРТИНЮК
Підпис Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

« 19 » червня 2024р.

Хмельницький, 2024

Хмельницький національний університет

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 кафедрою АКІТтаР
Валерій МАРТИНЮК
« 10 » січня 2024 р

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

ЯРОВЕНКУ Віктору Олександровичу
Прізвище, ім'я по батькові здобувача

1 Тема роботи: Однополярна антена для бездротових технологій
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 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз компактних антен для бездротових технологій; проектування та аналіз монопольних антен; статистичний аналіз монопольних антен; моделювання та оптимізація монопольної антени.
5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень): 1. Конструкція трапецієподібної монопольна антена з вирізним діапазоном. 2. Структурний огляд монопольної антени з вирізом. 3. Характеристики радіоактивності запропонованої моделі в трьох різних робочих групах

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) Віктор ЯРОВЕНКО

Науковий керівник _____ (підпис, дата) Віталій НОРИК

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Однополярна антена для бездротових технологій»

Автор роботи: Яровенко Віктор Олександрович.

Керівник роботи: Норик Віталій Григорович, асистент.

Пояснювальна записка: 68 сторінок, 27 рисунків, 1 таблиці, 40 джерел.

Графічна частина: технічне креслення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТРАПЕЦІЄПОДІБНА АНТЕНА, МОНОПОЛЬНА АНТЕНА, БЕЗДРОТОВІ КОМУНІКАЦІЇ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, 5G, ШИРОКОСМУГОВА ФУНКЦІОНАЛЬНІСТЬ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, СЕЛЕКТИВНІ ПЕРЕХОДИ ІМПЕДАНСУ, СТАБІЛЬНІСТЬ.

Об'єктом дослідження є трапецієподібна дводіапазонна монопольна антена, яка призначена для оптимізації багатодіапазонних бездротових систем зв'язку.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження, оптимізація та опис трапецієподібної дводіапазонної монопольної антени з метою покращення функціональності багатодіапазонних бездротових систем зв'язку, зокрема для ефективного використання діапазонів частот GSM, LTE, Wi-Fi та 5G.

У даній кваліфікаційній роботі аналізується трапецієподібна дводіапазонна монопольна антена. Основний діапазон антени працює на частотах від 2,5 до 4,4 ГГц та від 5,7 до 7 ГГц. Досліджуються багатодіапазонні трапецієподібні антени, які покращують функціональність бездротових систем. Такі антени ефективні та надійні, мають широкосмугову функціональність та компактні розміри. Оптимізація через чисельні розрахунки дозволяє покращити їх продуктивність. Трапецієподібні антени дозволяють уникнути використання додаткових антен та перемикачів. Це особливо важливо для сучасних систем бездротового зв'язку. У результаті дослідження досягнуто високої ефективності антени в різних діапазонах частот.

01.06.2024 р.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ..... С.
ВСТУП 4
1 АНАЛІЗ КОМПАКТНИХ АНТЕН ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ 5
1.1 Дослідження предметної області та постановка задачі 7
1.2 Огляд трапецієподібних дводіапазонних монопольних антен 7
1.3 Потреби в системах ISM, Wi-Fi та бездротової мережі 8
1.4 Висновок до першого розділу 15
2 ПРОЕКТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ МОНОПОЛЬНИХ АНТЕН 18
2.1 Аналіз всенаправлених антен 19
2.2 Всеспрямована монопольна антена 21
2.3 Тривимірні монопольні антени 27
2.4 Друковані планарні монопольні антени 30
2.5 Висновок до другого розділу 32
3 СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ МОНОПОЛЬНИХ АНТЕН 33
3.1 Аналіз пласкої монопольної антени 34
3.2 Прямокутна мікросмужкова антена 36
3.3 Характеристики широкосмугових планарних монопольних антен 38
3.4 Різноманітні форми монопольних антен 40
3.5 Аналітичний вивід характеристик монополя 40
3.6 Висновок до третього розділу 41
4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ МОНОПОЛЬНОЇ АНТЕНИ 46
4.1 Дослідження площин Е і Н 48
4.2 Компроміси та міркування щодо конструкції 49
4.3 Моделювання антени 50
4.4 Переваги використання структури з вирізом 52

4.5 Частотний діапазон антени 54
4.6 Результати та аналіз 55
4.6.1 Пікове значення підсилення на різних частотах 58
4.6.2 Ефективність антени 63
4.6.3 Використання трапецієподібної форми в конструкції монопольної антени 64
4.9 Висновок до четвертого розділу 65
ВИСНОВКИ 66
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 67
ДОДАТОК А. Конструкція трапецієподібної монопольна антена з вирізним діапазоном 70
ДОДАТОК Б. Структурний огляд монопольної антени з вирізом 71
ДОДАТОК В. Характеристики радіоактивності запропонованої моделі в трьох різних робочих групах 72

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

5G	–	п’яте покоління мобільного зв'язку
CPW	–	копланарний хвилевод
FEA	–	метод скінченних елементів
FSS	–	стандарти безпеки та якості харчових продуктів
GPS	–	система глобального позиціонування
GSM	–	система мобільного зв'язку
IoT	–	інтернет речей
ISM	–	промисловий, науковий і медичний діапазон
LTE	–	довгострокова еволюція (стандарт мобільного зв'язку)
MoM	–	метод моментів
UWB	–	ультраширокосмугова передача
Wi-Fi	–	бездротова мережа
WLAN	–	бездротова локальна мережа

ВСТУП

У сучасному світі бездротові комунікаційні системи стають все більш важливими для нашого повсякденного життя та розвитку технологій. З цієї причини постійне вдосконалення технологій антен є ключовим аспектом у забезпеченні ефективності та стабільності бездротових зв'язків. У цьому контексті трапецієподібні дводіапазонні монопольні антени здобувають все більшу популярність та застосування, завдяки їхній здатності оптимізувати функціональність бездротових систем для відповідності різним вимогам та діапазонам частот.

Однією з ключових проблем, яку потрібно вирішувати в цьому контексті, є забезпечення стабільності та ефективності бездротового зв'язку в умовах зростаючого обсягу даних та швидкого розвитку нових технологій зв'язку.

У кваліфікаційній роботі досліджено та описано властивості та переваги трапецієподібних дводіапазонних монопольних антен, зосереджуючись на їхній здатності працювати в двох різних діапазонах частот. Зокрема, розглянуто антени, що виключають діапазон частот від 4,4 до 5,7 ГГц, який часто використовується комерційним комунікаційним обладнанням. Основний діапазон роботи цих антен охоплює частоти від 2,5 до 4,4 ГГц та від 5,7 до 7 ГГц, причому кожен з цих діапазонів має відповідну пропускну смугу.

Об'єктом дослідження є трапецієподібна дводіапазонна монопольна антена, яка призначена для оптимізації багатодіапазонних бездротових систем зв'язку.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження, оптимізація та опис трапецієподібної дводіапазонної монопольної антени з метою покращення функціональності багатодіапазонних бездротових систем зв'язку, зокрема для ефективного використання діапазонів частот GSM, LTE, Wi-Fi та 5G.

Оптимізація багатодіапазонних трапецієподібних антен є ключовим аспектом даного дослідження. Вивчено їхні переваги порівняно з традиційними антенами, зокрема їхню здатність передавати багато частот та змінювати

імпеданс без додаткових налаштувань. Застосування чисельних розрахунків та електромагнітного моделювання дозволяє нам оптимізувати продуктивність трапецієподібних антен по всьому діапазону зв’язку, що робить їх ефективними та надійними рішеннями для бездротових систем.

Ще однією важливою перевагою трапецієподібних антен є їхня широкосмугова функціональність, яка дозволяє уникнути використання додаткових антен та перемикачів. Це робить їх більш доступними та простими у використанні, що особливо важливо у сучасних системах бездротового зв’язку.

У даному дослідженні також звертається увага на можливості модифікації геометрії трапецієподібних антен для створення селективних переходів імпедансу для цільових частот та перешкод. Це робить їх особливо ефективними у складних умовах перешкод, які часто виникають у сучасних системах бездротового зв’язку.

У процесі дослідження використані як теоретичні, так і експериментальні методи. Теоретичні методи включають математичне моделювання та чисельні розрахунки, які дозволили нам ретельно вивчити характеристики та параметри антени в різних умовах експлуатації. Цей підхід дозволяє забезпечити надійність та достовірність отриманих даних, а також дозволяє уточнити та оптимізувати конструкцію антени для досягнення оптимальних результатів.

Результати цієї кваліфікаційної роботи можуть стати основою для подальших досліджень у галузі розробки трапецієподібних антен та їх застосування в бездротових комунікаційних системах. Вони можуть бути використані для покращення функціональності та ефективності бездротових систем зв'язку, що включають у себе різноманітні застосування в сферах телекомунікацій, інтернету речей, медичного обладнання, автономних систем та інших областях. Результати цієї роботи також можуть бути корисними для інженерів та дослідників, які працюють у сфері розробки бездротових технологій, допомагаючи їм вдосконалити конструкцію та оптимізувати характеристики антен для вирішення конкретних завдань та вимог їх проектів.

1 АНАЛІЗ КОМПАКТНИХ АНТЕН ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

У сучасному світі, де бездротові технології виявляються все більш невід'ємною частиною нашого повсякденного життя, роль антен стає критичною для забезпечення безперервного та ефективного зв'язку. Антени - це ключові елементи бездротових систем, які перетворюють електричні сигнали на електромагнітні хвилі, що поширюються через простір, і навпаки. Вони дозволяють пристроям спілкуватися між собою, передавати дані та отримувати інформацію без необхідності фізичного з'єднання. З розвитком мобільних телефонів, планшетів, носимих пристроїв, інтернету речей (IoT) та інших бездротових пристроїв, попит на компактні, потужні та універсальні антени незмінно зростає.

У цьому контексті, монопольні антени виявляються одними з найбільш поширених та універсальних типів антен. Їхню простоту конструкції, високу ефективність та можливість компактного розміщення робить привабливими для використання в різноманітних бездротових системах. Монопольні антени застосовуються у широкому спектрі технологій, включаючи Wi-Fi, Bluetooth, GSM, GPS, LTE та інші стандарти зв'язку.

У даному аналізі поглиблено розглянено різні аспекти компактних антен для бездротових технологій. Проаналізовано конструкцію, характеристики та можливості застосування, враховуючи вимоги та потреби сучасного світу зв'язку. Крім того, вивчено напрямки подальшого розвитку цієї важливої галузі телекомунікацій, зокрема вдосконалення характеристик антен, розширення їхнього функціоналу та оптимізація для різних умов та середовищ.

1.1 Дослідження предметної області та постановка задачі

Предметна область дослідження включає в себе аналіз компактних антен для бездротових технологій, зокрема монопольних антен. Ця область важлива через широке використання бездротових систем у сучасному світі та постійний попит на більш компактні, потужні та універсальні антени.

Основні аспекти дослідження включають вивчення конструкції, характеристик, ефективності та можливостей застосування монопольних антен у різних бездротових технологіях, таких як Wi-Fi, Bluetooth, GSM, GPS, LTE тощо. Також важливо дослідити сучасні тенденції у вдосконаленні антенних систем, включаючи оптимізацію розмірів, підвищення ефективності та адаптацію до різних умов експлуатації.

Метою дослідження є розробка нових методів та технологій для покращення характеристик компактних антен для бездротових систем. Задачі дослідження включають аналіз існуючих рішень, розробку та моделювання нових конструкцій антен, експериментальне випробування їхньої ефективності та оптимізацію параметрів для досягнення максимальної продуктивності та надійності бездротового зв’язку.

1.2 Огляд трапецієподібних дводіапазонних монопольних антен

Попит на компактні та універсальні антени в телекомунікаційних системах незмінно високий, що підштовхує дослідників до пошуку передових рішень. Для комерційних застосувань зв'язку широкого призначення монопольні антени, які мають просту конструкцію, потрібні за доступною ціною. Дослідники розробляють кілька моделей антен для багатодіапазонних застосувань, які

обслуговують різні стандарти зв'язку, такі як GSM, GPS, UMTS, PCS, Bluetooth, Wi-Fi, LTE та бездротові локальні мережі.

Безперервний попит на антени для бездротових зв'язків та мікрохвильові пристрої визначає напрямок розвитку цієї сфери з удосконаленням їхніх характеристик, таких як висока пропускна здатність, підвищення посилення та ефективності при низьких втратах сигналу. Це важливо для забезпечення надійного та швидкого зв'язку в різних умовах та середовищах, що відповідають вимогам сучасного бездротового зв'язку.

Була розроблена компланарна хвилеводна трапецієподібна монопольна антена (рис. 1.1) для роботи у діапазоні частот від 3 до 4 ГГц [1]. Вона відрізняється від інших антен тим, що має вигравіруваний U-подібний паз, який формує антену з вирізом. Така конструкція дозволяє покращити ефективність антени та забезпечити необхідні характеристики для роботи у вказаному діапазоні частот.

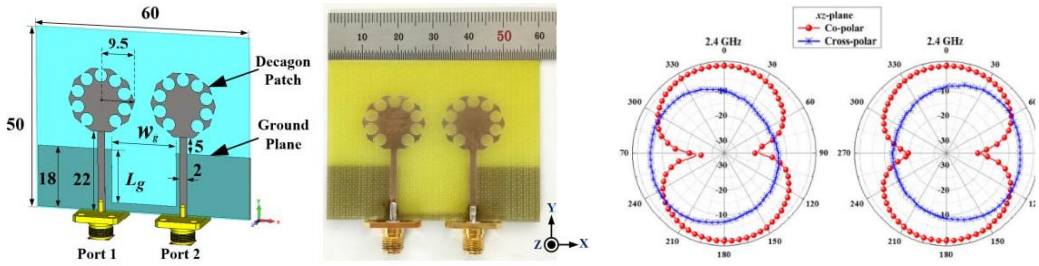


Рисунок 1.1 – Конфігурація антени MIMO: а) – Схематичний вигляд і б) – Результати вимірювання діаграми спрямованості

Зазначена антена має діелектричну проникність 2,2 та низький тангенс дельта, що свідчить про добре електричне збереження сигналу. Вона виготовлена на основі матеріалу підкладки RT-duroid-5880, що відомий своєю стабільністю та низькими втратами сигналу.

Габаритні розміри антени складають приблизно 51 × 45 × 1,6 мм, що робить її компактною та підходящою для використання у різних пристроях і системах зв'язку. Такий діапазон розмірів дозволяє легко впроваджувати цю антену у різноманітних технічних пристроях без обмежень.

Для досягнення багатодіапазонного функціонування пропонується мала щілинна друкована монопольна антена з метаматеріальним завантаженням [2]. Ця антенна конфігурація (рис. 1.2) відзначається своїми багатодіапазонними характеристиками та вперше була розроблена за ідеєю використання метаматеріалів, основаних на значеннях показника заломлення.

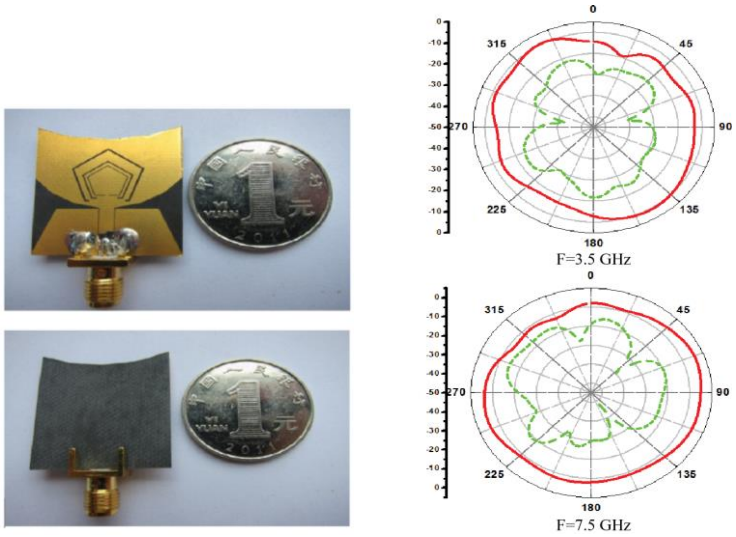


Рисунок 1.2 – Фотографія та виміряні діаграми спрямованості пропонованої антени

Антена має форму V-подібної конструкції, інтегруючи випромінюючу ділянку у верхній частині та заземлюючу структуру в нижній частині, що занурена у діелектричний матеріал. З використанням діелектричного матеріалу з показником проникності 6,15 (Rogers RT/duroid 6006) та низьким тангенсом втрат 0,0019, ця антена демонструє високу ефективність та стабільність у роботі.

Результати моделювання підтверджують успішність застосування антени у супутниковому військовому діапазоні зв'язку (від 7,25 до 8,4 ГГц) та системах

зв'язку на великі відстані (від 4 до 8 ГГц). Це дозволяє використовувати запропоновану антену в різноманітних телекомунікаційних системах з великою ефективністю та надійністю.

Розроблено компактну широкосмугову копланарну збуджену дипольну антену спеціально для бездротових комерційних систем зв’язку [3]. Антена має надзвичайно компактну конструкцію і розміщена на підкладці товщиною 1,6 мм від RT-Duroid. Завдяки монопольним структурам, що вона використовує, вона забезпечує ефективність випромінювання та високий коефіцієнт підсилення антени в усіх робочих діапазонах. Це робить її ідеальним варіантом для інтеграції в портативну електроніку для бездротового зв’язку.

У роботі [4] розроблена портативна двосмугова антена, що має можливість реконфігурації частоти для застосувань у бездротових локальних мережах (WLAN) згідно зі стандартом IEEE 802.11n. Ця антена використовує слоти, що включені в патч-випромінювання, для досягнення резонансних режимів, та PIN-діоди для перемикання, які дозволяють налаштовувати частотний діапазон. Використання перемикаючих діодів між проміжками щілин дозволяє змінювати резонансні частоти. Ці можливості дозволяють вирізати задані діапазони частот і вибирати оптимальні робочі частоти. Основними характеристиками цієї антени є низька перехресна поляризація, стабільна діаграма спрямованості та середнє значення посилення на рівні 2,8 дБ.

У дослідженні [5] пропонується гнучка кругла монопольна конформна антена з резонатором на основі розщеплення для отримання частотних характеристик смуги ріжків у широкій смузі. Ці характеристики досягаються за допомогою розщеплювальних резонаторів, розташованих з одного боку підкладки, і додаткових резонаторів на дефектній площині заземлення з іншого боку підкладки [6].

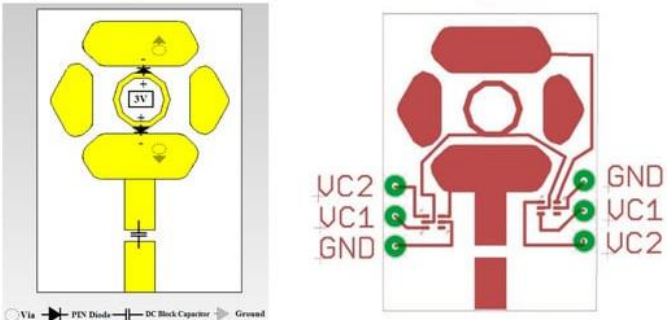


Рисунок 1.3 – Конструкція пропонованої антени

У роботі [7] запропоновано портативну частотно-реконфігуровану антену для систем бездротового зв'язку ISM. Модель антени розміром 58 × 48 мм виготовлена на основі епоксидної смоли FR4 з діелектричною проникністю 4,4 і товщиною 0,8 мм. Антена містить заземлену поверхню з дефектною Т-подібною формою, яка виконує функцію відбивача. Діоди BAR 64-02V PIN використовуються як комутаційні компоненти для реконфігурації антени на основі частоти, і антена завантажується через мікросмужкову провідну лінію передачі [8].

