

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

# ДИПЛОМНА РОБОТА

Другого (магістерського) рівня

Освітній рівень

ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 17 Електроніка та телекомунікації  
Шифр і назва галузі

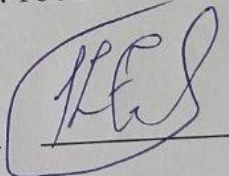
СПЕЦІАЛЬНІСТЬ 172 Телекомунікації та радіотехніка  
Шифр і назва спеціальності

ОСВІТНЯ ПРОГРАМА «Телекомунікації та радіотехніка»  
Назва освітньої програми

на тему «Метод конфігурації дипольної антени для бездротових систем»

ДРТР. 18622.05.07 ПЗ

Виконав:  
здубувач 2 курсу, група ТРМ-22-1

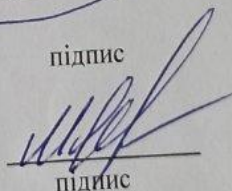


підпис

Євген КОЛОМІЄЦЬ

Ініціали, прізвище

Керівник: канд. техн. наук, доцент



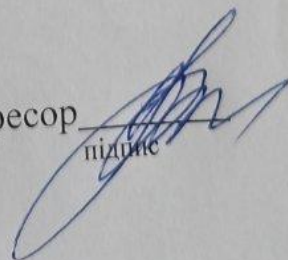
підпис

Віктор МІШАН

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

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



підпис

Сергій ПІДЧЕНКО

Ініціали, прізвище



11. 12. 2023р.

Хмельницький, 2023

Факультет «Інформаційних технологій»  
Кафедра «Телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій»  
Освітній рівень: Другий (магістерський)  
Галузь знань: 17 Електроніка та телекомунікації  
Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка  
Освітня програма: Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТМІТ

Сергій ПІДЧЕНКО

«01» 09 2023 р.

## ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

КОЛОМІЙЦЮ Євгену Ярославовичу

1 Тема роботи: «Метод конфігурації дипольної антени для бездротових систем»

керівник роботи: МІШАН Віктор Володимирович, канд. техн. наук, доцент

Затверджено наказом по університету від «15» серпня 2023 р. № 30

2 Строк подання здобувачем проєкту на кафедру 1.12.23р

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: аналіз та вдосконалення мініатюризованих друкованих антен типу LPDA для забезпечення їх високочастотної працездатності та компактності, що робить їх привабливими для високочастотних бездротових систем та інших застосувань.

Об'єкт дослідження: широкосмугова антена, призначена для застосувань у надширокосмугових системах зв'язку та визначення напрямку на широкому діапазоні частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц.

Предметом дослідження: проектування та оптимізація мініатюризованих друкованих LPDA-антен (логарифмічна періодична дипольна антена) з розширеною низькочастотною характеристикою для роботи в діапазоні частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1 Надширокосмугові антени для бездротових застосувань. 2 Методологія логперіодичних дипольних антен. 3 Методи мініатюризації для зменшення розміру друкованих логперіодичних дипольних антен. 4 Моделювання та реалізація широкосмугової друкованої логперіодичної дипольної антени

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

6 Консультанти розділів дипломної роботи

Розділ	Прізвища, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

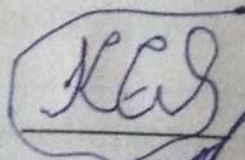
7 Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

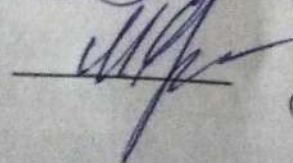
№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на дипломну роботу	07.09.2023р.	виконано
2.	Складання індивідуального плану на дипломну роботу	15.09.2023р.	виконано
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	20.10.2023р.	виконано
4.	Написання другого розділу	05.11.2023р.	виконано
5.	Написання третього розділу	20.11.2023р.	виконано
6.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до дипломну роботу	28.11.2023р.	виконано
7.	Формулювання висновків до роботи	30.11.2023р.	виконано
8.	Підготовка матеріалів для апробації	30.11.2023р.	виконано
9.	Оформлення пояснювальної записки до ДР	30.11.2023р.	виконано

Здобувач

Керівник роботи



Євген КОЛОМІЄЦЬ  
(підпис, дата)



Віктор МІШАН  
(підпис, дата)

## АНОТАЦІЯ

Тема дипломної роботи: «Метод конфігурації дипольної антени для бездротових систем»

Автор роботи: КОЛОМІЄЦЬ Євген Ярославович

Керівник роботи: канд. техн. наук, доц. МІШАН Віктор Володимирович.