У роботі [9] була розроблена та проаналізована монопольна кругова антена з регульованою частотою, яка має властивості діапазону різьблення (рис. 1.4). Ця антена була створена з метою досягнення відповідного відхилення стрічки шляхом точно налаштованих та оптимізованих діаметрів щілин.

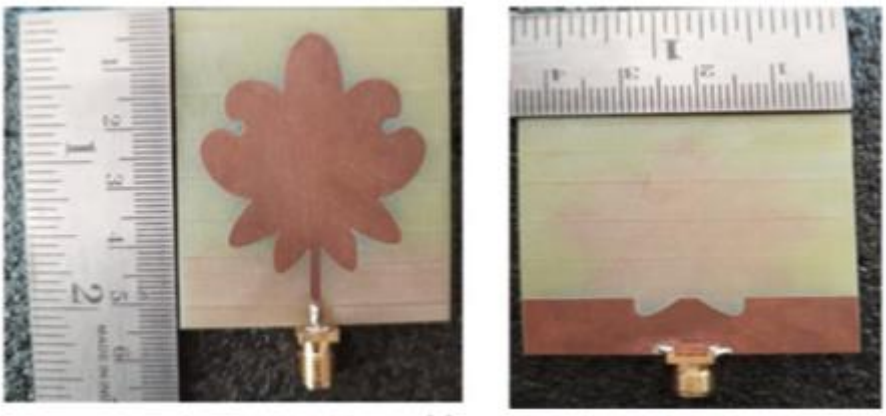


Рисунок 1.4 – Антена з квіткою орхідеї

Для досягнення еволюції в смугах вирізів, у роботі [10] використано два PIN-діоди, які з'єднані між заглушками та лінією живлення. Ця конфігурація дозволяє керувати довжиною випромінювальної структури та впливати на реконфігуровану поведінку антени. Початково передбачено, що антена працюватиме у діапазонах 3,1–3,7 ГГц та 5,1–5,8 ГГц, що відповідає стандартам WiMAX та робочим діапазонам WLAN для мікрохвильового доступу [11]. Унікальна антена фрактальної форми була розроблена на прозорому матеріалі [12], що робить її ідеальним варіантом для використання на транспортних засобах зв'язку, так як вона може бути легко адаптована та встановлена на поверхні автомобіля.

В роботі [13] описано властивості друкованої монопольної антени з двома вирізами, які живляться CPW. Ця антена має можливість генерувати смугу з подвійним вирізом завдяки включенню другої H-подібної щілинної структури у випромінювальний елемент. Вона демонструє ефективну роботу на частотах 3,5 ГГц для WiMAX і 8,3 ГГц для військового/радіолокаційного зв’язку. Унікальна структура цієї антени, що об'єднує прямокутний монополь та паразитні елементи, дозволяє створити компактну антену з трьома вирізами діапазону.

Лінія живлення цієї антени ідеально узгоджується з кутовою прямокутною випромінювальною структурою крученого типу та дефектною поверхнею землі. Зазначена антена має потрійну широкосмугову характеристику з робочими діапазонами в межах WLAN (4–6 ГГц), супутникового зв’язку (7,6–9,8 ГГц) і (10,5–11,5 ГГц).

У роботі [14] була розроблена надширокосмугова антена з тридіапазонною реакцією, використовуючи CSRR – комплементарний сплітрезонатор та накладку з перевернутою T-подібною структурою. Ця антена випромінює як постійну дипольну структуру, так і всенаправлену картину в UWB-діапазоні.

Застосування DGP – дефектної площини заземлення, перевернутої Т-подібної структури та CSRR створює смуги з потрійним вирізом із характерними частотами, що відповідають програмам RFID (4,4 ГГц), RFID (6,8 ГГц) та РЛС (9,2 ГГц). Високоефективна багатосмугова резонансна деревоподібна фрактальна антена, яка описана в [15], працює у чотирьох різних діапазонах з смугою опору 10 дБ, включаючи діапазони від 2,2 ГГц до 2,8 ГГц, від 3,3 ГГц до 4,37 ГГц, від 4,75 ГГц до 7,3 ГГц та від 9,7 ГГц до 11,9 ГГц.

Також було запропоновано чотири дводіапазонні антени, які базуються на використанні перемикача PIN-діодів з можливістю регулювання частоти, спрямовані на застосування у мережах LTE 2500 та WiMAX (рис. 1.5). Результатом цього дослідження є розробка антен, які працюють у відповідних діапазонах частот для LTE і WiMAX (від 2,5 до 2,69 ГГц та від 3,4 до 3,6 ГГц). Основна перевага цих антен полягає у їх здатності випромінювати як односпрямоване, так і двонаправлене випромінювання у більш високих діапазонах частот, що робить їх ефективними у різних умовах зв'язку.

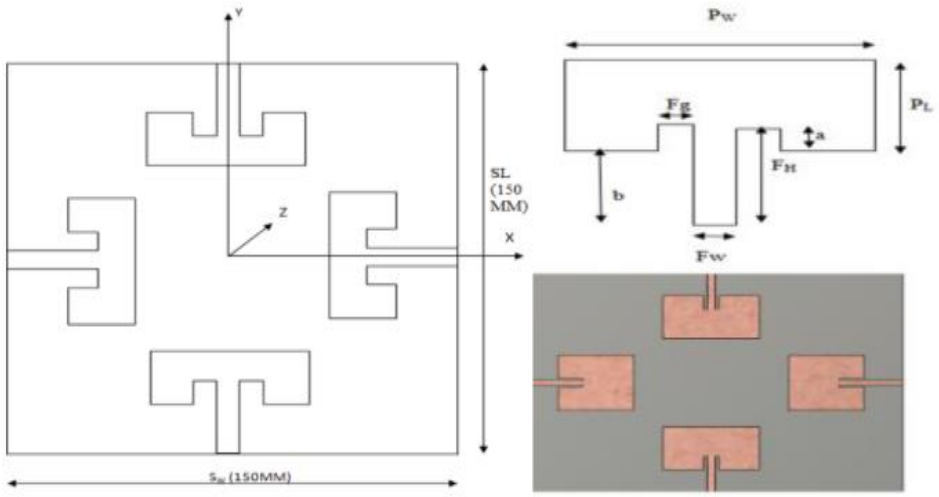


Рисунок 1.5 – Дводіапазонна антена

Несиметрична електромагнітна антена зі структурованою смугою розриву (EBG – електронна банківська гарантія) для застосування у бездротових мережах

зв'язку. Використання структури EBG у складі антени призвело до значного підвищення коефіцієнта підсилення з 2,8 дБ до 13,9 дБ. Крім того, був проведений параметричний аналіз з метою оптимізації робочих характеристик антени, що призвело до досягнення ефективності на рівні понад 82,5%. Ці покращення роблять цю антену більш ефективною та дозволяють їй працювати з більшими швидкостями передачі даних і покращеною якістю сигналу у бездротових мережах.

1.3 Потреби в системах ISM, Wi-Fi та бездротової мережі

Системи, які працюють у діапазоні ISM, Wi-Fi та бездротових мережах, включають широкий спектр пристроїв і систем, які використовуються у різних галузях, від домашнього використання до промислових застосувань. Ось деякі з найпоширеніших потреб:

Домашні мережі Wi-Fi: У сучасних домогосподарствах бездротова мережа Wi-Fi є невід'ємною частиною для підключення комп'ютерів, смартфонів, планшетів, смарт-телевізорів, розумних побутових приладів та інших пристроїв до Інтернету та між собою.

Бізнес-мережі Wi-Fi: У бізнес-середовищі бездротова мережа використовується для забезпечення зв'язку між комп'ютерами, принтерами, точками продажу, медіаплеєрами та іншими пристроями. Вона дозволяє підприємствам забезпечити безперервний доступ до даних та послуг для співробітників та клієнтів.

Мобільні пристрої та смартфони: Пристрої, які підтримують Wi-Fi, використовуються для доступу до Інтернету, відправлення електронної пошти, перегляду мультимедійного вмісту та виконання інших завдань під час пересування.

Промислові мережі: У виробничих та промислових середовищах бездротові мережі можуть використовуватися для збору даних, моніторингу та управління обладнанням, надання бездротового доступу до даних на підприємстві та забезпечення комунікацій між пристроями.

Медичні пристрої та технології: Бездротові технології використовуються у медичних пристроях для моніторингу стану пацієнтів, збору та передачі медичних даних, віддаленого консультування лікарів та багатьох інших медичних застосувань.

Інтернет речей (IoT): Застосування IoT включають в себе використання бездротових зв'язків для збору даних з датчиків, керування побутовими та промисловими пристроями, автоматизації процесів та багато іншого.

Додатки, які працюють у діапазоні ISM, Wi-Fi та бездротових мережах, використовують різноманітні значення смуги пропускання, такі як 0,5 ГГц (500 МГц) та 1 ГГц (1000 МГц), відповідно. Ці значення відповідають конкретним потребам і обмеженням цих систем.

Наприклад, у діапазоні ISM 2,4 ГГц програми вимагають смугу пропускання 0,5 ГГц. Цей діапазон використовується для несанкціонованого промислового, наукового та медичного використання, і має міжнародне визначення. Крім того, існують інші діапазони, такі як 902–928 МГц і 2,4–2,4835 ГГц, які також використовуються. Для програм, які використовують Bluetooth і Zigbee, важливим є доступ до спектру 2,4 ГГц.

Для наукових досліджень і промислової автоматизації, де потрібен більший спектр, використовується смуга пропускання 1 ГГц. Високочастотні програми можуть також використовувати канали ISM у діапазоні 5,8 ГГц, де смуга пропускання становить 1,7 ГГц.

Смуги пропускання Wi-Fi, які складають 0,5 ГГц та 1 ГГц, мають значуще значення для бездротових мереж. Wi-Fi працює на двох основних діапазонах

частот: 2,4 ГГц і 5 ГГц. Для 802.11b/g/n Wi-Fi, який використовує 2,4 ГГц діапазон, смуга пропускання становить 0,5 ГГц. Це дозволяє мережам Wi-Fi працювати в приміщеннях і проникати через стіни, забезпечуючи зв'язок з пристроями в межах будівлі. З іншого боку, для 802.11a/n/ac Wi-Fi, який використовує 5 ГГц діапазон, смуга пропускання становить 1 ГГц. Мережі Wi-Fi, що працюють на цьому діапазоні, мають значно більше каналів доступу, менше перешкод та вищу швидкість передачі даних. Це дозволяє їм забезпечувати високу продуктивність і забезпечувати швидкий та надійний доступ до Інтернету для користувачів.

Смуги пропускання 0,5 ГГц і 1 ГГц є ключовими для бездротових локальних мереж, таких як мережі Wi-Fi, оскільки вони дозволяють використовувати різні частоти для різних сценаріїв використання. Смуга пропускання 0,5 ГГц створює можливість для покриття в межах приміщень і додатків, що потребують менше пропускної здатності. Вона ідеально підходить для застосувань вдома, в офісі або в невеликих магазинах, де потрібне надійне підключення до Інтернету для робочих завдань або загального використання. У той час як смуга частот 5 ГГц із пропускною здатністю 1 ГГц надає більше каналів і менше перешкод в живих місцях, таких як офіси, торгові центри або громадські майданчики. Це робить її ідеальним вибором для мереж з високою щільністю пристроїв, де важлива стабільність зв'язку і висока швидкість передачі даних.

Ці різноманітні діапазони та значення смуги пропускання відповідають різним потребам та обмеженням у бездротових додатках, забезпечуючи ефективну та надійну роботу мереж.

1.4 Висновок до першого розділу

У даному розділі проведено аналіз предметної області, в якому було визначено актуальність та значимість розробки компактних антен для бездротових систем зв'язку. Поставлено завдання щодо аналізу трапецієподібних дводіапазонних монопольних антен та вивчення їхніх характеристик. Проведений огляд трапецієподібних дводіапазонних монопольних антен, що включав аналіз їхньої конструкції, принципу роботи та застосування. Також розглянуті потреби в системах ISM, Wi-Fi та бездротових мережах, які демонструють важливість розробки компактних антен для підтримки різноманітних комунікаційних стандартів. На підставі проведеного аналізу можна зробити висновок, що розвиток та вдосконалення компактних антен для бездротових технологій є актуальним та перспективним напрямом досліджень.

2 ПРОЕКТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ МОНОПОЛЬНИХ АНТЕН

Антени є ключовими складовими всіх бездротових систем. Вони складаються з металевих провідників, які використовуються разом з бездротовими передавачами або приймачами. Коливальний струм, що протікає через антену передавача, створює коливальне магнітне поле навколо її елементів, а заряд електронів також генерує коливальне електричне поле вздовж цих елементів. Ці змінні в часі поля випромінюються від антени у простір у формі рухомої поперечної хвилі електромагнітного поля. Під час прийому коливальні електричні та магнітні поля вхідної електромагнітної хвилі впливають на електрони у елементах антени, змушуючи їх рухатися вперед і назад, тим самим створюючи коливальні струми в антені.

Величезна кількість антен була розроблена та застосована в різних системах з 1888 року, коли Генріх Герц провів свої піонерські експерименти, щоб довести існування електромагнітних хвиль [16]. Загалом, антени можна класифікувати на основі:

- частота: дуже низькочастотна антена, низькочастотна антена, високочастотна антена, дуже високочастотна антена, надвисокочастотна антена, мікрохвильова антена, міліметр/ субміліметрова (ммВт) антена, терагерцова антена та оптична антена;
- апертура: дротова антена, рефлекторна антена, мікросмугова патч-антена, щілинна антена тощо;
- поляризація: лінійно (вертикально/горизонтально) поляризована антена, подвійна лінійно поляризована антена та антена з круговою поляризацією;
- випромінювання: ізотропна антена, всенаправлена антена та спрямована антена.

Як показано на рисунок 2.1, всеспрямована антена здатна рівномірно випромінювати радіохвилі в усіх напрямках і забезпечує охоплення 360° у певній

площині (зазвичай в азимутальній площині), що робить її дуже зручною для спілкування кількох користувачів. Всеспрямовані антени широко використовуються для радіомовлення, супутникової системи, системи глобального позиціонування (GPS), точки доступу до бездротової локальної мережі (WALN) і мобільних пристроїв, таких як мобільний телефон, бездротовий телефон, FM-радіо, ноутбук тощо.

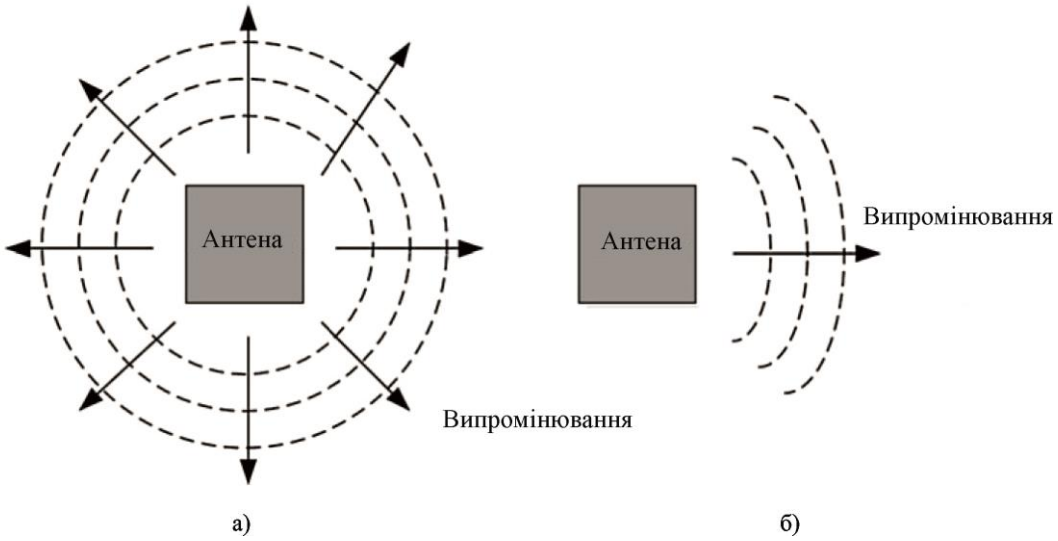


Рисунок 2.1 – Всеспрямована антена проти спрямованої антени:
а) – випромінювання від всенаправленої антени та б) – випромінювання від спрямованої антени

Перша всеспрямована антена з’явилася в дуже ранні часи, проста дипольна або монопольна антена генерує вертикально поляризоване всеспрямоване випромінювання в певній площині [17]. Як правило, всеспрямоване випромінювання досягається або круговим симетричним розподілом струму на випромінювальному елементі, такому як монопольні антени та дипольні антени, або шляхом поєднання випромінювання циліндрично розташованих кількох спрямованих випромінювальних елементів, таких як мікросмужкові плями та щілинні антени.

2.1 Аналіз всенаправлених антен

Базуючись на стандартних визначеннях термінів IEEE для антен (стандарт IEEE 145–1983), відповідні визначення випромінювання антени такі [18]:

- ізотропна антена: гіпотетична антена без втрат, що має однакову інтенсивність випромінювання в усіх напрямках;
- всеспрямована антена: антена, яка має, по суті, ненаправлену діаграму спрямованості в даній площині антени та діаграму спрямованості в будь-якій ортогональній площині;
- спрямована антена: антена, яка має властивість випромінювати або приймати електромагнітні хвилі ефективніше в одних напрямках, ніж в інших.

Ізотропна антена випромінює свою енергію однаково в усіх напрямках із сферичною діаграмою спрямованості, тобто має всенаправлену діаграму спрямованості в будь-якій площині. Однак ізотропна антена фізично ніколи не виходить; вона використовується як еталонна антена для порівняння характеристик фактичних антен. Всеспрямована антена випромінює потужність радіохвиль рівномірно в усіх напрямках в одній площині, при цьому випромінювана потужність зменшується залежно від кута підйому над або під площиною, падає до нуля на осі антени та створює діаграму спрямованості у формі пончика, як показано на рисунку 2.2.

Спрямованість ізотропної антени дорівнює одиниці, оскільки її потужність випромінюється однаково в усіх напрямках. Для всіх інших антен максимальна спрямованість завжди буде більшою за одиницю, і це відносний «коефіцієнт якості», який дає вказівку на спрямовані властивості антени порівняно з властивостями ізотропної антени. Відомо, що спрямованість спрямованої антени можна точно оцінити, використовуючи половинну ширину променя (ПШП) антени в двох основних площинах. Однак така формула не справедлива для

всенаправленої антени, оскільки визначення ширини променя половинної потужності не застосовне в площині з всенаправленим випромінюванням.