Пояснювальна записка: 89 сторінок, 28 рисунків, 4 таблиць, 55 джерел.

Графічна частина: 15 презентаційних слайдів.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ДРУКОВАНІ ЛОГПЕРІОДИЧНІ ДИПОЛЬНІ АНТЕНИ; LPDA; ШИРОКОСМУГОВА АНТЕНА, ДІАГРАМА СПРЯМОВАНOSTІ, СМУГА ПРОПУСКАННЯ, КОЕФІЦІЄНТ ЕФЕКТИВНІСТЬ, КОЕФІЦІЄНТ ПІДСИЛЕННЯ.

*Метою дипломної роботи* аналіз та вдосконалення мініатюризованих друкованих антен типу LPDA для забезпечення їх високочастотної працездатності та компактності.

*Об'єктом дослідження* є ширококосмугова антена, призначена для застосувань у надширокосмугових системах зв'язку та визначення напрямку на широкому діапазоні частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц.

*Предметом дослідження* є проектування та оптимізація мініатюризованих друкованих LPDA-антен з розширеною низькочастотною характеристикою для роботи в діапазоні частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц.

У даній роботі проведено огляд різних методів мініатюризації друкованих логперіодичних дипольних антен з метою зменшення їхніх розмірів. По-перше, робота включає конструкцію звичайної друкованої логперіодичної дипольної антени, яка працює в широкому діапазоні частот від 0,7 ГГц до 8 ГГц і має прийнятний коефіцієнт підсилення в більшій частині своєї смуги пропускання. Ця антена служить базовою моделлю для подальших досліджень та оптимізації. У роботі також описано новий метод розширення низькочастотної характеристики цих антен, який полягає у заміні найдовшого прямого диполя на трикутну дипольну структуру та оптимізації чотирьох найдовших диполів. Як результат, отримана покращена антена спроможна працювати у діапазоні від 0,4 ГГц до 8 ГГц з деяким зниженням коефіцієнта підсилення на низьких частотах.

## ANNOTATION

Topic of the thesis: «The method of configuring a dipole antenna for wireless systems»

The author of the work: KOLOMYETS Evgeny.

Supervisor: Ph.D. technical of Science, Assoc. MISHAN Viktor V.

Explanatory note: 101 pages, 281 figures, 4 tables, 55 sources.

Graphic part: 15 presentation slides.

**KEY WORDS:** PRINTED LOG PERIODIC DIPOLE ANTENNAS; LPDA; WIDEBAND ANTENNA, DIRECTIVITY DIAGRAM, PASS BAND, EFFICIENCY COEFFICIENT, GAIN COEFFICIENT,

The aim of the thesis is to analyze and improve miniaturized LPDA type printed antennas to ensure their high-frequency performance and compactness.

The object of research is a broadband antenna designed for applications in ultra-wideband communication systems and direction determination in a wide range of frequencies from 0.4 GHz to 8.

The subject of research is the design and optimization of miniaturized printed LPDA antennas with extended low-frequency characteristics for operation in the frequency range from 0.4 GHz to 8 GHz.

In this work, an overview of various methods of miniaturization of printed log-periodic dipole antennas with the aim of reducing their size is carried out. First, the work involves the design of a conventional printed log-periodic dipole antenna that operates over a wide frequency range from 0.7 GHz to 8 GHz and has an acceptable gain over most of its bandwidth. This antenna serves as a baseline model for further research and optimization. The work also describes a new method of expanding the low-frequency characteristic of these antennas, which consists in replacing the longest direct dipole with a triangular dipole structure and optimizing the four longest dipoles. As a result, the resulting improved antenna is capable of operating in the 0.4 GHz to 8 GHz range with some reduction in gain at low frequencies.