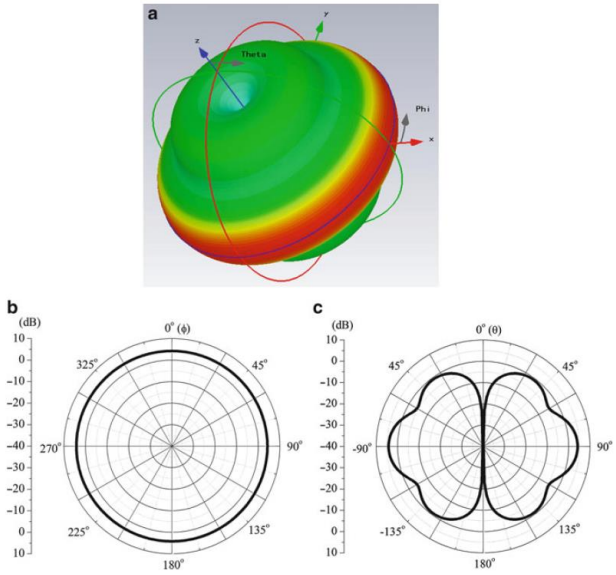


Рисунок 2.2 – Типові діаграми спрямованості всеспрямованої антени, а) – тривимірна діаграма, б) – всенаправлена діаграма в азимутальній площині (площина x-y) і в) – діаграма спрямованості в площині місця (площина x-z)

Діаграма спрямованості всенаправленої антени в площині місця може бути наближено виражена:

$$U = |\sin^n(\theta)|, \quad 0 \le \theta \le \pi, \quad 0\phi \le 2\pi . \tag{2.1}$$

де n – може бути цілим або нецілим значенням.

Спрямованість антени з діаграмою спрямованості, представленою виразом (2.1) можна визначити в замкнутому вигляді за допомогою значення з відомим n. Однак наближена формула для розрахунку спрямованості з використанням половинної ширини променя буде більш зручною для практичного проектування.

Макдональд (1978) вивів формулу спрямованості антени на основі коефіцієнта решітки колінеарної антенної решітки; її надає Позар (1993), який вивів формулу спрямованості антени на основі точних значень, отриманих за допомогою рівняння 2.1, а потім представив дані в замкнутій формі за допомогою підгонки кривої, і це виражено як [17]

$$D_0 \cong \frac{101}{ПШП(градуси) - 0{,}0027[ПШП(градуси)]^2}. \qquad (2.2)$$

Загалом, вираз (2.3) має бути точнішим для всеспрямованих візерунків із незначними бічними пелюстками дуже низької інтенсивності (в ідеалі без другорядних пелюсток), тоді як вираз (2.2) має бути більш точним для всенаправлених візерунків без незначних бічних пелюсток, як показано на рисунку 2.3а, б відповідно.

$$D_0 \cong -172{,}4 + 191\sqrt{0{,}818 + 1/ ПШП(градуси)}. \qquad (2.3)$$

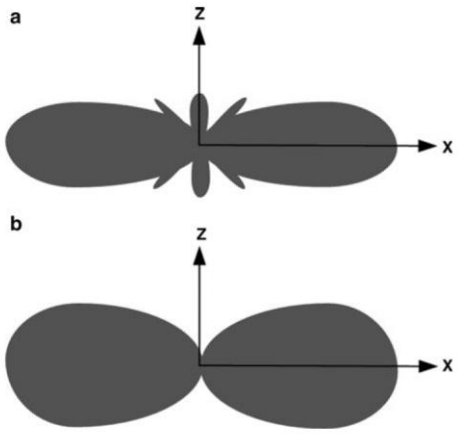


Рисунок 2.3 – Всеспрямовані візерунки малих часток; а) – з малими частками і б) – без малих часток

Всеспрямована діаграма спрямованості кола ніколи не може бути досягнута для практичних конструкцій антен. Як показано на рисунку 2.4,

всеспрямована діаграма спрямованості практичної антени зазвичай демонструє асиметрію або хвилі, які викликані асиметричною структурою випромінювання, допуском на виготовлення, небажаним монтажем антени, похибкою вимірювання тощо.

Всеспрямованість, або округлість, інженерний термін, не визначений стандартними визначеннями термінів IEEE для антен, але широко використовується в практичних застосуваннях. Це параметр, який характеризує рівномірність всенаправленого випромінювання в кожному напрямку та кількісно визначається відношенням максимального до мінімального підсилення антени. Ідеальна діаграма спрямованості всенаправленої антени має бути колом із постійною амплітудою в будь-якому напрямку, щоб ненаправленість або округлість дорівнювали нулю дБ, оскільки посилення антени залишається незмінним уздовж кутів. Інженерні вимоги до всеспрямованості для всеспрямованої антени зазвичай становлять від 6 дБ (або ±3 дБ) до 2 дБ (або ±1,0 дБ) або навіть 1 дБ (або ±0,5 дБ) для конкретних застосувань. На рисунку 2.4 наведено всенаправлену схему, де демонструється ненаправленість 5 дБ.

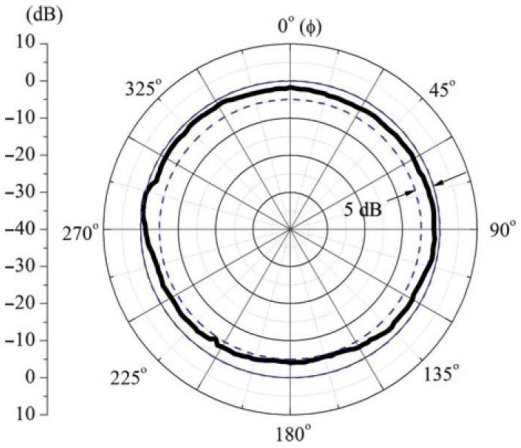


Рисунок 2.4 – Визначення всеспрямованості

На рисунку 2.5 наведені типові конфігурації всеспрямованої антени [18]. Найпростішим способом реалізації всеспрямованого випромінювання є використання випромінювача з циркулярно-симетричним розподілом струму. Прямий диполь з таким розподілом струму здатний генерувати всенаправлене випромінювання в площині, перпендикулярній до випромінювача. Електрично маленька рамкова антена демонструє аналогічні характеристики, коли струм тече вздовж кругової петлі та створює всенаправлене випромінювання в площині відповідно до петлі.

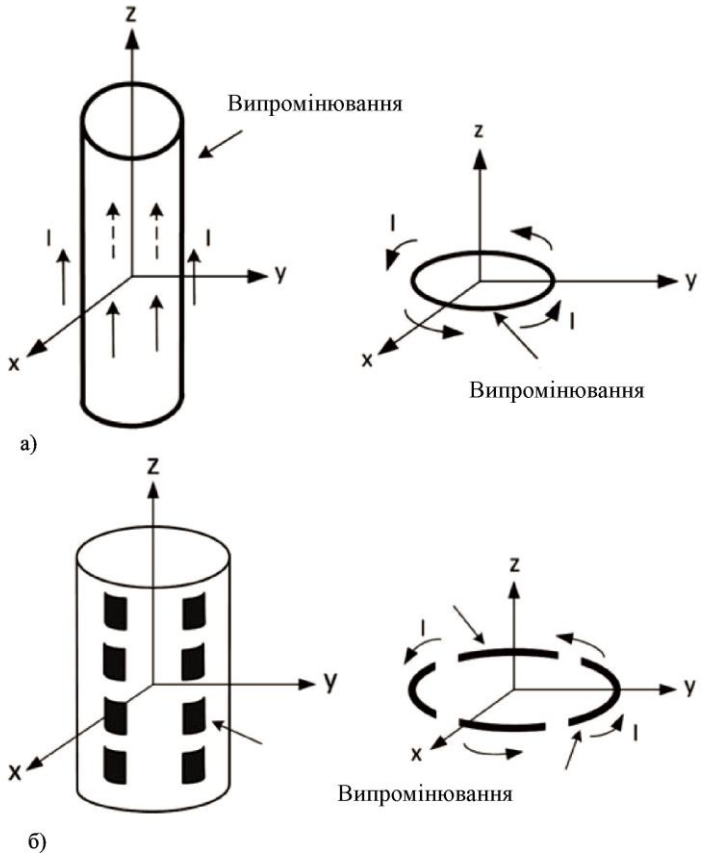


Рисунок 2.5 – Конфігурації всеспрямованої антени;

а) – один випромінювач з круговим симетричним розподілом струму та

б) – кілька випромінювачів для всенаправленого випромінювання

Альтернативно, можна досягти всенаправленого випромінювання за допомогою декількох спрямованих випромінювачів. Зазвичай ці спрямовані

елементи розташовані на поверхні циліндричної структури або вздовж кола у планарному вигляді, щоб створити комбіновану всенаправлену картину. Для конфігурацій з декількома антенними елементами важливо правильно розміщувати елементи для досягнення потрібної всенаправленої діаграми напрямленості. Загалом, антени з одним кругово-симетричним випромінювальним елементом мають кращу всенаправленість, ніж антени з декількома випромінювальними елементами.

Як і будь-які інші антени, бажана всеспрямована антена повинна мати певні характеристики випромінювання з обмеженнями розміру та вартості. Серед факторів наступні питання мають бути більш важливими для конструкції всеспрямованої антени.

Поляризація є важливим фактором у проектуванні всенаправленої антени, яка є ключовою для конфігурації антени. Вертикально розташований диполь здатний генерувати вертикально поляризоване, але горизонтально поляризоване всенаправлене випромінювання. Для отримання горизонтально поляризованого всенаправленого випромінювання потрібно застосувати електрично малу рамкову антену або кілька випромінювачів належним чином. У складних конфігураціях всенаправленої антени з подвійною лінійною або круговою поляризацією необхідно враховувати ортогональні компоненти поля та фазову затримку.

Всеспрямованість є одним з найважливіших параметрів для інженерних застосувань. З точки зору конструкції, один випромінювач з круговою симетрією може легше досягти бажаної всеспрямованості, ніж кілька елементів із комбінованим всеспрямованим випромінюванням.

Пропускна здатність є ще одним ключовим фактором для всеспрямованих антен, особливо для сучасних бездротових систем з надширокосмуговою або багатодіапазонною роботою. Розробка широкосмугових антен з обмеженнями

всеспрямованого випромінювання та поляризації становить великий виклик. Зазвичай для реалізації широкосмугових вертикально поляризованих всеспрямованих антен використовують збільшення об'єму випромінювача. Для горизонтально поляризованих всеспрямованих антен широкосмугову роботу можна досягти за допомогою спеціально налаштованого випромінювача або кількох широкосмугових елементів, таких як конічні щілини та логарифмічно-періодні антени.

2.2 Всеспрямована монопольна антена

Монопольна антена – це один з ключових елементів бездротових технологій, який забезпечує передачу та прийом сигналів у різних пристроях, від смартфонів до медичних пристроїв та безпілотних літальних апаратів. Її актуальність у сучасному світі набуває особливого значення в умовах стрімкого розвитку бездротових комунікаційних технологій та зростаючої потреби в швидкому та надійному зв'язку.

У сучасному цифровому світі, де бездротовий доступ до Інтернету, передача даних та зв'язок є необхідністю для багатьох аспектів життя та бізнесу, монопольні антени відіграють ключову роль у забезпеченні зв'язку. Їхні компактні розміри, ефективність та надійність роблять їх незамінними компонентами в різних пристроях та системах, що використовують бездротові технології.

Особливо важливою стає актуальність монопольних антен у контексті постійного росту обсягу передачі даних та розширення мереж бездротового зв'язку. Завдяки постійному покращенню їхніх характеристик та технічних можливостей, монопольні антени стають все більш універсальними та

адаптованими до потреб сучасного світу, де зв'язок є важливим фактором для розвитку суспільства та технологій.

Технічно монопольна антена може бути визначена як електромагнітний пристрій, що використовується для прийому та/або передачі радіосигналів у бездротових комунікаційних системах. Вона зазвичай складається з провідної або печатної плати, на якій розташовані розраховані антенні елементи. Монопольні антени відрізняються простотою конструкції та компактністю, що робить їх ідеальними для використання в різних пристроях та системах, де обмежені розміри та ефективна робота важливі. Основна функція монопольної антени полягає в перетворенні електричного сигналу на радіохвильовий сигнал для передачі або навпаки, у прийомі радіосигналів і перетворенні їх на електричний сигнал для подальшої обробки в приймачі.

Звичайна монопольна антена складається з прямого стрижневого провідника, який майже завжди розміщується перпендикулярно до певних заземлених площин. Цей тип антени був винайдений Гульєльмо Марконі в 1895 році. Виявивши, що приєднавши один термінал свого передавача до довгого дроту, підвішеного в повітрі, а інший - до заземленої площини, він зміг передавати радіохвилі на великі відстані. Через це цю антену іноді називають антеною Марконі, хоча Олександр Попов незалежно винайшов її практично в той же період часу.

Монопольні антени широко використовуються в різних бездротових системах через їхню простоту та ефективність. Вони можуть бути знайдені у радіоприймачах, передавачах, мобільних телефонах та інших пристроях. Сучасні варіанти монопольних антен зазвичай мають оптимізовані конструкції для досягнення кращої продуктивності та покращеної якості сигналу.

Згідно з рисунком 2.6, можна уявити монопольну антену як результат заміни нижньої половини вертикального диполя антени заземленою площиною,

що стоїть під прямим кутом до іншої половини. Згідно з теорією зображень, діаграма напрямленості монопольної антени з ідеально провідною нескінченною заземленою площиною ідентична верхній половині діаграми напрямленості диполя подвоєної довжини.

Монопольні антени довжиною до чверті довжини хвилі мають одну пелюстку, з напругою поля, яка монотонно зменшується від максимуму у горизонтальному напрямку [19]. Проте, більш довгі монопольні антени мають складніші діаграми з кількома конічними пелюстками, що випромінюють під кутами в небо. Оскільки монопольна антена випромінює лише в простір над земною поверхнею або половину простору дипольної антени, її спрямованість буде вдвічі (на 3 дБ більше) спрямованості повної дипольної антени. Крім того, вхідний опір монопольної антени становить половину вхідного опору повної дипольної антени. Наприклад, для чвертіхвильової монопольної антени (L = 0,25λ) з ідеальною нескінченною заземленою площиною її спрямованість становитиме 5,15 дБі, а вхідний опір Zвх = 36,5 + j21,25 Ом.

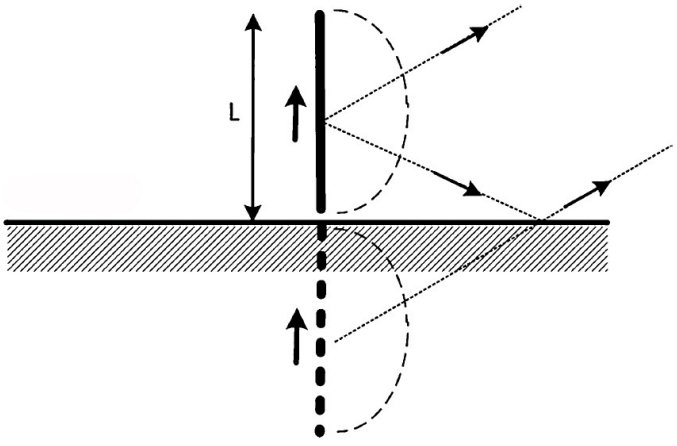


Рисунок 2.6 – Монопольний аналіз з використанням теорії зображень

Площина заземлення, що використовується з монополем, може бути реальною землею; у такому випадку антена розташована на землі, і одна сторона

живильної лінії підключена до заземлення в основі антени. Ця конструкція використовується для щоглових випромінювальних антен, що застосовуються в радіомовленні на низьких частотах. Однак на частотах надвисоких частотах та ультрависоких частотах потрібний фізичний розмір площини заземлення менший, тому використовується металева площина, щоб можна було встановити антену над нею; прикладами таких поверхонь можуть бути дах автомобіля або корпус літака.

Загальний вплив електрично малої площини заземлення, а також неідеального провідного заземлення на характеристики монопольної антени полягає в тому, що напрямок максимального випромінювання нахиляється до більших кутів місця. На рисунку 2.7 порівнюються діаграми спрямованості чвертьхвильового монополя з різними розмірами основи.

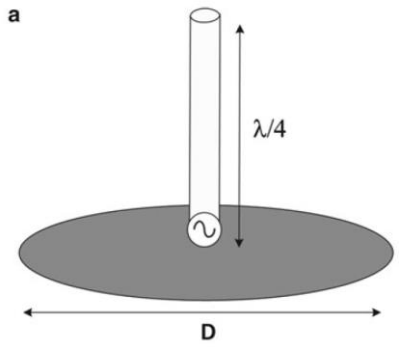


Рисунок 2.7 – Конфігурація антени монопольної антени

2.3 Тривимірні монопольні антени

На відміно до дипольної антени, монопольна антена є незбалансованою, що робить її ідеальною для живлення за допомогою коаксіального кабелю [20]. На рисунку 2.8 показано, як внутрішній провідник коаксіального з'єднувача, такий як субмініатюрна версія А (SMA), з'єднується з нижнім кінцем монополя, тоді як інший провідник SMA з'єднується з заземленою площиною.

Випромінювач монопольної антени може мати різні конфігурації, такі як конічний конус, конічний циліндр, поперечна пластина, паралельна пластина та катана пластина. Важливо зауважити, що конфігурації можуть забезпечити широкосмугове узгодження опору, проте тільки антени з круглою симетричною формою випромінювача можуть генерувати бажане всеспрямоване випромінювання. Такі випромінювачі з більшим об'ємом можуть показати ширшу смугу пропускання порівняно з тими, що мають стержнеподібну форму, тоді як конічна структура забезпечить краще узгодження імпедансу.

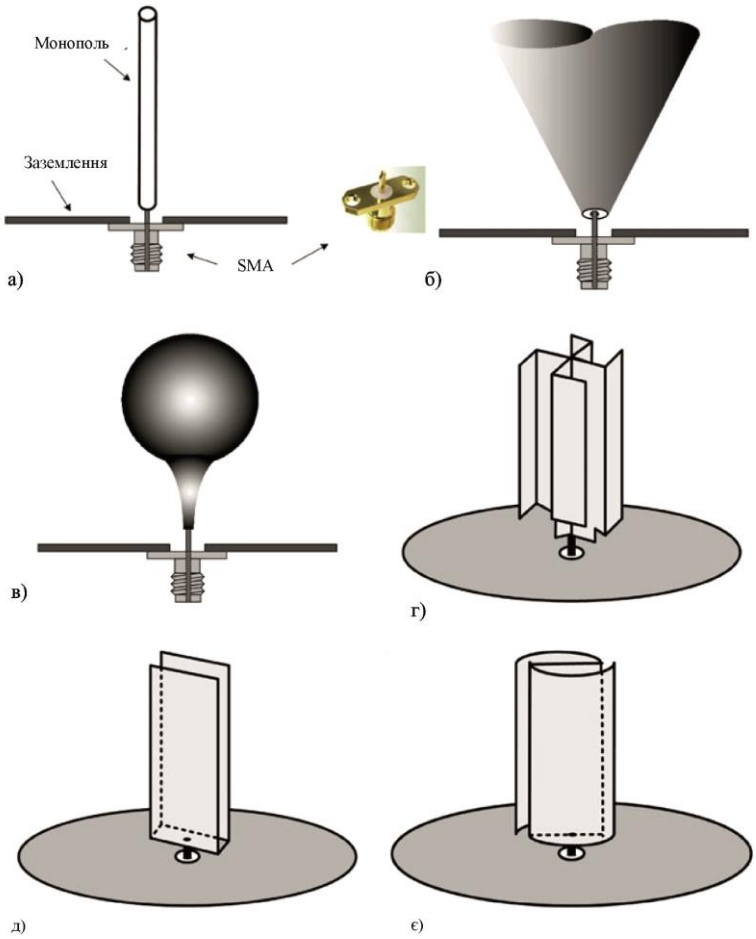


Рисунок 2.8 – Коаксіальна монопольна антена з лінійним живленням і різні конфігурації тривимірного випромінювача; а) – стержнеподібна, б) – конусоподібна, в) – конічна, г) – перехрещені пластини, д) – паралельні пластини, є) – катані пластини

2.4 Друковані планарні монопольні антени

Було зазначено ряд друкованих всенаправлених антен, у яких плоский монополь та заземлююча площина вигравірувані на друкованій платі. Ці антени (рисунок 2.9) складаються з випромінювача та невеликої площини заземлення, і живляться вони від мікросмужкової лінії або копланарного хвилеводу (CPW). У випадку мікросмужкової антени випромінювач і лінія живлення розташовані з одного боку друкованої плати, а заземлююча площина – з іншого. У конфігурації з CPW як живильною лінією, і радіатор, і CPW знаходяться на одному боці друкованої плати.