## ЗМІСТ

С.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	8
ВСТУП .....	9
1 НАДШИРОКОСМУГОВІ АНТЕНИ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМ .....	14
1.1 Аналіз антен та їх еволюція .....	15
1.2 Надширокосмугова технологія .....	19
1.3 Конструкція надширокосмугових антен .....	22
1.3.1 Властивості UWB антени .....	22
1.3.2 Характеристики UWB антени .....	24
1.3.3 Частотно-незалежні антени .....	25
1.3.4 Багаторезонансні антени .....	27
1.3.5 Антени біжучої хвилі .....	27
1.3.6 Антени з малими елементами .....	28
1.4 Висновок до першого розділу .....	33
2 МЕТОДОЛОГІЯ ЛОГПЕРІОДИЧНИХ ДИПОЛЬНИХ АНТЕН .....	34
2.1 Типи та варіанти антен з логарифмічною періодичною структурою .....	35
2.2 Огляд логарифмічних періодичних антен та їх застосувань .....	38
2.3 Продуктивність логарифмічної антени на практиці .....	40
2.4 Застосування логарифмічних антен .....	40
2.5 Основні принципи логарифмічних антен .....	41
2.6 Еквівалентна схема вхідного опору UWB антени .....	44
2.7 Моделювання радіолінії UWB, включаючи антени .....	46
2.8 Висновок до другого розділу .....	48
3 МЕТОДИ МІНІАТЮРИЗАЦІЇ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ РОЗМІРУ ДРУКОВАНИХ ЛОГПЕРІОДИЧНИХ ДИПОЛЬНИХ АНТЕН .....	49
3.1 Метод верхнього навантаження .....	51
3.2 Фрактально-ітераційний метод .....	56

3.3	Метод відсіченого елемента .....	59
3.4	Метод використання рефлектора для підвищення коефіцієнта підсилення .....	61
3.5	Метод діелектричного навантаження .....	62
3.6	Диполь зі складеною плоскою спіраллю .....	64
3.7	Висновок до третього розділу .....	65
4	МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ШИРОКОСМУГОВОЇ ДРУКОВАНОЇ ЛОГПЕРІОДИЧНОЇ ДИПОЛЬНОЇ АНТЕНИ.....	66
4.1	Огляд моделювання надширокосмугових антен .....	66
4.2	Конструкція звичайної друкованої логперіодичної дипольної антени для діапазону частот від 0,7 ГГц до 8 ГГц.....	69
4.3	Конструкція друкованої логперіодичної дипольної антени з розширеною низькочастотною характеристикою для діапазону частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц .....	74
4.4	Висновок до четвертого розділу .....	80
	ВИСНОВКИ.....	81
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	83
	ДОДАТКИ.....	89

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

BW	–	Смуга пропускання
CDMA	–	Множинний доступ з кодовим поділом на кількох несучих
ECC	–	Envelope correlation coefficient
EIRP	–	Ефективна ізотропна потужність випромінювання
EMC	–	Електромагнітна сумісність
LPDA	–	Log Periodic Dipole Array Логарифмічний дипольний масив
LTI	–	Лінійним інваріантом у часі
MIMO	–	Multiple-input and multiple-output
OFDM	–	Ортогональне частотне розподіл
OOK	–	On-Off Keyin
RFIC	–	Радіочастотні інтегральні схеми
UWB	–	Антени зі широкосмуговою технологією
WLAN	–	Wireless local area network Бездротова локальна мережа

## ВСТУП

У наші дні із стрімким технологічним прогресом і безперервним розвитком бездротових технологій зростає попит на системи зв'язку та бездротові пристрої нового покоління. Цей прогрес стимулює розширення бездротового діапазону частот, що призначений для використання системами бездротового зв'язку. Однією із ключових характеристик таких систем є їх здатність працювати в надширокосмугових діапазонах частот, які охоплюють значний спектр від 3,1 ГГц до 10,6 ГГц. Для забезпечення ефективної роботи систем бездротового зв'язку в цих діапазонах частот потрібні антени з великою смугою пропускання та стабільною характеристикою діаграми спрямованості.

Зазвичай, однією з антенних конструкцій, яку розглядають для надширокосмугових застосувань, є монопольні антени. Вони мають потенціал для створення антен, які здатні передавати або приймати сигнали в широкому діапазоні частот. Однак багато монопольних антен не можуть забезпечити фіксовану діаграму спрямованості на всьому діапазоні частот, що робить їх менш придатними для деяких додаткових застосувань.

Поруч із монопольними антенами, антени типу Вівальді, відомі також як кінчні щілинні антени, розглядаються як ефективний варіант для надширокосмугових застосувань. Вони відзначаються стабільною діаграмою спрямованості у робочому діапазоні частот і здатністю ефективно випромінювати або приймати сигнали в напрямку кінцевої точки.

Проте, однією з обмежень антен типу Вівальді є їхні великі розміри, особливо при роботі на низьких частотах. Ця особливість може стати серйозним обмеженням у випадку застосувань, де обмежені просторові розміри є важливими факторами, такими як на борту безпілотних літальних апаратів чи стаціонарних систем відеоспостереження.

З метою розширення можливостей та поліпшення характеристик антен для надширокосмугових систем, дослідники вивчають різні типи антен, включаючи логарифмічні періодичні дипольні антени (LPDA). LPDA-антени привертають увагу завдяки своїй спрямованій характеристиці.

Отже, дана дипломна робота присвячена розробці, моделюванню та аналізу мініатюризованих друкованих LPDA-антен для роботи в надширокосмуговому діапазоні частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц. Головною метою цього дослідження є зменшення фізичних розмірів LPDA-антен, зберігаючи при цьому їхні низькочастотні та надширокосмугові характеристики.

В роботі проводиться огляд і аналіз різних методів мініатюризації антен, які раніше були запропоновані дослідниками. Крім того, пропонується нову конструкцію мініатюризованих LPDA-антен, які здатні працювати у вказаному надширокосмуговому діапазоні частот.

Враховуючи актуальність застосувань надширокосмугових антен у бездротових комунікаційних системах, промисловості, військовій сфері та багатьох інших областях, дослідження, проведене у цій дипломній роботі, може мати важливе практичне значення.

Завдяки комплексному підходу до проектування та аналізу мініатюризованих LPDA-антен, робота спрямована на створення антен, які будуть відповідати сучасним вимогам ефективної комунікації та забезпечувати низькочастотні та надширокосмугові характеристики.

Дана робота розглядається як важливий внесок у сферу антенної техніки та мініатюризації антен для надширокосмугових систем зв'язку та інших високотехнологічних застосувань.

*Актуальність роботи* полягає в необхідності розвитку та вдосконалення комунікаційних систем і бездротових технологій у сучасному світі. Зі зростанням попиту на бездротові пристрої та системи зв'язку нового покоління, виникає потреба у розробці антен, які б забезпечували надширокосмуговий діапазон частот та низькочастотні характеристики для

різноманітних застосувань, включаючи бездротову зв'язку, військові системи, системи визначення напрямку сигналу, промисловість та багато інших галузей.

Однак існуючі монопольні антени, які частково задовольняють вимоги до широкосмуговості, мають свої обмеження щодо фіксованої діаграми спрямованості на всьому діапазоні частот. Також, деякі альтернативні антени, наприклад, антени Вівальді, мають великі фізичні розміри, що ускладнює їхнє використання в обмежених просторах або на рухомих об'єктах, таких як безпілотники.

Тому актуальність цієї роботи полягає в пошуку та розробці мініатюризованих друкованих LPDA-антен, які здатні працювати в надширокосмуговому діапазоні частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц. Створення таких антен дозволить покращити якість та ефективність бездротового зв'язку, підвищити точність систем визначення напрямку сигналу, покращити функціональність військових та промислових систем, а також розширити можливості в галузі досліджень електромагнітної сумісності та радарів.

**Метою дипломної роботи є** розробка, аналіз та вдосконалення мініатюризованих друкованих антен типу LPDA для забезпечення їх високочастотної працездатності та компактності, що робить їх привабливими для високочастотних бездротових систем та інших застосувань.

Дослідження розглядає різні способи оптимізації антен та альтернативні методи для зменшення їх розмірів, зокрема використання друкованих антен, які є компактнішими та дешевшими у виготовленні.

Отже, метою дипломної роботи є створення компактних та ефективних друкованих LPDA-антен, які відповідають сучасним вимогам комунікаційних технологій та можуть знайти широке застосування в різних галузях.

**Метод дослідження,** використовуваний у даній роботі, базується на інтегрованому підході, що включає в себе теоретичні, моделювальні, експериментальні та обчислювальні методи.