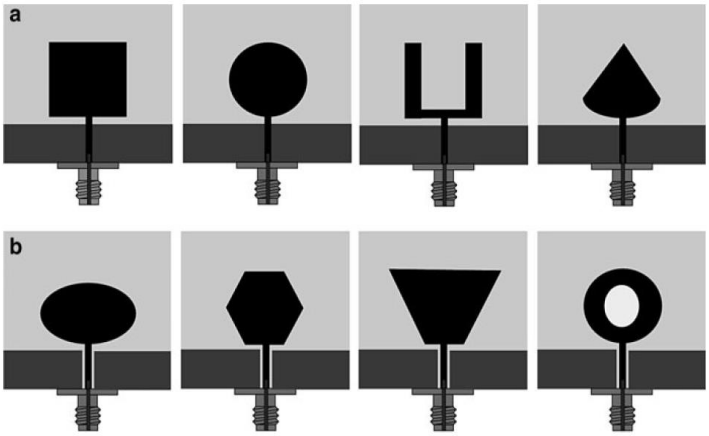


Рисунок 2.9 – Друковані всеспрямовані антени; а) – друкована монопольна антена з мікросмужковим живленням і б) – друкована монопольна антена з копланарним хвилеводом

Ці антени мають здатність забезпечувати широкосмуговий опір і підвищувати пропускну здатність за бажаного всенаправленого випромінювання, особливо на високих частотах, де досягається двонаправлена діаграма спрямованості замість всенаправленої. Зміна форми випромінювача допомагає регулювати смугу пропускання антени та реалізувати деякі

специфічні характеристики, такі як пропускна здатність. Такі технології відкривають широкі можливості для створення компактних та ефективних антен для різних бездротових систем.

2.5 Висновок до другого розділу

У даному розділі розглянуто різноманітні типи антен, спрямованих на досягнення всенаправленого випромінювання. Розглядалися як класичні монопольні антени, так і їх тривимірні та друковані планарні варіації. Проведений аналіз дозволив отримати уявлення про технічні характеристики кожного типу антен, їхню спрямованість та можливості застосування в різних областях бездротових технологій. Висновки дозволяють краще розуміти переваги та обмеження кожного виду монопольних антен, а також визначити оптимальний варіант для конкретних потреб у зв'язку.

3 СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ МОНОПОЛЬНИХ АНТЕН

Сучасні та майбутні бездротові системи висувають більші вимоги до конструкцій антен. Зараз багато систем працюють у двох або більше діапазонах частот, вимагаючи дво- чи потрійного діапазону роботи принципово вузькосмугових антен [21]. До них належать супутникові навігаційні системи, стільникові системи, бездротова локальна мережа та комбінація цих систем. Однією з найпопулярніших антен, які використовуються в системах мобільного зв'язку, є монопольна антена та її сімейство. Монопольні антени зручно підбирати до 50 Ом, вони незбалансовані. Це усуває потребу в балуні, який може мати обмежену смугу пропускання. Найпростішим представником сімейства є четвертьхвильовий монополь над ідеальною площиною заземлення. Імпеданс смуги пропускання, досягнутий для четвертьхвильової монопольної антени, залежить від радіуса циліндричного штиря та збільшується зі збільшенням радіуса. Це вірно до моменту, коли ступінчастий радіус від зонда подачі до циліндричного елемента стає різким. Звуження цього переходу часто використовується в широкосмугових елементах, таких як біконічні диполі та конічні монополі. Як правило, частковий імпеданс смуги пропускання (10 дБ зворотних втрат) для факторів довжини до радіуса 20 і 100 становить приблизно 25% і 16% відповідно в діапазоні частот 1-6 ГГц. Простіша техніка з нижчою вартістю полягає в заміні циліндричного стрижня звичайного монополя на плоский елемент, утворюючи плоский монополь. Майнке та Гундлах, які згадали про це як варіант циліндричних і конічних монополів, вперше описали плоский монополь у підручнику в 1968 році. Дубост і Зіслер описали його більш детально в 1976 році. Вони спостерігали широкі характеристики імпедансу цієї антени. Пізніше було вивчено ряд різних форм, які підходять до цієї категорії широкосмугових планарних монопольних антен. Агравалл, який запропонував

формулу для прогнозування частоти, що відповідає нижньому краю імпедансу смуги пропускання для цих антен [22], також вивчав круглі та еліптичні дискові монополи в 1998 році.

Плоский монополь може бути реалізований шляхом заміни дротяного елемента звичайного монополя на плоский елемент. Плоский елемент розташований на відстані h над площиною заземлення [22]. Заміна дротяного елемента плоским елементом різної форми збільшує площі поверхні монополів, що безпосередньо впливає на смугу пропускання. Планарні монопольні антени давно використовуються в мобільному зв'язку. Кілька плоских монополів, таких як круглі, еліптичні, квадратні, прямокутні, шестикутні та п’ятикутні, були проаналізовані, забезпечуючи широкий імпеданс смуги пропускання. Серед усіх цих конфігурацій круглий монополь і еліптичний монополь, що живляться вздовж великої осі, як повідомляється, дають максимальну пропускну здатність [23]. Зовсім недавно було показано, що хоча квадратний монополь забезпечує меншу смугу пропускання, ніж круглий монополь, його діаграма спрямованості зазнає меншої деградації в межах імпедансу смуги пропускання [23]. Планарні монопольні антени можна оптимізувати для забезпечення надзвичайно широкого імпедансу смуги пропускання з прийнятною ефективністю випромінювання. Також у реконфігурованих радіосистемах планарні монопольні антени забезпечують максимальну гнучкість, випромінюючи весь діапазон частот радіотерміналу [21]. Вони можуть бути розроблені для охоплення крайніх частот від GSM900/NADC до GSM1800/PCS1900, IMT-2000, діапазонів ISM 2,45 ГГц і 5,8 ГГц, включаючи UWB 1,9 ГГц – 10,6 ГГц).

Широкосмугові планарні монополі також можна зрозуміти, розглядаючи їх як модифікована планарна мікросмужкова антена. Планарна мікросмужкова антена у своїх оригінальних конфігураціях не можуть давати багатооктавну смугу пропускання через їх резонансну природу. У MSA збільшення висоти

підкладки або зменшення діелектричної проникності підкладки збільшує BW. Тепер, якщо прямокутна діелектрична проникність без підкладки подається через коаксіальне джерело живлення з перпендикулярною площиною заземлення, це призведе до ефективної діелектричної проникності одиниці та значного збільшення висоти h. Обидва ці фактори дадуть велику смугу пропускання.

3.1 Аналіз пласкої монопольної антени

У випадку мікросмужкових антен із товстою підкладкою та низькою діелектричною проникністю досягається пропускна здатність від 5 до 15 %. Будь-яке подальше збільшення товщини підкладки знижує ефективність мікросмужкових антен і підвищує крос-полярні рівні. Збільшення товщини підкладки призведе до відповідного збільшення висоти зонда. Збільшення довжини зонда також призведе до збільшення індуктивності зонда, і в результаті цього вхідний опір стане занадто індуктивним, щоб отримати відповідний імпеданс. Ця конфігурація показана на рис. 3.1а. Про цей великий індуктивний вхідний опір можна подбати, подаючи на патч коротший зонд довжиною p, як показано на рис. 3.1б. У цьому випадку, оскільки патч подається вздовж периферії, отже, потрібна додаткова перпендикулярна площина заземлення. Якби h було дуже великим, нижня площина заземлення мала б незначний ефект, і, отже, її можна було б видалити. Ця конфігурація стає подібною до планарної монопольної антени, як показано на рис. 3.1в [24]. Плоскі дискові монопольні антени дають дуже велику смугу пропускання імпедансу, що можна пояснити наступними двома способами:

1. Планарний монополь можна прирівняти до циліндричної монопольної антени з великим ефективним діаметром. Монопольна антена зазвичай

складається з тонкого вертикального дроту, встановленого над заземленою поверхнею, смуга пропускання якої збільшується зі збільшенням його діаметра [25].

2. Планарну монопольну антену можна розглядати як мікросмужкову антену на дуже товстій повітряній підкладці; його великий імпеданс смуги пропускання зрозумілий. Для цих випромінюючих ділянок різні моди вищого порядку будуть збуджені, і оскільки всі моди матимуть більшу смугу пропускання, вони зазнають менших коливань імпедансу. Форму та розмір цих планарних антен можна оптимізувати, щоб перевести всі моди в коло КСХ = 2 на діаграмі Сміта, що призводить до дуже великої смуги пропускання імпедансу. Таким чином, утворюється широкосмугова плоска монопольна антена.

Отже, планарну прямокутну дискову монопольну антену можна розглядати як різновид прямокутної мікросмужкової антени, як описано вище, у якій горизонтальна площина землі вважається розташованою на нескінченності.

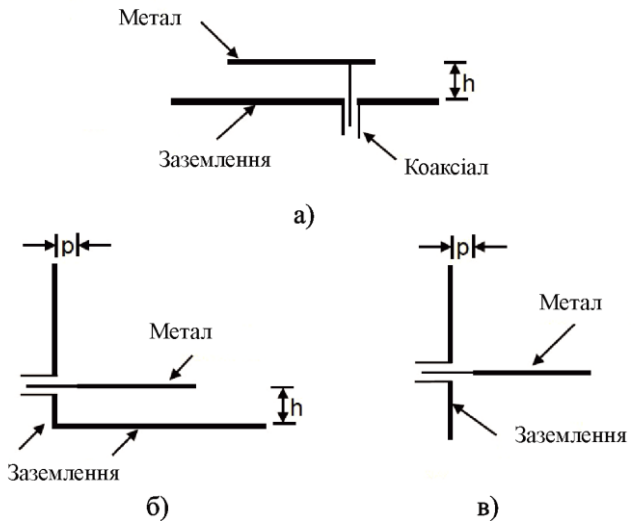


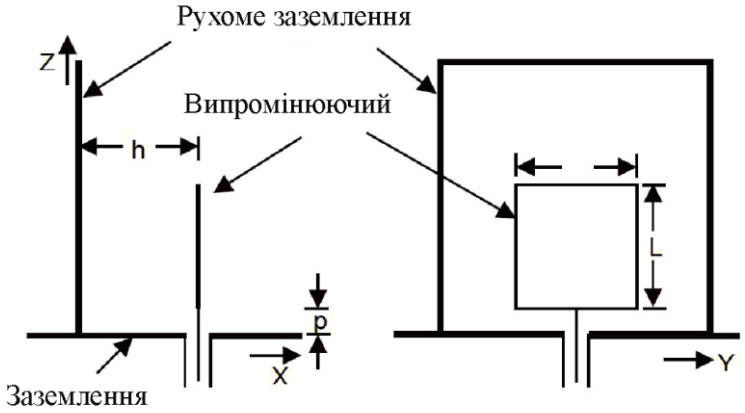
Рисунок 3.1 – а) –мікросмужкова антена, підвішена у повітрі;

б) – модифікована мікросмужкова антена з боковою подачею;

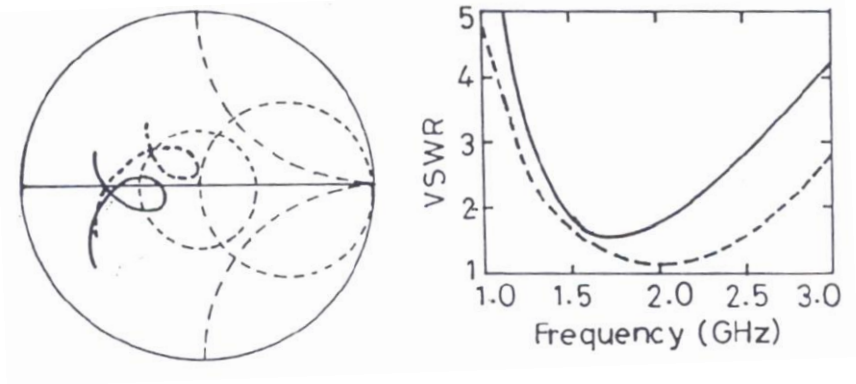
в) – плоска монопольна антена

3.2 Прямокутна мікросмужкова антена

Прямокутна мікросмужкова антена, що випромінює з L=W, виготовлена з мідної пластини товщиною 0,1 см з двома ортогональними площинами заземлення (утворюючи L-подібну площину заземлення) з роз'ємом мікросмужкової антени 50 Ом, показана на рис. 3.2а і 3.2б відповідно.



а) б)



в) г)

Рисунок 3.2 – а) – Види збоку та б) – спереду модифікованої прямокутної мікросмужкової антени з ортогональними площинами землі. Виміряний в) – вхідний імпеданс і г) – графіки КСХ

Пластир подається за допомогою зонда довжиною p через фіксовану площину заземлення, а ортогональна площина заземлення є рухомою. Для рухомої площини заземлення на відстані h = 3 см від випромінювальної плями та довжини зонда p = 0,4 см виміряний вхідний опір і графіки КСХ показані на рис. 3.2 в, г відповідно. Видно кілька петель, які зумовлені збудженням різних мод вищого порядку прямокутної мікросмужкової антени. Графік імпедансу показує менший індуктивний зсув через менше значення довжини живильного зонда p, тому значення p збільшується до 1,0 см, щоб зсунути графік імпедансу за годинниковою стрілкою. Результати підсумовані в таблиці 1. Виміряна смуга частот для КСХ < 2 становить від 858 до 988 МГц.

Для цілей аналізу цю структуру можна розглядати як мікросмужкову антену на повітряному діелектрику з додатковою перпендикулярною площиною заземлення. Аналітичні методи, дійсні для мікросмужкових антен, можна застосувати до цієї конфігурації з відповідними модифікаціями. Формула для прямокутної мікросмужкової антени використовується для розрахунку резонансної частоти цієї антени. Оскільки діелектричним середовищем для всіх розглянутих випадків є повітря, ефективна діелектрична проникність ε_e дорівнює 1. Теоретичну резонансну частоту для основної моди можна розрахувати за допомогою рівняння (3.1).

$$f_0 = \frac{c}{2L_e\sqrt{\varepsilon_e}} = \frac{15}{L_e\sqrt{\varepsilon_e}}. \qquad (3.1)$$

3.3 Характеристики широкосмугових планарних монопольних антен

Широкосмугові планарні монопольні антени виявилися чудовими випромінювачами для дуже великої смуги пропускання. Вони знаходять своє місце в багатьох системах. Деякі з їхніх характеристик, як зазначено нижче [26]:

- дуже великі смуги пропускання імпедансу. Наприклад, досі досягнутий імпеданс смуги пропускання для КСХ = 2:1 досягав приблизно 10:1 для еліптичного планарного монополя та 80% для інших плоских монополів;
- забезпечують максимальну гнучкість у реконфігурованих радіостанціях;
- стабільні монополярні діаграми спрямованості із зворотними втратами понад 10 дБ у надзвичайно широкому діапазоні частот;
- здатний працювати в багатьох діапазонах і має всенаправлені діаграми спрямованості в азимутальній площині для всіх робочих діапазонів;
- низька вартість виготовлення та простота виготовлення;
- компактний розмір, лінійна фазова характеристика та прийнятна ефективність випромінювання;
- досягнуті електричні висоти менше $\lambda/4$;
- може забезпечити перешкодостійкість з існуючими бездротовими мережевими технологіями, використовуючи планарну монопольну антену з вирізом смуги.

3.4 Різноманітні форми монопольних антен

Дослідники з метою оптимізації різних параметрів досліджували низку різних форм. З кожної дослідженої форми було зроблено низку висновків, і ці результати використані для подальшого вдосконалення конструкції цих антен. Форми, досліджені на даний момент, наведені нижче:

- планарні прямокутні та квадратні монопольні антени;
- плоскі прямокутні монополи (ПМ) рівних площ;
- планарні трикутні та гексагональні монопольні антени;
- плоскі круглі монопольні антени;

- планарно-еліптичні монопольні антени;
- широкосмугові ортогональні квадратні монопольні антени з напівкруглою основою;
- укорочений плоский монополь з фаскою;
- планарні монопольні антени у формі метелика;
- кругла сітчаста монопольна антена;
- кільцеподібна кільцева монопольна антена;
- компактна широкосмугова плоска прямокутна монопольна антена;

Для подальшої оптимізації діаграм спрямованості випромінювання та досягнення збільшення смуги пропускання було також досліджено ряд модифікованих форм вищезгаданих форм, і поле все ще досліджується, щоб щодня додавати щось нове.

3.5 Аналітичний вивід характеристик монополя

Виводено властивості монопольної антени, припускаючи синусоїдальний розподіл струму по всій довжині антени. Єдиним випромінюючим елементом є вертикальний елемент довжиною 1/4 довжини хвилі. Тому монопольну антену на заземленій площині можна змоделювати як напівхвильовий диполь за допомогою методу зображень [27]. У цьому випадку заземлююча площина запобігає монопольному випромінюванню в півсферу під заземлюючою площиною, але дозволяє отримати діаграму спрямованості, ідентичну випромінюванню диполя у верхній півсфері [28]. На рис. 3.3 показано монополь, що утворює півхвильовий диполь. Жирна пунктирна крива лінія представляє розподіл струму по всій довжині антени. Отже, вираз для розподілу струму вертикальних елементів можна представити у вигляді (3.2)

$$\tilde{I} = I_0 \cos(\beta z), \tag{3.2}$$

де I_0 – максимальне значення струму, а $\beta = 2\pi/\lambda$

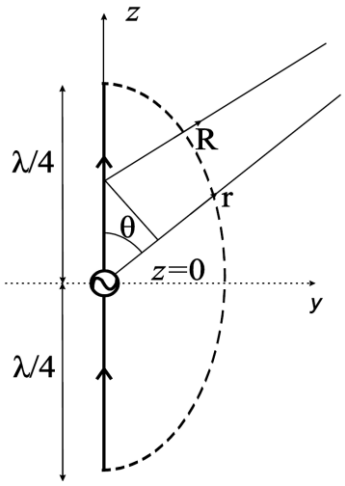


Рисунок 3.3 – Аналіз монопольної антени з синусоїдальним розподілом струму

У точці $P(r, \theta, \varphi)$ вектор магнітного потенціалу визначається як

$$\vec{A} = \vec{A}_z = \frac{\mu}{4\pi} \int_{z=-\lambda/4}^{\lambda/4} \frac{\tilde{I}}{R} e^{-j\beta R} dz \,. \tag{3.3}$$

Підставляючи значення $\tilde{I}$ у рівняння (3.3), векторний магнітний потенціал стає,

$$\vec{A}_z = \frac{I_0 \mu}{4\pi} \int_{z=-\lambda/4}^{\lambda/4} \frac{\cos\beta z}{R} e^{-j\beta R} dz \,. \tag{3.4}$$

Коли точка $P(r,\theta,\varphi)$ розташована далеко від антени, можна записати рівняння $R \approx r - z\cos\theta$, щоб врахувати зсув фази та наблизити його як $R \approx r$ для відстань у знаменнику.