На основі отриманих теоретичних знань розробляються математичні моделі проектуваної антени. Використовуються спеціалізовані програми для антенного моделювання та симуляції, які дозволяють прогнозувати характеристики антени, включаючи діаграму спрямованості, взаємодію з різними середовищами тощо. Цей інтегрований метод дослідження дозволяє забезпечити комплексний підхід до розробки та аналізу антени, забезпечуючи наукову обґрунтованість та практичну реалізацію роботи.

**Об'єктом дослідження** в даній дипломній роботі є ширококосмугова антена, призначена для застосувань у надширокосмугових системах зв'язку та визначення напрямку на широкому діапазоні частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц.

**Предметом дослідження** в даній дипломній роботі є проектування та оптимізація мініатюризованих друкованих LPDA-антен (логарифмічна періодична дипольна антена) з розширеною низькочастотною характеристикою для роботи в діапазоні частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц.

**Науковою новизною отриманих результатів є:** розробка нової конструкції мініатюризованої друкованої LPDA-антени, яка працює в діапазоні частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц. Ця конструкція враховує вимоги до мініатюризації антени та розширення низькочастотного діапазону.

Розробка та застосування методів мініатюризації, які дозволяють зменшити розміри LPDA-антени без втрати її ефективності. Дослідження та апробація отриманих антенних конструкцій з використанням розрахунків та симуляцій для підтвердження їх ефективності. Розширення можливостей використання LPDA-антен у безпілотниках, системах надширокосмугового зв'язку, визначення напрямку, а також в анекоїчних і ревербераційних камерах для вимірювань електромагнітної сумісності (EMC).

Визначення оптимальних параметрів антени для досягнення кращої продуктивності в робочому діапазоні частот. Підвищення технічних характеристик мініатюризованих LPDA-антен, зокрема, посилення, ширококосмуговості та спрямованості випромінювання. Використання

отриманих результатів для застосувань у сучасних бездротових системах та антенних технологіях.

Ці нові результати дозволяють розширити можливості використання LPDA-антен у різних галузях, де важлива мініатюризація антени та її здатність працювати в широкому діапазоні частот.

За темою дипломної роботи опублікована одна стаття у науковому журналі "Вісник Хмельницького національного університету" № 6 за 2023 р., серія "Технічні науки", який включено до наукометричних баз (Index Copernicus, Google Scholar)

## 1 НАДШИРОКОСМУГОВІ АНТЕНИ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМ

Широкосмугові антени широко використовуються в різноманітних системах бездротового зв'язку для промислового та військового застосування. Наприклад, використання техніки пеленгації у військових цілях вимагає від антени здатності визначати кут в азимутальній площині, з якого походить потрібний сигнал, і приймати сигнали в більш широкому діапазоні частот [1, 2]. Антени з такими характеристиками використовуються в різних цивільних програмах для визначення місцезнаходження джерел невідомих сигналів з метою відстеження та визначення місцезнаходження цілей.

Використання антени як джерела електромагнітних хвиль в ревербераційній камері для вимірювань в області електромагнітної сумісності (ЕМС) є предметом цікавості в цій комунікації.

Антени зі широкосмуговою технологією (UWB, ultra-wideband) викликають значний інтерес у сучасних дослідженнях, оскільки вони є важливою складовою бездротових систем зв'язку. Останнім часом технології UWB досліджуються для задоволення потреб у високій швидкості передачі даних, низьких витратах та невисокому споживанні енергії [1]. Планарні антени стають більш популярними для застосувань UWB після того, як Федеральна комісія зі зв'язку (FCC) виділила UWB неліцензований діапазон частот від 3,1 ГГц до 10,6 ГГц [2]. Для нових бездротових застосувань з широкосмуговою технологією використовуються друковані слот-антени та антени типу монополь через їх просту реалізацію, задовільну частотну відповідь та легку інтеграцію з іншими активними пристроями [3]. Антени UWB широко використовуються в радіолокації, ідентифікації радіочастот, громадській безпеці та позиціонуванні пристроїв. Деякі розумні застосування антен UWB включають автомобільні радарні системи, системи спостереження, програмовані радіоприймачі, аналіз спектру та ближні

снаряди [4]. Деякі проблеми досліджень у галузі антен UWB включають широкосмугову відповідність імпедансу, стійкість випромінювання, низький профіль, компактний розмір та доступну вартість [5].