Крім того, можна використовувати наступну тригонометричну формулу

$$\cos\beta z = \frac{e^{j\beta R} + e^{-j\beta R}}{2}, \tag{3.5}$$

Тоді вираз (3.4) можна записати як

$$\vec{A}_z = \frac{I_0 \mu}{8\pi r} e^{-j\beta R} \int_{z=-\lambda/4}^{\lambda/4} (e^{j\beta R} + e^{-j\beta R})\, e^{-j\beta z\cos\theta} dz. \tag{3.6}$$

Провівши весь розрахунок і необхідні обчислення, отримано наступний вираз для *z*-компоненти вектор-магнітного потенціалу

$$\vec{A}_z = \frac{\mu I_0 e^{-j\beta R} \cos(\pi/2\cos\theta)}{2\pi\beta r \sin^2\theta}. \tag{3.7}$$

Тепер напруженість магнітного поля в зоні випромінювання можна отримати за наступною формулою:

$$\vec{H} = \frac{j\beta}{\mu} \sin\theta \vec{A}_z \hat{a}_\varphi, \tag{3.8}$$

де $\hat{a}$ – одиничний вектор вздовж напрямку φ. Підставляючи вираз вектора магнітного потенціалу з (3.7) в (3.8), отримуємо

$$\vec{H} = \frac{jI_0 e^{-j\beta r} \cos(\pi/2\cos\theta)}{2\pi r \sin\theta} \hat{a}_\varphi. \tag{3.9}$$

Напруженість електричного поля в зоні Фраунгофера можна отримати як

$$\vec{E} = \eta \vec{H} \hat{a}_\theta . \tag{3.10}$$

Тут $\hat{a}_\theta$ є одиничним вектором уздовж напрямку θ, а η є власним імпедансом середовища (у цьому випадку повітря). Підставляючи вираз для магнітного поля з (3.9) в (3.10), отримано вираз для електричного поля:

$$\vec{E} = \frac{j\eta I_0 e^{-j\beta r} \cos(\pi/2 \cos\theta)}{2\pi r \sin\theta} \hat{a}_\varphi . \tag{3.11}$$

Використовуючи вирази для напруженості магнітного та електричного полів з (3.10) і (3.11), отримано вираз для середньої випромінюваної потужності на одиницю площі антени як,

$$\left\langle \vec{S} \right\rangle = \frac{1}{2} \mathrm{Re} \left| \vec{E} \times \vec{H} \right| = \frac{1}{2} \frac{\left| \vec{E} \right|^2}{\eta} . \tag{3.12}$$

Після виконання необхідних обчислень, нарешті, досягуenj наступного виразу,

$$\left\langle \vec{S} \right\rangle = \frac{\eta I_0^2 \cos^2\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{8\pi^2 r^2 \sin^2\theta} = \frac{\eta I_0^2}{8\pi^2 r^2} \left(\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin\theta} \right) . \tag{3.13}$$

Для монопольної антени над віртуальною землею наведений вище вираз дійсний для діапазону $0 \le \theta \le \frac{\pi}{2}$.

Використовуючи таке наближення [29]

$$\left(\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin\theta}\right)^2 \approx \sin^3\theta \quad , \tag{3.14}$$

який дійсний для діапазону $0 \le \theta \le \pi$, можна записати (3.13) у вигляді

$$\langle \vec{S} \rangle = \frac{\eta I_0^2}{8\pi^2 r^2}\sin^3\theta \quad . \tag{3.15}$$

Загальна потужність, випромінювана монополем описується наступним виразом (3.16) [30]:

$$P = \frac{3\eta I_0^2}{64} \quad . \tag{3.16}$$

Опір визначається наступним рівнянням:

$$P = \frac{1}{2} I_0^2 R \quad . \tag{3.17}$$

Використовуючи (3.16) і (3.17), отримано вираз опору для монополя:

$$R = \frac{3\eta}{32} \quad . \tag{3.18}$$

Підсилення спрямованості антени визначається за наступною формулою:

$$G = \frac{4\pi r^2 \langle \vec{S} \rangle}{P} \quad . \tag{3.19}$$

Підставляючи значення для $\langle \vec{S} \rangle$ і P з (3.15) і (3.16), отримано наступне рівняння підсилення спрямованості,

$$G = \frac{32}{3\pi} \sin^3 \theta . \tag{3.20}$$

Нарешті, спрямованість монополя виявляється

$$D = \frac{32}{3\pi} = 3.39 \approx 5.31 dB . \tag{3.21}$$

Таким чином, коефіцієнт підсилення чвертьхвильової монопольної антени над віртуальною землею як 5,31 дБ, що трохи більше ніж у два рази перевищує коефіцієнт підсилення півхвильової дипольної антени з центральним живленням, який становить 2,16 дБ.

3.6 Висновок до третього розділу

У даному розділі проведено аналіз різних типів монопольних антен, включаючи пласку монопольну антену, прямокутну мікросмужкову антену, а також широкосмугові планарні монопольні антени. Були розглянуті їхні характеристики, особливості конструкції та можливі застосування. Також розглянуто різноманітні форми монопольних антен і надано аналітичний вивід основних характеристик цих антен.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ МОНОПОЛЬНОЇ АНТЕНИ

В різних галузях зростає потреба у мікрохвильових пристроях та антенах для широкого спектру комерційних комунікаційних застосувань. Це стимулює інженерів до розробки більш компактних та інноваційних моделей. При створенні таких виробів важливо враховувати технічні характеристики та параметри конструкції відповідно до майбутніх вимог у галузі зв'язку. Запит на антени з регульованим діапазоном для обмеження частот відповідно до технічних вимог набуває особливої актуальності в сферах зв'язку. У військовому зв'язку, зокрема, велике значення має попит на антени з режекторним діапазоном для більш точного контролю за спектром.

Було розроблено антени різних типів і конфігурацій для різних цілей. Одна з них – антена трапецієподібного діапазону S-діапазону, яка використовує подавлення для блокування S-діапазону і дозволяє проходження L-діапазону з високим коефіцієнтом викиду. Інші антени включають V-подібну антену на основі метаматеріалу, широкосмугову антену з розділенням у певному діапазоні, а також антену з вирізом на основі PIN-діода для блокування WLAN/IEEE-802 (WLAN-Wireless Local Area Network). Одна з антен була створена з використанням метаматеріалів і мала гнучкі характеристики, що були успішно вивчені та перевірені під час моделювання та експериментальних вимірювань прототипу.

Розроблено різноманітні моделі антен, які включають в себе реконфігуруєми та спеціалізовані характеристики для різних застосувань. Ці антени включають реконфігуровані антени з дефектною площиною заземлення для промислового, наукового та медичного діапазонів ISM, антени круглої форми з можливістю реконфігурації монополя для додатків автомобільного зв'язку, а також монопольні антени з різними формами та опорою з плоского

штучного магнітного провідника для підвищення посилення. Також були розроблені антени з вирізом та резонаторними структурами для поліпшення спрямованості в робочих діапазонах, а також фрактальні антени для різних систем бездротового зв’язку. Деякі з передових моделей антен мають структури метаматеріалів та FSS (Food Safety and Standards).

Розробка трапецієподібного монополю з розмірами 31 × 42 × 1,6 мм та використання компланарного хвилеводного живлення з опором 50 Ом може виявитися складною задачею. Інженери та дослідники часто стикаються з різними викликами під час моделювання та аналізу антен. Вирішення цих проблем має наступні підходи:

1. Обмеження частотних діапазонів або смуг пропускання при розробці антен може призводити до необхідності створення багатодіапазонних або реконфігурованих антен. Це дозволяє працювати на багатьох частотах або динамічно змінювати резонансну частоту.

2. Малий форм-фактор, що може ускладнювати розробку ефективних антен, особливо на низьких частотах. Меандрові структури або метаматеріали можуть допомогти мінімізувати розміри антени без втрати продуктивності.

3. Розробка антен складної форми потребує значних обчислювальних ресурсів і точного моделювання. Використання передових чисельних методів, таких як метод скінченних елементів (FEA) або метод моментів (MoM), дозволяє імітувати характеристики антени зі складною геометрією.

4.1 Дослідження площин E і H

Дослідження діаграм спрямованості антени в площинах E (підйом) і H (азимутальна) відображає, як її конструкція впливає на розподіл сигналів у просторі. У площині E (підйом), вертикальний випромінювач та поверхня землі

створюють дзеркальне відображення, що сприяє рівномірному розподілу сигналів у вертикальній площині. У площині H (азимутальній), симетрія та поверхня землі однаково впливають на випромінювання у всіх напрямках, створюючи всенаправлену картину. Поєднання цих аспектів у конструкції антени забезпечує ефективне та рівномірне випромінювання, що особливо важливо для застосувань, які потребують покриття у всіх напрямках, таких як системи бездротового зв’язку та мовлення.

4.2 Компроміси та міркування щодо конструкції

Оптимізація продуктивності антени зі скромним посиленням та ефективністю є завданням, що вимагає знаходження компромісів та ретельних міркувань щодо конструкції. Один із компромісів полягає у розмірі антени: моделі з високим коефіцієнтом посилення часто потребують більшого простору і можуть бути не практичними для обмежених місць. З іншого боку, антени з помірним посиленням зазвичай забезпечують прийнятну продуктивність і можуть бути більш компактними.

Ще одним аспектом є ефективність в порівнянні зі складністю конструкції. Складні антени можуть збільшувати витрати на виробництво через високі вимоги до матеріалів та робочої сили. Вибір менш складної конструкції дозволяє зменшити виробничі витрати і спрощує процес виготовлення.

При розгляді маршрутизаторів Wi-Fi, антени з помірним посиленням часто обираються для забезпечення покриття широких зон. Це пов'язано з тим, що вони здатні збалансувати діапазон і спрямованість сигналу, що особливо важливо, якщо пристрої живляться від батареї або якщо енергоефективність є пріоритетом. Антени з великим посиленням можуть вимагати більше енергії, що може бути невигідно в деяких сценаріях використання.

Нарешті, варто враховувати можливі перешкоди, такі як сусідні пристрої або відбиття сигналу. Антени з великим посиленням можуть бути більш чутливими до таких перешкод, тоді як антени з помірним посиленням можуть добре працювати в умовах обмеженого простору чи у середовищах з високим рівнем перешкод.

Отже, оптимізація характеристик антени зі скромним посиленням та ефективністю вимагає ретельного збалансування всіх цих факторів та урахування вимог конкретного застосування.

Ефективність антени визначається її здатністю ефективно перетворювати електричну енергію в електромагнітні хвилі, що вимірюється як коефіцієнт корисної дії (ККД). Високий ККД вказує на те, що антена ефективно випромінює або приймає сигнали, максимально використовуючи споживану енергію.

Високоефективні антени мають ряд переваг. Вони покращують якість сигналу, збільшуючи потужність сигналу і забезпечуючи надійний зв'язок на більшу відстань. Це допомагає у зменшенні втрат сигналу та покращенні якості зв'язку. Крім того, ефективні антени сприяють енергоефективності пристроїв бездротового зв'язку, що може підвищити тривалість їх роботи від одного заряду акумулятора.

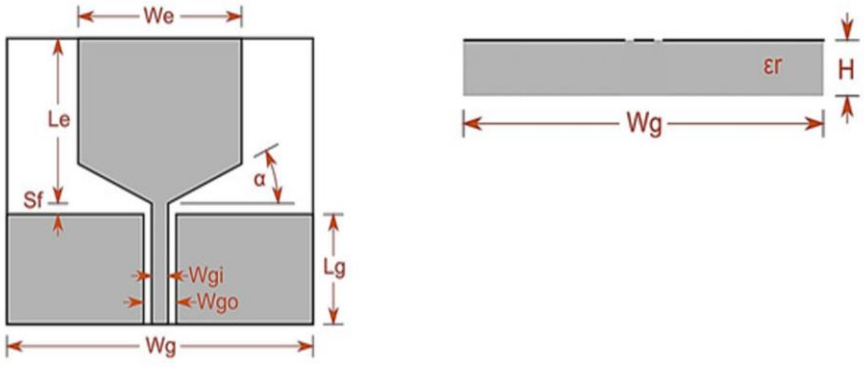
Проте розробка високоефективних антен може бути складною задачею. Це може потребувати використання складних випромінюючих елементів та високоякісних матеріалів, що підвищує витрати на виробництво. Крім того, ефективність антени може змінюватися в залежності від частоти, що ускладнює підтримку високої ефективності в широкому діапазоні робочих частот.

Таким чином, розробка та виробництво високоефективних антен вимагають компромісів та уваги до деталей, але може призвести до покращення продуктивності та ефективності бездротових систем.

4.3 Моделювання антени

У рамках дослідження антен трапецієподібної форми з вирізами у монопольному діапазоні, велика увага приділяється моделюванню та оптимізації їх конструкцій. Ця тема виявляється ключовою, оскільки антени такого типу мають широкий спектр можливого застосування у різноманітних комунікаційних системах. Один з основних компонентів цих антен - U-подібний виріз, який відіграє важливу роль у формуванні їх випромінювальних характеристик. У зв'язку з цим досить важливо дослідити вплив розташування цього вирізу на основні параметри антени та її ефективність.

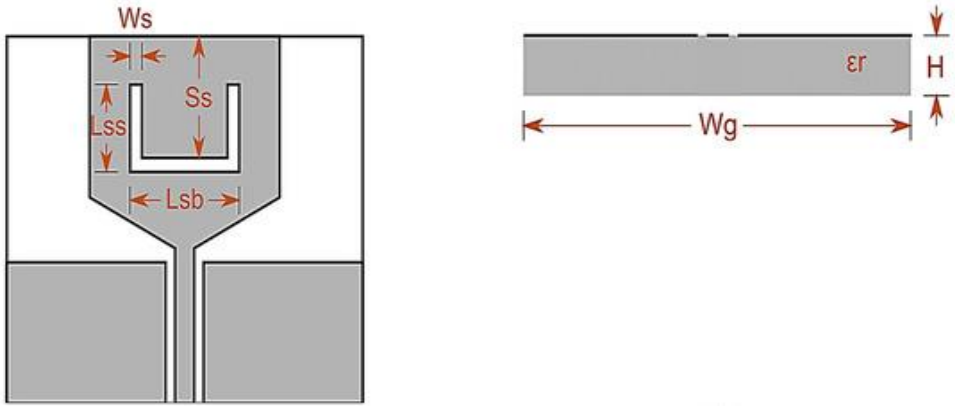
На рисунку 4.1, що демонструє трапецієподібний монополь, відображена конструкція антени з унікальною формою, яка зазвичай використовується для досягнення певних характеристик випромінювання та діапазону частот. У той час як на рисунку 4.2, що відтворює монополь з вирізом, показана модифікація цієї антени, де виріз впливає на її електричні властивості, що може призводити до покращення або зміни її характеристик.



а) б)

Рисунок 4.1 – Антена з трапецієподібною монопольною структурою:

а) – габаритний вигляд, б) – вигляд збоку



а) б)

Рисунок 4.2 – Трапецієподібна монопольна антена з вирізним діапазоном:
а) – габаритний вигляд, б) – вигляд збоку

Представлено габаритний вигляд і вид збоку трапецієподібного монополя і монополя з вирізом з копланарним хвилеводним живленням [31]. Ця антена має компактні розміри та виготовлена на діелектричному матеріалі FR4 з товщиною h = 1,65 мм. Така конструкція сприяє ефективності антени та забезпечує оптимальні характеристики в робочих умовах.

$$h > 0.06\,\lambda_g . \tag{4.1}$$

де λ_g – спрямована довжина хвилі.

У цій моделі антени використовується копланарне живлення хвилеводу з опором 50 Ом і зазором 0,2 мм, що забезпечує ефективну передачу сигналу. Додавання U-подібного вирізу до випромінюючої структури сприяє досягненню потрібного параметра смуги надрізу ще на етапі початкової конструкції [32]. Особливістю антени з вирізом діапазону є її здатність до виявлення відхилень у робочому діапазоні від 4,4 до 5,7 ГГц, при цьому досягаючи значного значення смуги пропускання в 1,3 ГГц. Така конструкція дозволяє ефективно

використовувати антену в різних умовах зв'язку та забезпечує стабільну та надійну роботу.

Таблиця 4.1 – Розмірні характеристики

Параметр	Опис	Значення
Le	Довжина монопольного елемента	15,76 мм
we	Ширина монопольного елемента	15,76 мм
α	Кут конусності біля основи монополя	35,64 θ
Sf	Розрив подачі	64,53 мкм
Wg	Ширина землення	31,52 мм
Lg	Довжина землення	25,21 мм
X	Висота підкладки	975,6 мкм

4.4 Переваги використання структури з вирізом

Значне покращення ефективності антени та її здатність до пригнічення перешкод у діапазоні частот від 4,4 до 5,7 ГГц може бути досягнута шляхом використання структури з вирізами. Це особливо важливо для збільшення пропускної здатності. Розширена пропускна здатність передбачає, що структура з вирізами може ефективно пригнічувати небажані частоти у робочому спектрі антени. Це пригнічення дозволяє антені працювати в ширшому діапазоні пропускання, що робить її більш універсальною та адаптованою до різноманітних вимог зв’язку. Такий підхід сприяє підвищенню якості та надійності бездротових систем і дозволяє їм оптимально функціонувати в умовах зростаючої конкуренції і електромагнітних перешкод.

Використання структури з вирізом сприяє покращенню підсилення антени, діаграми спрямованості та узгодженню імпедансу. Виріз допомагає зменшити резонанс і стоячі хвилі, що робить антену більш стабільною та ефективною.

Пом'якшення перешкод стає ще однією важливою перевагою використання вирізу. У сучасних умовах кілька систем бездротового зв'язку співіснує у діапазоні від 4,4 до 5,7 ГГц, що часто призводить до значних електромагнітних перешкод і ускладнює комунікацію. Додавання вирізу дозволяє зменшити ці перешкоди та покращити якість передачі даних і стабільність зв'язку.

Структура вирізу може бути налаштована на певні частоти перешкод з метою зменшення впливу цих перешкод на роботу антени та поліпшення її здатності приймати та передавати сигнали в умовах шумного середовища. Це означає, що структури з вирізом можуть динамічно налаштовуватись на різні заважаючі частоти, щоб забезпечити ефективне усунення перешкод. Такий підхід дозволяє змінювати конфігурацію частоти в залежності від змін у ландшафті перешкод або потреби в роботі на різних діапазонах частот. Ця універсальність є надзвичайно важливою в сучасних умовах, коли звуковий ландшафт перешкод постійно змінюється, а також у випадках, коли необхідно працювати з численними діапазонами частот для оптимального забезпечення якості зв'язку.

4.5 Частотний діапазон антени

Широкий діапазон частот, що охоплює антена – від 2,5 до 7 ГГц, має значний вплив на різноманітні системи зв’язку та відкриває широкі можливості для різних застосувань. Це стає особливо корисним у сучасному цифровому світі, де зростає попит на високошвидкісний та надійний бездротовий зв’язок.

Перш за все, антена може бути використана в мережах 4G LTE та Wi-Fi, охоплюючи діапазон від 2,5 до 4,4 ГГц. У цих мережах вона дозволяє підвищити швидкість передачі даних та забезпечити стабільний і надійний зв’язок для користувачів у різних областях, включаючи міські та сільські райони.

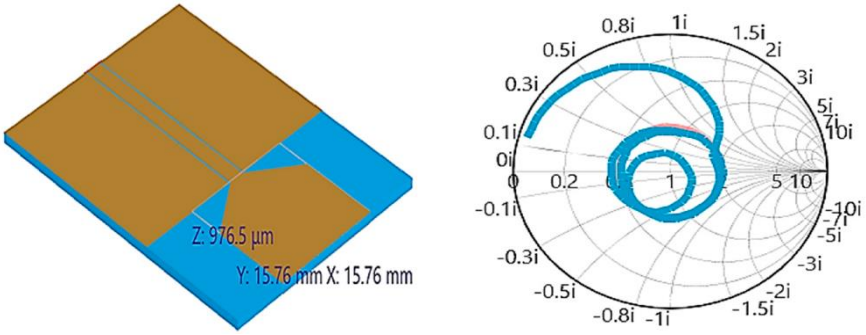
Далі, діапазон від 5,7 до 7 ГГц знаходить своє застосування в мережах 5G, які є майбутнім стандартом бездротового зв’язку. Висока пропускна здатність цього діапазону дозволяє забезпечити швидкий та стабільний зв’язок у високонавантажених мережах, де потрібна велика пропускна здатність для передачі великого обсягу даних.

Крім того, універсальність цієї антени охоплює Інтернет Речей (IoT) та різноманітні пристрої, які вимагають надійного та ефективного бездротового зв’язку. Завдяки своїм компактним розмірам і високій продуктивності, вона стає привабливим рішенням для вбудованих систем, датчиків, медичних пристроїв та інших IoT-застосувань.

Отже, антена з широким діапазоном частот відкриває широкі перспективи для розвитку та впровадження різноманітних бездротових технологій, сприяючи вдосконаленню комунікаційних мереж і покращенню зв'язку для користувачів у всьому світі.

4.6 Результати та аналіз

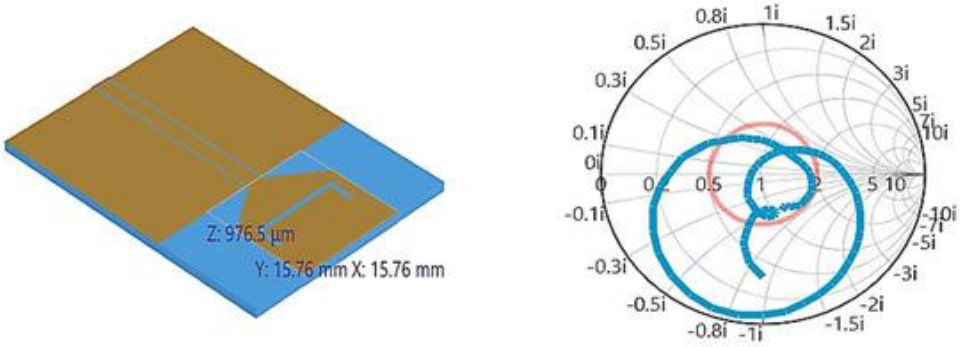
На рисунку 4.3 подано основні параметри антени, такі як коефіцієнт відбиття, імпеданс, ефективність та діаграма Сміта, а на рисунку 4.4 відображено детальний структурний огляд запропонованої антени, включаючи графічне зображення її конструкції та діаграму імпедансу Сміта. Значення імпедансу, яке складає 50 Ом, досягається на резонансних частотах, що відображено на графіку рисунка 4.4б, а також відповідних розмірах антени, виражених у міліметрах.



а) б)

Рисунок 4.3 – Монопольна антена смугового типу:

а) – поперечний розріз, б) – діаграма Сміта



а) б)

Рисунок 4.4 – Монопольна антена смугового типу з вирізом:

а) – поперечний розріз, б) – діаграма Сміта

На рисунку 4.5 надано параметр розсіювання S11, що відображає результати випробувань розробленої антени та її робочий діапазон. Антена демонструє резонанс у двох діапазонах частот: від 2,5 до 4,4 ГГц зі смугою пропускання 500 МГц та від 5,7 до 7 ГГц зі смугою пропускання 1000 МГц. Особливу увагу слід звернути на чітку порізку, яка спостерігається на частотах від 4,4 до 5,7 ГГц зі смугою пропускання 1300 МГц, що підкреслює високу ефективність антени в цих діапазонах.

На рисунку 4.6 представлений графік імпедансу моделі антени в залежності від робочої смуги та ріжкового діапазону. Значення імпедансу

проектуються на високому рівні в смузі вирізу, що свідчить про відповідність антени вимогам імпедансу та її ефективність у відповідному діапазоні частот. Ця інформація надає важливі відомості про характеристики та робочий діапазон розробленої антени, що допомагає забезпечити її оптимальну ефективність у реальних умовах використання.

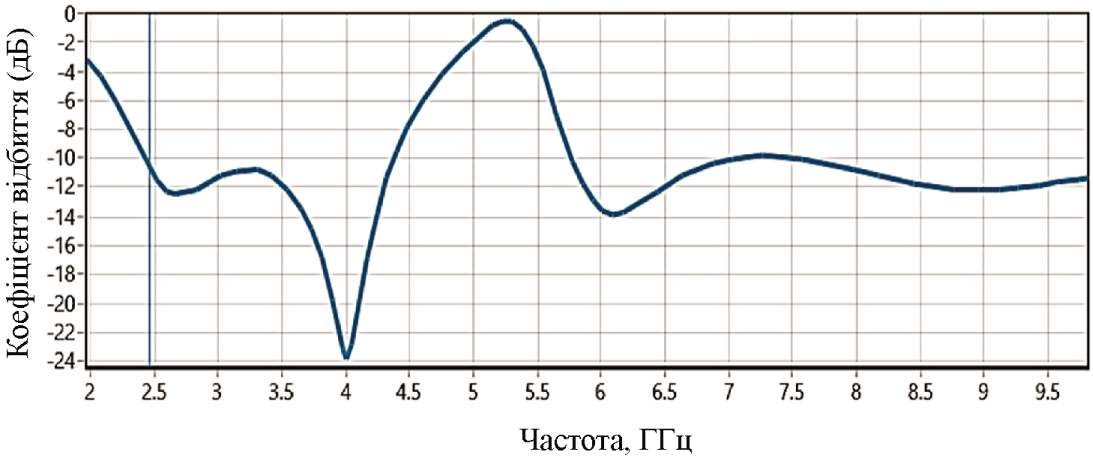


Рисунок 4.5 – Коефіцієнт відбиття монополя смуги вирізу

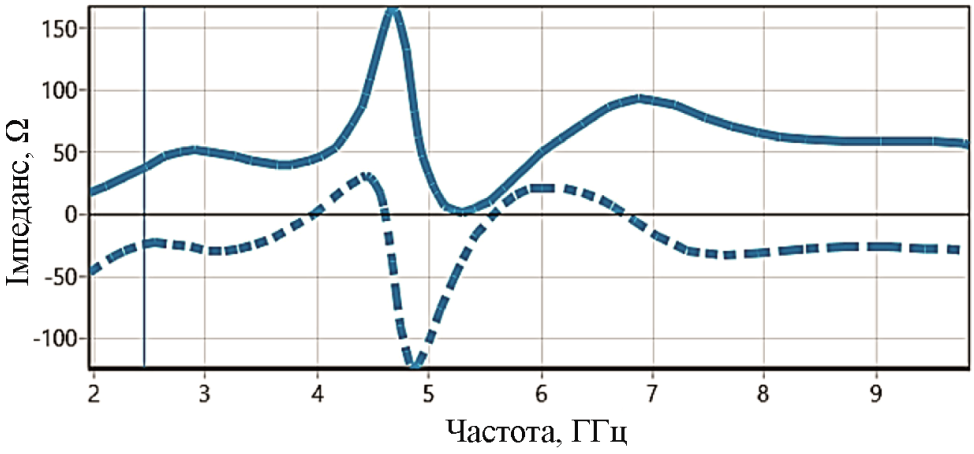


Рисунок 4.6–Діаграма імпедансу з частотою в ГГц

На рисунку 4.6 наведено графік коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) – відношення напруги стоячої хвилі до напруги подання – змодельоване за допомогою програмного забезпечення для електромагнітного моделювання та

результати вимірювання КСХ, проведені за допомогою аналізатора комбінованого пристрою Anritsu. Ідеальне узгодження зображено у вигляді співвідношення 2:1 в робочій області, яке відображає ідеальну узгодженість антени з джерелом подачі та добре корелює з результатами симуляцій. Пунктирна лінія представляє імпеданс холостого ходу для порівняння, тоді як суцільна лінія показує вихідний результат, отриманий з запропонованого методу. Ці результати вказують на високу якість узгодження та ефективність антени в робочому діапазоні частот.

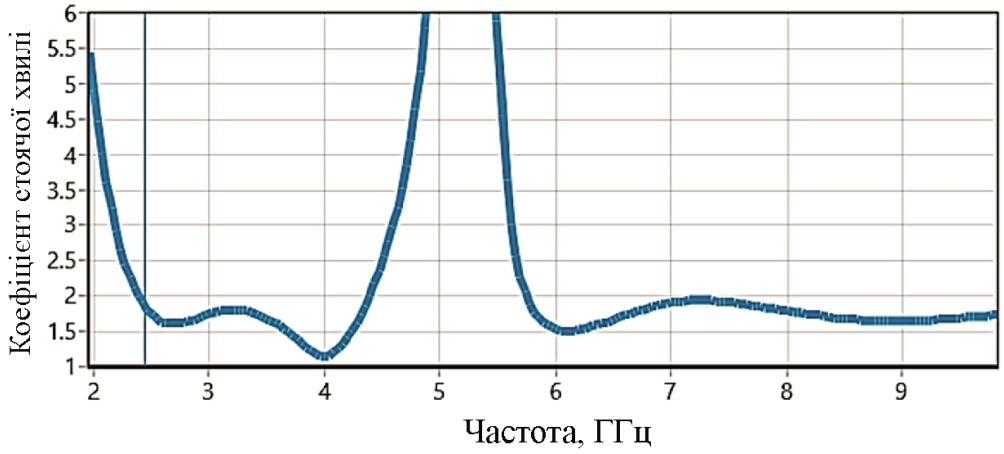


Рисунок 4.7 – Графік вимірювання значень КСХ

4.6.1 Пікове значення підсилення на різних частотах

Різні пікові значення підсилення на частоті 2,5 ГГц ілюструють різні рівні здатності антени фокусувати та випромінювати сигнали у цьому діапазоні частот. Пікове значення підсилення, виміряне в децибелах (дБі), є мірою, яка показує, наскільки ефективно антена концентрує енергію сигналу в певному напрямку на даній частоті. Антена з вищим піковим значенням підсилення на частоті 2,5 ГГц демонструє відмінну оптимізацію для цієї частоти та може

забезпечити покращене покриття та ефективне поширення сигналу в цьому діапазоні.

Суцільна лінія на рисунку 4.7 наочно показує варіації коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) на різних частотах. Це допомагає визначити, як антена реагує на різні частоти у своєму робочому діапазоні, а також вказує на те, які частоти можуть бути оптимальними для певних застосувань зв'язку.

На частоті 3,4 ГГц пікове підсилення антени складає [пікове значення підсилення] дБі. Це визначає здатність антени ефективно випромінювати та приймати сигнали в цьому конкретному діапазоні частот. Пікове значення посилення антени на 3,4 ГГц наочно відображає його ефективність у виробленні та передачі сигналів у цьому діапазоні.

Це значення підсилення свідчить про те, що антена оптимально підходить для роботи на частоті 3,4 ГГц, що робить її ідеальним вибором для застосувань, де потрібна надійна та ефективна комунікація в цьому діапазоні. Завдяки такому піковому підсиленню антена може забезпечувати надійне з'єднання та передавати дані з високою ефективністю на частоті 3,4 ГГц.

На частоті 5,8 ГГц пікове підсилення антени становить [пікове значення підсилення] дБі. Це важливий показник ефективності антени в роботі на цій конкретній частоті. Пікове значення посилення в 5,8 ГГц свідчить про високу продуктивність та здатність антени забезпечувати надійне та ефективне з'єднання в цьому діапазоні.

Високий рівень підсилення на частоті 5,8 ГГц підкреслює здатність антени оптимально працювати в цьому діапазоні і забезпечувати стабільну та швидку передачу даних. Це особливо важливо для бездротових систем, які використовують частоту 5,8 ГГц, таких як Wi-Fi мережі та інші пристрої з високою пропускною здатністю. Високе підсилення на цій частоті свідчить про

ефективність та надійність антени у забезпеченні безперервного зв'язку в цьому діапазоні частот.

Аналіз пікового реалізованого підсилення на різних частотах відображає широкий потенціал і високу ефективність розглянутої антени у вирішенні завдань обробки сигналів на різних частотах. Високе пікове підсилення на конкретних частотах підтверджує, що антена ефективно фокусує та випромінює сигнали у цих діапазонах, що є ключовим аспектом для багатьох бездротових систем.

Добре підібрана та оптимізована антена з високим піковим підсиленням на певних частотах має велике практичне значення для додатків, які працюють у цих діапазонах. Наприклад, у сучасних бездротових системах, таких як пристрої LTE, Wi-MAX, WLAN, а також системи ISM, які працюють у різних діапазонах частот, важливо мати антени, які забезпечують стабільні та ефективні зв'язки на всіх відповідних частотах.

Значення посилення на різних частотах свідчать про високу ефективність випромінювання антени та її здатність забезпечити надійне покриття та передачу сигналів у відповідних діапазонах частот. Високі коефіцієнти підсилення сприяють покращенню якості зв'язку та покриття шляхом ефективної передачі та прийому сигналів.

Враховуючи важливість технологій, таких як ISM, LTE, Wi-MAX, WLAN, у сучасних бездротових комунікаційних системах, важливо в анотації відобразити, як антена узгоджується з цими технологіями та як вона вирішує їх вимоги щодо зв'язку та передачі даних. Це допоможе краще розуміти важливість антени у сучасних комунікаційних системах та її внесок у їх ефективну роботу.

Аналіз випромінювання: на рисунку 4.8 представлені ключові параметри випромінювання антени у трьох різних робочих діапазонах, які були отримані за допомогою інструменту CST. Значення пікового посилення для антени

складають 2,4 дБ, 4,7 дБ та 5,1 дБ на частотах 2,5 ГГц, 3,4 ГГц та 4 ГГц відповідно.

Ці параметри випромінювання є ключовими для оцінки продуктивності та ефективності антени в різних частотних діапазонах. Значення пікового підсилення вказують на здатність антени концентрувати та випромінювати сигнали на певних частотах, що важливо для забезпечення надійного та ефективного зв'язку.

Зокрема, високе значення пікового підсилення на кожній з розглянутих частот свідчить про ефективність антени в тих самих діапазонах. Це важливо для забезпечення стабільного зв'язку та передачі сигналів у відповідних частотних діапазонах, що допомагає покращити продуктивність і надійність бездротових комунікаційних систем.

Отже, аналіз параметрів випромінювання антени дозволяє зробити висновок про її ефективність та придатність для використання у відповідних діапазонах частот, що сприяє покращенню якості та надійності бездротових зв’язків.

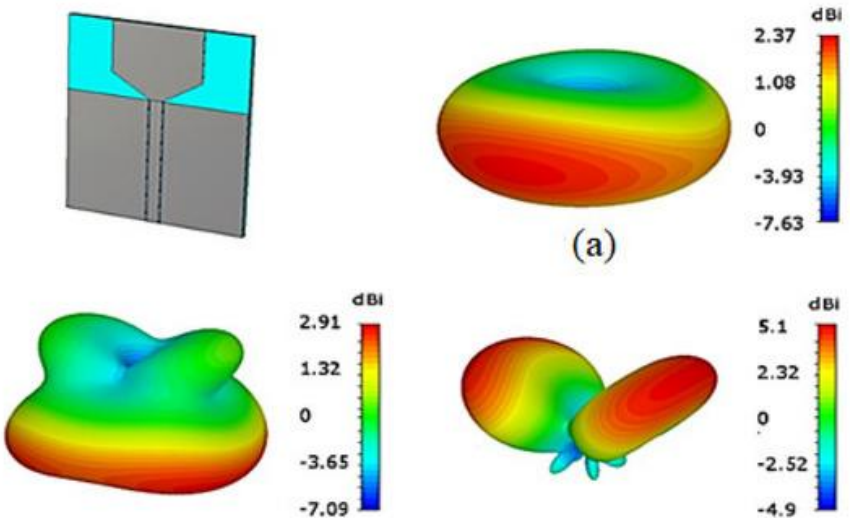


Рисунок 4.8 – Тривимірне випромінювання антени з вирізом у трьох діапазонах: а) – 2,5 ГГц, б) – 3,4 ГГц, в) – 4 ГГц

На рисунках 4.9, 4.10, 4.11 наведені характеристики радіоактивності запропонованої моделі в трьох різних робочих групах, які були зібрані за допомогою інструменту Antenna Magus. Антена виявила підсилення на рівні 2,4 дБ, 3,5 дБ та 4,7 дБ на частотах 2,5 ГГц, 2,8 ГГц та 3,4 ГГц відповідно. У цьому аналізі представлені як полярні, так і тривимірні графіки для азимутального кута та кута місця.

Ці характеристики радіоактивності відображають розподіл сигналу, який випромінюється антеною в просторі. Полярні графіки дозволяють візуалізувати напрямленість сигналу в різних напрямках від антени, тоді як тривимірні графіки надають повний об'ємний образ цього розподілу сигналу.

Аналіз характеристик радіоактивності дозволяє оцінити ефективність та ефективність антени в різних напрямках і на різних частотах. Ця інформація важлива для розробки та впровадження бездротових систем зв'язку, оскільки допомагає вибрати найбільш підходящі антенні рішення для конкретних додатків та середовищ використання.