В даний час існує підвищений інтерес до надширокосмугової технології для використання в кількох поточних і майбутніх програмах. Технологія UWB отримала значний поштовх, особливо в 2002 році, коли було дозволено використання неліцензованого діапазону частот, починаючи з 3,1 до 10,6 ГГц, для комерційних програм зв'язку [1]. Незважаючи на те, що існуюча технологія третього покоління (3G) у зв'язку може надавати нам багато широкосмугових послуг, таких як швидкий доступ до інтернету, відеотелефонія, покращене завантаження відео/музики, а також цифрові голосові послуги, UWB, як нова технологія, є дуже перспективною з багатьох причин. Виділена абсолютна смуга пропускання до 7,5 ГГц, що становить приблизно 110% часткової смуги пропускання центральної частоти. Цей широкий діапазон пропускну здатності доступний для високошвидкісного зв'язку, а також для роботи в радарах і програмах безпеки.

Технологія UWB має ще одну перевагу з точки зору енергоспоживання. Завдяки розподілу енергії UWB-сигналів у широкому діапазоні частот максимальна потужність, доступна для антени – як частини UWB-системи – буде лише 0,5 мВт відповідно до спектральної. Ця потужність вважається невеликою величиною, і вона насправді дуже близька до рівня шуму порівняно з тим, що зараз використовується в різних системах радіозв'язку [2].

### 1.1 Аналіз антен та їх еволюція

Антенна є важливою частиною будь-якої бездротової системи, оскільки це компонент, що забезпечує перехід між спрямованою хвилею та хвилею вільного простору. Згідно зі стандартними визначеннями термінів для антен

IEEE (IEEE, 1993), антена визначається як засіб для випромінювання або прийому радіохвиль. У період 1885-1900 років деякі піонери винайшли антени та бездротові системи. Дротові антени були урочисто відкриті в 1842 році винахідником телеграфу Джозефом Генрі, який також відкрив електромагнітні хвилі і навіть сформулював ідею, що світлові хвилі належать до цього типу. Приблизно через сорок років з'явилися антени та перші бездротові системи 1885 році Едісон запатентував систему зв'язку з використанням вертикальних, завантажених зверху та заземлених антен. У 1887 році Герц запустив, обробляв і приймав радіо, використовуючи збалансовану або дипольну антену як передавач і одновиткову петлю з іскровим розрядником як приймач. Винахід антени приписують Попову, який запропонував пристрій, здатний виявляти електромагнітні хвилі в атмосфері, і ввів концепцію антени в 1895 році. Початкові концепції фазових решіток були запропоновані в 1889 році. Кілька досягнень в області антен були запатентовані в 1897 році Лоджем і ці внески привели до узгодження, налаштування та додавання слова «імпеданс» до мови. Нарешті, першим найбільш значним застосуванням був телеграф Марконі, запатентований у 1900 році.

Через багато десятиліть після цих перших досліджень антена протягом багатьох років привертала багато уваги та залишалася предметом численних проблем. Незважаючи на те, що дипольні та рамкові антени все ще широко використовуються для різних радіосистем, антени зазнали значного розвитку як щодо їх топології, так і щодо використання. Дослідження антен зумовлені кількома факторами. Перший фактор пов'язаний зі збільшенням смуги пропускання і зміщенням робочої частоти в більш високі діапазони.

З постійно зростаючою потребою в мобільному зв'язку та появою багатьох систем стало важливим розробляти широкосмугові антени для покриття широкого діапазону частот. Сучасні бездротові програми вимагають

обробки все більшої кількості даних у різних формах, вищої швидкості передачі даних, більшої ємності та мультистандартних можливостей.

Існує багато добре відомих методів збільшення смуги пропускання антен, включаючи конструкції з логперіодичним профілем, топологією біжучої хвилі, збільшенням товщини підкладки та використанням підкладки з низьким діелектриком, різними методами узгодження імпедансу та живлення, кількома резонаторами та геометрія щілинної антени. Другий фактор стосується структури поля та способів його контролю. Одним із методів є використання безлічі ідентичних випромінюючих елементів для формування масиву. Елементарні антени живляться від одного джерела через мережу ліній передачі та/або хвилеводів. У таких системах форма діаграми спрямованості визначається діаграмою спрямованості елементарної антени (яка вибирається максимально простою), розподілом потужності між елементами та геометричними деталями їх розташування.