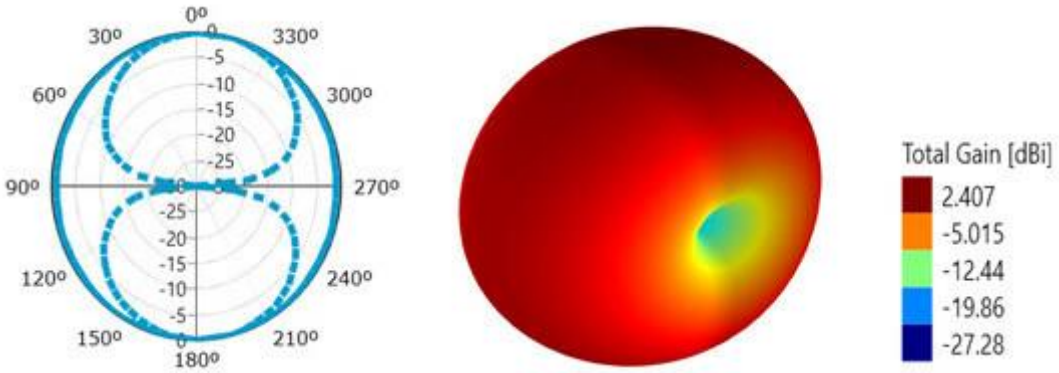


Рисунок 4.9 – Діапазон підсилення від 2,407 до -27,28 дБ для трапецієподібної монопольної антени з вирізом

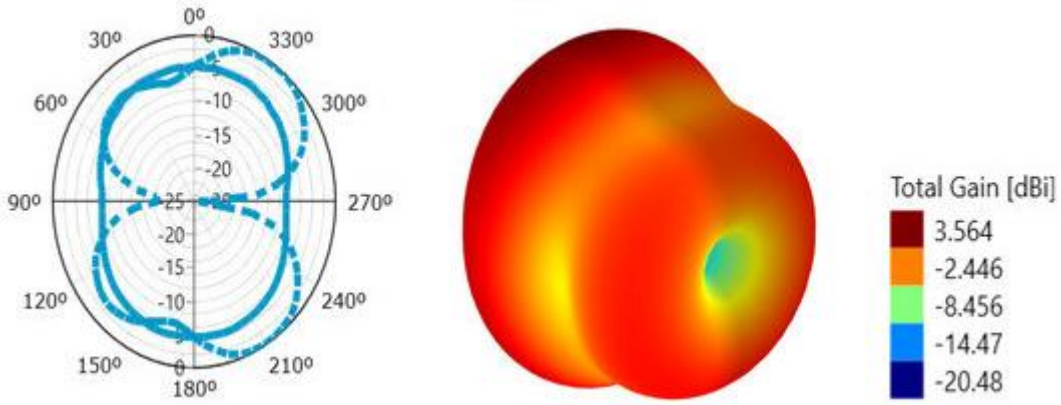


Рисунок 4.10 – Діапазон підсилення від 3,564 до -20,48 дБ для трапецієподібної монопольної антени з вирізом

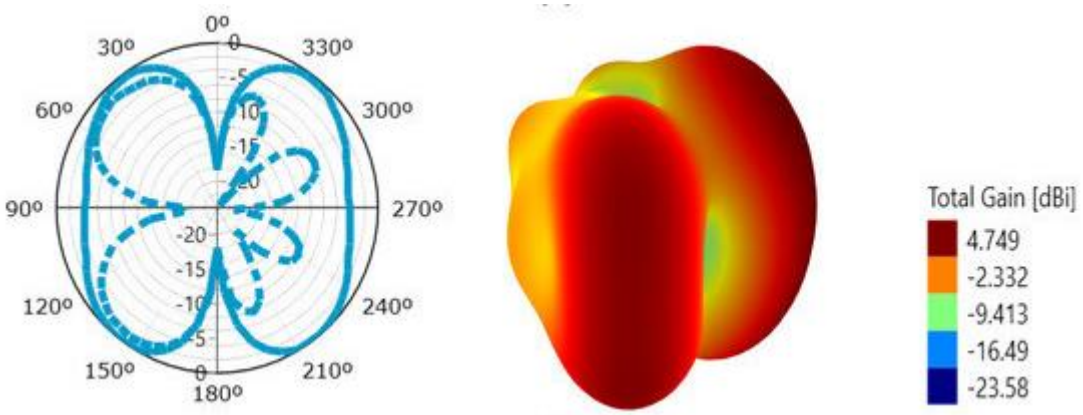


Рисунок 4.11 – Діапазон підсилення від 4,749 до -23,58 дБ для трапецієподібної монопольної антени з вирізом

4.6.2 Ефективність антени

Базовий розрахунок ефективності антени визначається шляхом порівняння випроміненої або отриманої потужності з вхідною потужністю. Формула ефективності антени визначається як відношення випроміненої потужності до вхідної потужності, помножене на 100%: ефективність (%) = (потужність

випромінювання / вхідна потужність) × 100%. Наприклад, якщо антена випромінює 80% від вхідної потужності, її ефективність складатиме 80%.

Ефективність антени має прямий вплив на продуктивність та споживання енергії в реальних застосуваннях. Високоефективні антени забезпечують кращу якість сигналу, покращуючи радіус дії та надійність зв'язку. Знижене споживання енергії робить їх підходящими для пристроїв, які працюють від батарейок, економлячи електроенергію та забезпечуючи довший час автономної роботи.

Економічна ефективність високоефективних антен полягає в максимізації вхідної потужності, що може усунути необхідність у додатковому підсиленні чи обробці сигналу. Відсоток ефективності відображає, наскільки успішно антена перетворює електричну енергію в електромагнітні хвилі, і може бути корисним для розробки програм та покращення їх продуктивності.

4.6.3 Використання трапецієподібної форми в конструкції монопольної антени

Трапецієподібна монопольна антена володіє широкою смугою пропускання, що становить одну з її ключових переваг. Розглянемо детальніше основні переваги цієї конструкції:

1. Форма: трапецієподібна форма антени створює численні резонансні частоти, що дозволяє знизити частотну чутливість та забезпечити ефективність у широкосмуговому зв'язку. Це особливо корисно для бездротових застосувань, які використовують різні частотні діапазони.

2. Компактність: завдяки своїй формі, трапецієподібні антени можуть бути легко вбудовані у портативні пристрої, датчики Інтернету речей та інші малогабаритні пристрої. Поступове звуження від широкої основи до вершини дозволяє зберегти високу ефективність випромінювання.

3. Покращені характеристики випромінювання: трапецієподібна форма сприяє підвищенню ефективності випромінювання антени. Ця конструкція зменшує випромінювання у задній частині та збільшує посилення вперед, що корисно для управління напрямком випромінювання та забезпечення оптимального покриття.

4. Механічна стійкість: трапецієподібні антени є більш міцними порівняно з вертикальними монополями, оскільки вони мають більшу структурну опору через свою широку основу. Це дозволяє зменшити вплив зовнішніх факторів, таких як вібрації та удари, на антену.

Отримані результати моделювання за допомогою аналізу методом скінченних різниць в часовій області (FDTD) підтверджують ефективність трапецієподібних антен. Дані про прототип антени, отримані під час випробувань в камері та практичних сценаріях використання, підтверджують їх ефективність та придатність для застосувань у широкому діапазоні ситуацій.

4.9 Висновок до четвертого розділу

У цьому розділі було розглянуто та проаналізовано проектування моделі монополя трапецієподібної смуги вирізу. Розроблена антена працює успішно у двох робочих діапазонах, охоплюючи широкий спектр частот від 4,4 до 5,7 ГГц із смугою пропускання 1,3 ГГц. Вона відзначається оптимальними параметрами імпедансу та високими значеннями імпедансу в діапазоні режекторів. Характеристики випромінювання були проаналізовані за допомогою програм CST і Antenna Magus, а отримані результати добре відповідають даним вимірювань параметрів. Максимальне значення посилення антени складає 5,1 дБ у робочій смузі з високою діаграмою спрямованості.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі детально досліджено та проаналізовано трапецієподібні дводіапазонні монопольні антени, які відіграють ключову роль у сучасних бездротових комунікаційних системах. Ці антени набувають все більшої популярності завдяки їхній здатності оптимізувати функціональність бездротових систем для відповідності різним вимогам та діапазонам частот.

Основна мета дослідження полягала в розробці та оптимізації трапецієподібних антен для підвищення ефективності та стабільності бездротових зв'язків. Зокрема, були розглянуті антени, здатні оптимально працювати в двох різних діапазонах частот: від 2,5 до 4,4 ГГц і від 5,7 до 7 ГГц. Це охоплює популярні діапазони частот, що використовуються у сучасних телекомунікаційних системах, таких як GSM, LTE, Wi-Fi та 5G.

Особлива увага приділялася характеристикам імпедансу, які були оптимізовані для досягнення найкращих показників на робочих частотах, що сприяє зменшенню втрат сигналу і підвищенню надійності зв'язку. Аналіз випромінювання проводився за допомогою сучасних програмних засобів CST і Antenna Magus, що дозволило отримати детальні дані про діаграму спрямованості та ефективність антен у різних умовах.

Результати дослідження підкреслюють успішність розроблених трапецієподібних антен у виконанні їхніх основних функцій у різних частотних діапазонах. Вони виявляються ефективними та надійними рішеннями для покращення бездротових комунікаційних систем, забезпечуючи високу швидкість передачі даних та стабільний зв'язок навіть в умовах інтенсивного використання.

Подальші можливості розвитку включають подальше вдосконалення геометрії антен для досягнення ще кращих характеристик у різних діапазонах частот, а також використання отриманих даних для розробки нових інноваційних рішень у галузі бездротових технологій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола: навч. посібник / В.С. Маляр. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 312 с.

2. Silva Junior, P. F. et al. Flexible wearable pre-fractal antennas for personal high-temperature monitoring. Wirel. Pers. Commun. 114, 2020. – 1983–1998.

3. Honda, S., Ito M., Seki H., and Jingo Y., "A Disc Monopole Antenna with 1:8 Impedance Bandwidth and Omnidirectional Radiation Pattern," Proc. ISAP, Sapporo, Japan, 1992, pp. 1145-1148.

4. Hammoud, Poey P., and Colomel F., "Matching the Input Impedance of a Broadband Disc Monopole, " Electronics Letters, Vol. 29, Feb. 1993, pp. 406-407.

5. Agarwall, N. P., Kumar G., and Ray K. P., "Wide-Band Planar Monopole Antennas," IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol. 46, No. 2, 1998, pp. 294-295.

6. Ray, K. P., Anob P. V., Kapur R., and Kumar G., "Broadband Planar Rectangular Monopole Antennas," Microwave Optical Tech. Letters, Vol. 28, No. 1, 2001, pp. 55-59.

7. Ballantine, S., "High Quality Radio Broadcast Transmission and Reception", Proc. IRE, Vol. 22, No. 5, 1935, pp. 564-629.

8. Chang, D. C., Harrison C. W. Jr., and Aroson E. A., "Tubular Monopole of Arbitrary Dimensions: The Radiation Field," IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol. 17, May 1969, pp. 534-540.

9. Naffall Herscovici and Christos Christodouloc , "Wideband monopole antennas for multi-band wireless systems" IEEE Antennas and Propagation Magazine , Vol. 45, No.2, April 2003.

10. Mahnashi, Y.; Peng, F.Z. Generalization of the Fundamental Limit Theory in a Switched-Capacitor Converter. IEEE Trans Power Electron. 2017, 32, 6673–6676.

11. Jen-Yea Jan and Liang-Chih Tseng "Planar Monopole Antennas for 2.45/5.2 GHz Dual Band Application

12. Aaron Kerkhoff and Hao Ling "Design of a Planar Monopole Antenna for use with Ultra Wide Band having Band Notched Characteristics" 0-7803-7846-6/03/$17.00© 2003 IEEE.

13. Alam, T. et al. Metamaterial array based meander line planar antenna for cube satellite communication. Sci. Rep., 2021.

14. M J Ammann and Zhi Ning Chen " A Wide–Band Shorted Planar Monopole with Bevel" Zhi Chen and M.Y.W.Chia, "Impedance Characteristics of Triangular Planar Monopole," ELECTRONICS LETTERS 11th October 2001 Vol.37 No.21.

15. Zhi Ning hen, "Experiments on input impedance of tilted planar monopole antenna," Microwave and optical technology letters 26 (2000) , 202-203.

16. Z.N.Chen, M.J.Amman, M.Y.W.Chia and T.S.P.See, "Annular Planar Monopole Antennas"IEE Proc-Microw, Antenna Propag, Vol, 149,No. 4, August 2002.

17. E.Lee, P.S.Hall and P.Gardner, "Compact wideband planar monopole antenna,"Electronics Letters35, 1999, 2157-2159.

18. Silva Junior, P. F. et al. Compact bioinspired antenna for WLAN 5 GHz application. Wirel. Pers. Commun. 119, 329–341. (2021).

19. Malhat, H. A. et al. Circularly/linearly polarized low-profile plasma microstrip antenna for MIMO applications. Wirel. Pers. Commun. 124, 2022, 1977–1992.

20. Silva Junior, P. F., Silva, P. H. F., Serres, A. J. R., Silva, J. C. & Freire, R. C. S. Bio-inspired design of directional leaf-shaped printed monopole antennas for 4G 700 MHz band. Microw. Opt. Technol. Lett. 58, 2016, – 1529–1533.

21. Silva, P. F., Freire, R. C. S., Serres, A. J. R., Silva, P. H. F. & Silva, J. C. Wearable textile bioinspired antenna for 2G, 3G, and 4G systems. Microw. Opt. Technol. Lett. 58, 2016, – 2818–2823.

22. Xavier, G. V. R. et al. Design and application of a metamaterial superstrate on a bio-inspired antenna for partial discharge detection through dielectric windows. Sensors, – 2019.

23. Azim, R. et al. An octa-band planar monopole antenna for portable communication devices. Sci. Rep., 2021.

24. Alam, M. M. et al. A dual-band CPW-fed miniature planar antenna for S-, C-, WiMAX, WLAN, UWB, and X-band applications.Sci. Rep, – 2022

25. Golezani, J. J., Abbak, M. & Akduman, I. Modified directional wide band printed monopole antenna for use in radar and microwave imaging applications. Prog. Electromagn. Res. Lett. 33, 119–129. – 2012.

26. Silva Junior, P. F., Serres, A. J. R., Freire, R. C. S., Serres, G. K. F., Gurjao, E. C., Carvalho, J. N., Santana, E. E. C. Bio-inspired wearable antennas. In Wearable Technologies. 1 ed. 219–237, – InTech, 2018.

27. Gielis, J. A generic geometric transformation that unifies a wide range of natural and abstract shapes. Am. J. Bot. 90, 2003, –333–338.

28. Amerongen, H. & Croce, R. Light harvesting in photosystem II. Photosynth Res. 116, 251–263, – 2013.

29. Lokstein, H., Gernot, R. & Gotze, J. P. Photosynthetic light-harvesting (antenna) complexes—Structures and functions. Molecules 26, 1–24, 2021.

30. Silva Junior, P. F., Pinto, M. S. S., Santana, E. E. C., Silva, P. H. F. et al. Fractal and polar microstrip antennas and arrays for wireless communications. In Wireless Mesh Networks-Security, Architectures and Protocols (ed. Mutamed, K.) 2019, – 87–107.

31. Oliveira, A. C. et al. Application of bioinspired antennas in the monitoring of high voltage circuit breakers. IEEE Trans. Power Deliv, – 2022.

32. Haraz, O. & Sebak, A. R. Numerical and experimental investigation of a novel ultra-wideband butterfly shaped printed monopole antenna with bandstop function. Prog. Electromagn. Res. C. 18, 111–121. – 2011.

33. Bao, L. X. & Ammann, M. J. Investigation on UWB printed monopole antenna with rectangular slitted ground plane. Microw. Opt.Technol. Lett. 49, 1578–1585, – 2007.

34. Silva Junior, P. F., Silva, P. H. F., Silva, J. C., Santos, A. F., Frazao, M. C. L. M., Serres, A. J. R., Freire, R. C. S. Influence of conductor tube in circular PMA for UWB range. In 2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference 1-4, – 2015.

35. Liu, W.C.; Ye, Z.; Pilawa-Podgurski, R.C.N. Comparative Analysis on Minimum Output Impedance of Fixed-Ratio Hybrid Switched Capacitor Converters. In of the IEEE COMPEL, Toronto, ON, Canada, 17–20 June 2019; pp. 1–7.

36. Lin, Y.-C.; Liaw, D.-C. Parametric Study of a Resonant Switched Capacitor DC-DC Converter. In Proceedings of the IEEE TENCON, Singapore, 19–22 August 2001; pp. 710–716.

37. Qiu, D.; Zhang, B.; Zheng, C. Duty Ratio Control of Resonant Switched Capacitor DC-DC Converter. In Proceedings of the IEEE ICEMS, Nanjing, China, 27–29 September 2005; pp. 1138–1141.

38. Zhang, K., Wang, Y., Burokur, S. N. & Wu, Q. Generating dual-polarized vortex beam by detour phase: From phase gradient metasurfaces to metagratings. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 70, – 2022. – 200–209. ().

39. Ge, T.; Miao, Z.; Liu, L. Active Cross-Commutated (ACC) Buck Converter. IEEE Trans. Ind. Electron. 2022, 69, 2577–2587.

40. Yau, Y.T.; Jiang, W.Z.; Hwu, K.I. Bidirectional Operation of High Step-Down Converter. IEEE Trans. Power Electron. 2015, 30, 6829–6844.

ДОДАТОК А
Презентаційні матеріали

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Кваліфікаційна робота

ОДНОПОЛЯРНА АНТЕНА

для бездротових технологій

Виконав:
здобувач 3 курсу, група ТР1с-21-1
Віктор ЯРОВЕНКО

Науковий керівник:
асистент
Віталій НОРИК

ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕННЯ ОБҐРУНТУВАННЯ

Мета робота

є оптимізація антени для покращення функціональності багатодіапазонних бездротових систем зв’язку, особливо для GSM, LTE, Wi-Fi та 5G

Об’єкт дослідження

є трапецієподібна монопольна антена, яка працює в діапазонах 2,5-4,4 ГГц та 5,7-7 ГГц

Актуальність теми

Потреба в багатодіапазонних антенах:
сучасні бездротові системи зв’язку потребують антен, які можуть працювати в широкому спектрі частот від GSM до 5G.

Компактність та надійність:
використання трапецієподібної дводіапазонної антени дозволяє уникнути додаткових антен та перемикачів, що робить системи зв’язку компактнішими та надійнішими.

Оптимізація продуктивності:
оптимізація конструкції антени покращують її продуктивність, що є критичним для забезпечення високої якості зв’язку в сучасних технологіях.

ЗНАЧУЩІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБҐРУНТУВАННЯ

Сучасні потреби:
- Бездротові комунікації є ключовими для повсякденного життя і технологічного розвитку.

Ефективність антен:
- Необхідні для забезпечення надійного та швидкого зв'язку.

Тип антени:
Трапецієподібна дводіапазонна монопольна антена

Робочі діапазони:
- 2,5-4,4 ГГц
- 5,7-7 ГГц

ЧОМУ ЦЕ ВАЖЛИВО?

Сучасні застосування:
- Підходить для систем, що працюють на різних частотах (GSM, LTE, Wi-Fi, 5G).

Компактність та надійність:
- Антена є компактною і надійною.

Широкосмугова функціональність:
- Дозволяє уникнути використання додаткових антен і перемикачів.