У літературі можна знайти багато прикладів. Навіть якщо решітки спочатку були розроблені для цілей високої потужності з використанням об'ємних антен, їх розвиток у планарній та інтегрованій формах із використанням мікросмужкових патчів є більш привабливим. Третій фактор стосується ізотропної поведінки, тобто здатності антен однаково випромінювати в усіх напрямках. Дійсно, у контексті бездротових сенсорних мереж, радіочастотної ідентифікації або зв'язку міліметрової довжини випадкова та змінна в часі орієнтація пристроїв відносно один одного викликає сильні варіації переданого сигналу через анізотропію випромінювання та невідповідність поляризації антен.

Спеціальні сенсорні мережі для систем захоплення руху людини на основі носимих датчиків, а також локалізація мобільних об'єктів є типовими майбутніми додатками, які вимагають досить постійної отриманої потужності незалежно від орієнтації пристроїв відносно один одного. Напрямки

відправлення та прибуття променя можуть повністю змінюватися під час використання та потрапляти в нульове випромінювання антени. Неузгодженість поляризації також може спричинити загасання переданої потужності. Тому важко підтримувати якість обслуговування. Ізотропна антена - це гіпотетичний ідеалізований пристрій, який не існує в реальності.

Найближчим наближенням може бути набір із двох пар схрещених дипольних антен, керованих у квадратурі. Коли потрібно охопити простір у всіх напрямках, потрібні інтелектуальні антени з діаграмою спрямованості та швидкою поляризацією. Однак для багатьох застосувань узагальнення адаптивної інтелектуальної антени все ще далекі через їхню високу вартість або енергоспоживання або через розмір та проблеми з інтеграцією. Отже, існує потреба в малих антенах з оптимізованою діаграмою спрямованості та поляризацією для забезпечення широкого покриття.

Одним із методів отримання квазіізотропної поведінки є об'єднання кількох елементарних антен у взаємодоповнюючий спосіб з точки зору полів і поляризації. Було введено концепцію коефіцієнта просторового покриття, а також її застосування до квазіізотропної антени (Nuchard et al., 2005). Залежно від бездротових додатків і пов'язаних пристроїв типи антен можуть дуже відрізнятися. Наприклад, основними вимогами до антени стільникового мобільного радіотелефону будуть малий тип, низький профіль і широка/багатосмугова пропускна здатність.

І останнє, але не менш важливе: у сучасних системах бездротового зв'язку враховуються складні методи обробки сигналів і цифрові процедури, щоб побудувати пристрій, який є достатньо гнучким, щоб запускати будь-яку можливу форму сигналу без будь-яких обмежень на несучу частоту, пропускну здатність, формат модуляції, швидкість передачі даних, і т. д. Це філософія майбутніх радіосистем, таких як програмно визначене радіо (SDR) і когнітивне радіо, вперше представлене Мітолою. У цьому контексті антена

стає не лише однією з найважливіших частин бездротової системи, але також достатньо гнучкою та «розумною», щоб виконувати функції обробки, які можуть бути реалізовані будь-яким іншим пристроєм. Антени все більше пов'язуються з іншими компонентами (наприклад, системою на чіпі) та іншими предметними областями (такими як цифрова обробка сигналу або канали розповсюдження). Для точної інтеграції продуктивності антени в конструкції загальної бездротової системи дуже бажані конкретні моделі, сумісні зі стандартними мовами. Таке моделювання дозволяє правильно проектувати та оптимізувати бездротові радіочастотні інтерфейси, включаючи антени.

## 1.2 Надширокосмугова технологія

Надширокосмугова технологія (Ultra Wideband, UWB) – це нова технологія для майбутнього бездротового зв'язку малої дальності з високою швидкістю передачі даних, а також радаром і геолокацією. Дійсно, використання великої смуги пропускання пропонує численні переваги, включаючи високі швидкості передачі даних, стійкість до завмирання розповсюдження, точне визначення дальності та геолокацію, відмінне проникнення через перешкоди, стійкість до перешкод, придушення перешкод і співіснування з системами з вузькою смугою пропускання. Слід зазначити, що перші UWB сигнали були згенеровані в експериментах Герца, який випромінював іскри через широкосмугові навантажені диполі. Однак у той час від цього типу зв'язку відмовилися через відсутність ресурсів для ефективного відновлення широкосмугової енергії. Пізніше, у 1960-х і 1970-х роках, технології імпульсного радіо використовувалися для розробки радарів, зондування, військового зв'язку та спеціальних програм. У 1973 році Росс подав знаковий патент на UWB зв'язок.