ВАЖЛИВІСТЬ У РОЗРОБЦІ ТРАПЕЦІЄПОДІБНИХ АНТЕН

Розробка трапецієподібного монополю з розмірами 31× 42×1,6 мм та використання компланарного хвилеводного живлення з опором 50 Ом

складна задача

Підходи у розробці:

Обмеження частотних діапазонів:
- Необхідність створення багатодіапазонних або реконфігурованих антен для роботи на багатьох частотах.

Малий форм-фактор:
- Використання меандрових структур або метаматеріалів для мінімізації розмірів антени без втрати продуктивності.

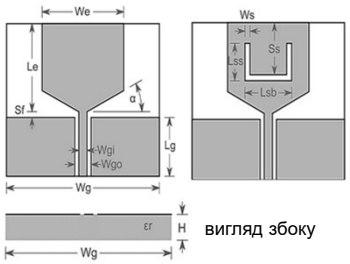
Складність форми:
- Значні обчислювальні ресурси для моделювання антен зі складною геометрією, застосування методів скінченних елементів (FEA) або методів моментів (MoM).

РОЗРОБЛЕНО ДЕКІЛЬКА ТИПІВ АНТЕН ДЛЯ РІЗНИХ ЦІЛЕЙ:

- **Трапецієподібна антена S-діапазону** для блокування S-діапазону і пропускання L-діапазону.
- **V-подібна антена** на основі метаматеріалів.
- **Широкосмугова антена** з розділенням діапазонів.
- **Антена з виїмкою** на основі PIN-діода для блокування WLAN/IEEE-802

ДОСЛІДЖЕННЯ трапецієподібної антени

Антена з апецієподібною монопольною структурою



Трапецієподібна монопольна антена з U-подібним вирізом

вигляд збоку

Рис. 1 – Трапецієподібна монопольна антена

$$h > 0.06\ \lambda_g \qquad (1)$$

де λ_g – спрямована довжина хвилі

Тип живлення:
копланарне хвилеводне живлення

Опір хвилеводу: 50 Ом

Зазор: 0,2 мм

U-подібний виріз: допомагає досягти потрібного параметра смуги надрізу

Діапазон роботи: 4,4 - 5,7 ГГц

Ширина смуги пропускання: 1,3 ГГц

Табл. 1 – Розмірні характеристики

	Опис	Значення
Le	Довжина монопольного елемента	15,76 мм
we	Ширина монопольного елемента	15,76 мм
α	Кут конусності біля основи монополя	35,64 θ
Sf	Розрив подачі	64,53 мкм
Wg	Ширина землення	31,52 мм
Lg	Довжина землення	25,21 мм
X	Висота підкладки	975,6 мкм

АНАЛІТИЧНИЙ ВИВІД характеристик монополя

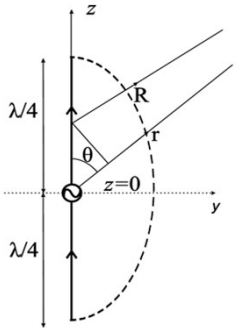


Рис. 2 – Аналіз монопольної антени з синусоїдальним розподілом струму

(1) • Розподіл струму вертикальних елементів $\widetilde{I} = I_0 \cos(\beta z)$

де I_0 – максимальне значення струму $\beta = 2\pi / \lambda$

(2) • Векторний магнітний потенціал $\vec{A}_z = \frac{I_0 \mu}{4\pi} \int_{z=-\lambda/4}^{\lambda/4} \frac{\cos \beta z}{R} e^{-j\beta R} dz$

(3) • Напруженість магнітного поля в зоні випромінювання $\vec{H} = \frac{j\beta}{\mu} \sin\theta \vec{A}_z \hat{a}_\varphi$

(4) • Напруженість електричного поля $\vec{E} = \eta \vec{H} \hat{a}_\theta$

(5) • Вираз для середньої випромінюваної потужності на одиницю площі антени $\langle \vec{S} \rangle = \frac{\eta I_0^2}{8\pi^2 r^2} \sin^3\theta \qquad 0 \le \theta \le \pi$

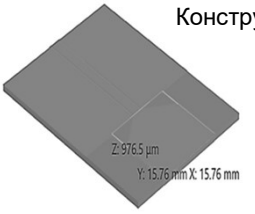
(6) • Загальна потужність, випромінювана монополем $P = \frac{3\eta I_0^2}{64}$

(7) • Опір для монополя $R = \frac{3\eta}{32}$

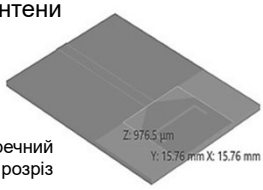
(8) • Спрямованість монополя $D = \frac{32}{3\pi} = 3.39 \approx 5.31 dB$

ОГЛЯД СТРУКТУРИ трапецієподібної антени

Конструкція антени



поперечний розріз



Діаграма імпедансу Сміта

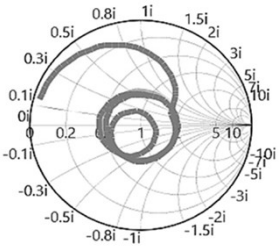


Рис. 3 – Монопольна антена смугового типу

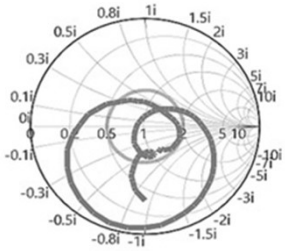


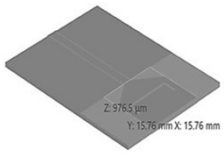
Рис. 4 – Монопольна антена смугового типу з вирізом

Діаграма імпедансу Сміта вказує на значення імпедансу антени при різних частотах

- Відображено значення імпедансу антени при різних частотах.
- Значення імпедансу 50 Ом досягається на резонансних частотах, що важливо для ефективної передачі сигналу.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ коефіцієнт відбиття

- Показує резонанс антени у двох діапазонах частот: 2,5 - 4,4 ГГц та 5,7 - 7 ГГц.
- Чітка порізка на частотах від 4,4 до 5,7 ГГц з смугою пропускання 1300 МГц, що підкреслює високу ефективність антени в цих діапазонах.



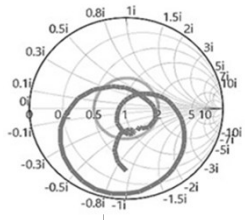


Рис. 4 – Монопольна антена смугового типу з вирізом

Робочий діапазон антени:

- Від 2,5 до 4,4 ГГц: смуга пропускання 500 МГц.
- Від 5,7 до 7 ГГц: смуга пропускання 1000 МГц.

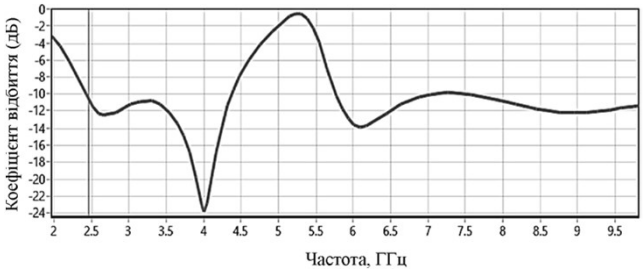


Рис. 5 – Коефіцієнт відбиття S-параметрів монополя

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ діаграми імпедансу

Пікове значення підсилення на частоті 2,5 ГГц: Високе пікове значення підсилення свідчить про оптимальну ефективність антени на цій частоті

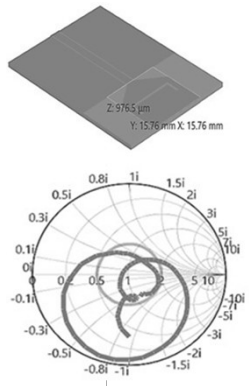


Рис. 4 – Монопольна антена смугового типу з вирізом

Значення імпедансу проектуються на високому рівні в смузі вирізу, що свідчить про відповідність антени вимогам імпедансу та її ефективність у відповідному діапазоні частот

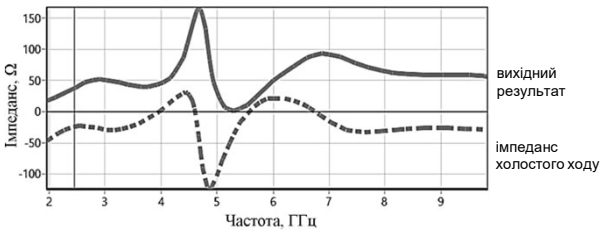


Рис. 6 – Графік імпедансу моделі антени

Характеристики та робочий діапазон розробленої антени забезпечить оптимальну ефективність антени у реальних умовах використання

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ коефіцієнта стоячої хвилі

КСХ це відношення амплітуди напруги стоячої хвилі до амплітуди напруги подання в електричній системі.

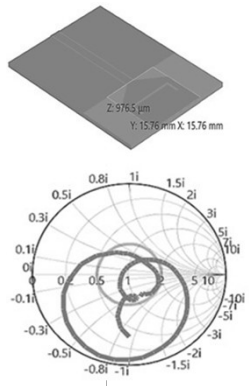


Рис. 4 – Монопольна антена смугового типу з вирізом

Пікове значення підсилення на частоті 2,5 ГГц: Високе пікове значення підсилення свідчить про оптимальну ефективність антени на цій частоті
Пікове підсилення на 3,4 ГГц: Пікове значення підсилення на цій частоті демонструє ефективність антени в роботі на 3,4 ГГц.
Пікове підсилення на 5,8 ГГц: Високий рівень підсилення на цій частоті свідчить про ефективність антени у забезпеченні надійного з'єднання на 5,8 ГГц.

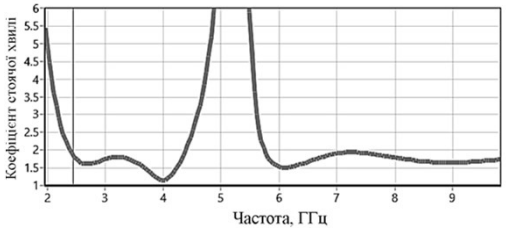
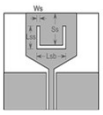


Рис. 7 – Графік коефіцієнта стоячої хвилі

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ
Аналіз випромінювання



Значення пікового підсилення:

- 2,4 дБ на частоті 2,5 ГГц.
- 4,7 дБ на частоті 3,4 ГГц.
- 5,1 дБ на частоті 4 ГГц.

Високі значення свідчать про ефективність антени в відповідних діапазонах

Застосування:

- Забезпечення стабільного зв'язку та передачі сигналів у відповідних частотних діапазонах.
- Покращення продуктивності та надійності бездротових комунікаційних систем.

Аналіз параметрів випромінювання антени підтверджує її ефективність та придатність для використання у відповідних діапазонах частот, що сприяє покращенню якості та надійності бездротових зв’язків.

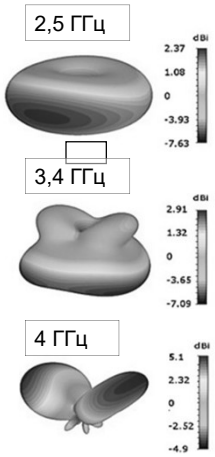
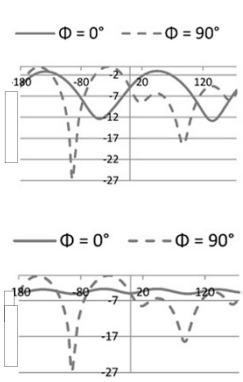


Рис. 8 – 3D випромінювання антени з вирізом у трьох діапазонах

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ
характеристики діаграми спрямованості антени в різних робочих діапазона

ДІАГРАМА СПРЯМОВАНОСТІ АНТЕНИ

– це залежність випромінюваної потужності в простір як функції кутових координат.



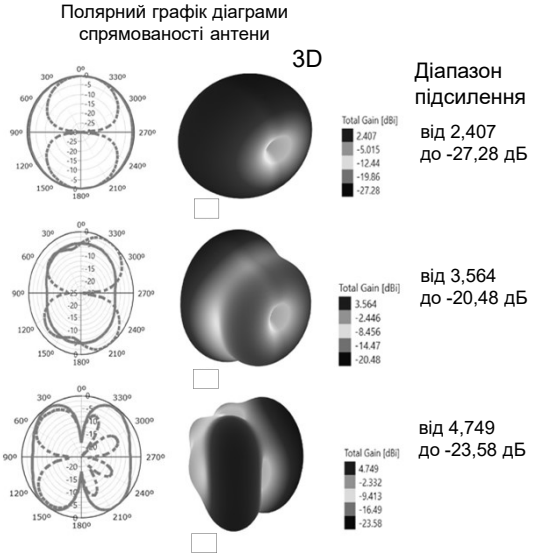
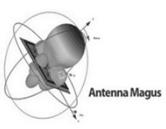


Рис. 9 – Трапецієподібна монопольна антена



ОСНОВНІ ПЕРЕВАГИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАПЕЦІЄПОДІБНОЇ МОНОПОЛЬНОЇ АНТЕНИ

Широка смуга пропускання
- Забезпечує численні резонансні частоти
- Знижує частотну чутливість
- Ефективна у широкосмуговому зв'язку

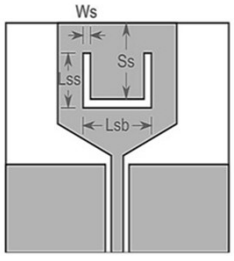
Компактність
- Легко вбудовується у портативні пристрої
- Підходить для датчиків Інтернету речей
- Висока ефективність випромінювання при малій габаритності

Покращені характеристики випромінювання
- Підвищена ефективність випромінювання
- Зменшення випромінювання у задній частині
- Збільшення посилення вперед

Механічна стійкість
- Більша структурна опора завдяки широкій основі
- Зменшення впливу вібрацій та ударів

Отримані результати моделювання за допомогою аналізу методом скінченних різниць в часовій області підтверджують ефективність трапецієподібних антен

ВИСНОВКИ



ПРОЕКЦІЯ МОДЕЛІ:

ТРАПЕЦІЄПОДІБНА МОНОПОЛЬНА АНТЕНА З ВИРІЗОМ

Практичне значення результатів:

Подальші дослідження:
- Основа для розробки нових моделей трапецієподібних антен.
- Застосування в різних галузях бездротових комунікацій.

Покращення бездротових систем:
- Телекомунікації.
- Інтернет речей (IoT).
- Медичне обладнання.
- Автономні системи.

Робочі діапазони:
- Два робочих діапазони: **4,4 - 5,7 ГГц**.
- Смуга пропускання: **1,3 ГГц**

Параметри імпедансу:
- Оптимальне значення: **50 Ом**.
- Високі значення імпедансу

Аналіз випромінювання:
- Проведено за допомогою CST і Antenna Magus.
- Макс. значення підсилення: **5,1 дБ.**
- Висока діаграма спрямованості.

МІНІСТЕРСТВО ОВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: *Яровенко Віктор Олександрович*
Тема роботи: *Однополярна антена для бездротових технологій*
Спеціальність *172 «Телекомунікації та радіотехніка»*

Обсяг кваліфікаційної роботи

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 68

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження *Метою кваліфікаційної роботи є дослідження, оптимізація та опис трапецієподібної дводіапазонної монопольної антени з метою покращення функціональності багатодіапазонних бездротових систем зв'язку, зокрема для ефективного використання діапазонів частот GSM, LTE, Wi-Fi та 5G. У даній кваліфікаційній роботі аналізується трапецієподібна дводіапазонна монопольна антена. Основний діапазон антени працює на частотах від 2,5 до 4,4 ГГц та від 5,7 до 7 ГГц. Досліджуються багатодіапазонні трапецієподібні антени, які покращують функціональність бездротових систем.*

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 проаналізовано сучасний стан розробки компактних антен, окреслено ключові проблеми та потреби систем ISM, Wi-Fi та бездротових мереж. У другому розділі розглянуто різні типи монопольних антен, їх конструктивні особливості та переваги, зосереджуючись на друкованих планарних антенах. У третьому розділі проведено статистичний аналіз характеристик різних форм монопольних антен та визначено їх вплив на робочі параметри. У четвертому розділі виконано моделювання та оптимізацію трапецієподібної монопольної антени, аналізуючи розподіл полів та визначаючи пікові значення підсилення та ефективність.*

4. Позитивні сторони роботи: *Робота досліджує сучасну та важливу тему, пов'язану з розвитком бездротових комунікаційних систем, що є критично важливим у сучасному світі. Висновки та рекомендації, отримані в результаті дослідження, можуть бути використані для подальшого вдосконалення*

антенних технологій та їх практичного застосування. Результати дослідження можуть бути безпосередньо застосовані для покращення функціональності бездротових систем зв'язку, що включають різноманітні застосування в телекомунікаціях, інтернеті речей, медичному обладнанні тощо.

5. Негативні сторони роботи: *Робота зосереджується на певних діапазонах частот, що може обмежити застосування результатів у інших діапазонах та контекстах. Необхідність подальших досліджень для підтвердження та розширення отриманих результатів, а також для розгляду нових аспектів і потенційних вдосконалень.*

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: *немає*

7. Відгук про роботу в цілому: *У кваліфікаційній роботі ретельно досліджено, проаналізовано та чітко сформульовано проекцію моделі трапецієподібної дводіапазонної монопольної антени. Розроблена модель антени продемонструвала успішну роботу в двох робочих діапазонах частот з оптимальними характеристиками імпедансу, ефективністю та посиленням. Використання сучасних методів моделювання та аналізу, а також застосування передових технологій у проектуванні антен, дозволило досягти високих результатів, що підкреслює ефективність та перспективність запропонованих рішень у сучасних бездротових комунікаційних системах.*

8. Інші зауваження: *немає*

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

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

«14» червня 2024р.

підпис

UNICHECK
by Turnitin

Ім'я користувача:
Кафедра АКІТіТК

ID перевірки:
1016372201

Дата перевірки:
18.06.2024 18:37:00 EEST

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
19.06.2024 01:43:38 EEST

ID користувача:
100005862

Назва документа: **Яровенко_антиплагіат**

Кількість сторінок: **75** Кількість слів: **11901** Кількість символів: **90043** Розмір файлу: **6.43 MB** ID файлу: **1016179471**

1141 слово позначене як "вилучене" та не враховується у підрахунку слів

0.74%
Схожість

Найбільша схожість: **0.34%** з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: **1016179467**)

0.45% Джерела з Інтернету	35	Сторінка 77
0.56% Джерела з Бібліотеки	14	Сторінка 77

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

0%
Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

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

Замінені символи	10

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 0.0%

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

	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
ID: 131436 Назва: БКР Однополярна антена для бездротових технологій Додано в БД: 2024-06-19 Автора: Віктор ЯРОВЕНКО Керівники: Віталій НОРИК Консультанти: Опоненти:	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	84099	650	469 (1%)	7 (1%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

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

Яровенко В.О.
ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи АКІТ-20-1

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

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:
Назва: Однополярна антена для бездротових технологій
Автор: Віктор ЯРОВЕНКО
Спеціальність: 172 – Телекомунікації та радіотехніка
Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології»
Науковий керівник: Віталій НОРИК
Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	**відповідає**
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. 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 й 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 загальновживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;
2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;
3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/ схожості, складає 0,74% і адресується до 52 джерел, що, з урахуванням наведених обгрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Завідувач кафедри _____ Валерій МАРТИНЮК
Гарант освітньої програми _____ Денис МАКАРИШКІН
Керівник кваліфікаційної роботи _____ Віталій НОРИК