Однак саме в 1989 році термін «надширокосмуговий» з'явився в публікації міністерства оборони Сполучених Штатів (США), і перший патент із точним словосполученням «UWB антена» був поданий від імені Hughes у 1993 році. Таким чином, інтерес до UWB відродився в 1990-х роках завдяки вдосконаленню цифрової обробки сигналів і, зокрема, дослідженню Імпульсного радіо (IR) Віном і Шольцем у 1998 році. Нарешті, у 2002 році інтерес до систем UWB значно підвищився завдяки рішенням Федеральної комісії зі зв'язку (FCC) Сполучених Штатів, яка регулює частоти, яка опублікувала звіт, що схвалює використання пристроїв UWB, що працюють у кількох неліцензованих діапазонах частот. [0-960 МГц], [3,1-10,6 ГГц] і [22-29 ГГц]. З тих пір правила були визначені, зокрема, через спектральні маски випромінювання по всьому світу.

У Європі Комітет з електронних комунікацій (ECC) запропонував свою останню пропозицію в квітні 2009 року. На відміну від єдиного рівня маски випромінювання FCC для всього діапазону UWB, у цьому звіті запропоновано два піддіапазони з низькою смугою в діапазоні від 3,1 ГГц. до 4,8 ГГц (дозволено до 2011 року з включеними методами пом'якшення для забезпечення співіснування) і високочастотним діапазоном від 6 ГГц до 8,5 ГГц. Верхня межа для ефективної ізотропної потужності випромінювання (EIRP) є загальноприйнятною і становить - 41,3 дБм/МГц. Навіть якщо дозволені діапазони частот відрізняються залежно від регіонів світу, визначення UWB є універсальним.

UWB описує бездротову технологію фізичного рівня, яка використовує смугу пропускання щонайменше 500 МГц або смугу пропускання, що становить щонайменше 20% від використовуваної центральної частоти. Для систем UWB було розроблено два підходи: імпульсна робота та кілька вузьких смуг. Серед цих методів оригінальний підхід заснований на концепції IR. Імпульсне радіо означає використання серії імпульсів дуже короткої

тривалості, які модулюються за положенням або/або амплітудою. Оскільки сигнали не містять несучої, тобто існують лише сигнали базової смуги; тому не потрібна обробка проміжної частоти. Альтернативними схемами є багатодіапазонне мультиплексування з ортогональним частотним поділом (MB-OFDM) і множинний доступ з кодовим поділом на кількох несучих (MC-CDMA).

Щоб гарантувати співіснування UWB з іншими стандартами зв'язку, дозволена передана потужність завжди дуже низька, що обмежує розвиток систем зв'язку UWB з дуже високою швидкістю передачі даних та/або охопленням більших відстаней. Зв'язок між системами з кількома входами та кількома виходами (MIMO) (які використовують середовище багатого розсіювання за допомогою кількох антен) із технологією UWB все більше вивчається. Здається, це дуже потенційний підхід для підвищення пропускної здатності, збільшення радіусу дії, підвищення надійності зв'язку та покращення усунення перешкод. Останні роботи також показали перспективність використання технології UWB в системах RFID (радіочастотної ідентифікації) наступного покоління. Дійсно, було виділено обіцянки для досягнення більшого робочого діапазону, точної локалізації, стійкості до перешкод і більшої безпеки в системах множинного доступу.

Крім того, коли розглядаються бездротові системи, які є потенційними кандидатами для когнітивного радіо, UWB здається одним із спокусливих виборів, оскільки він має внутрішній потенціал для виконання деяких ключових вимог когнітивного радіо. Ці вимоги включають відсутність фальшивих перешкод для ліцензованих систем, регульовану форму імпульсу, пропускну здатність і передану потужність, підтримку різної пропускної здатності, забезпечення адаптивного множинного доступу та безпеку інформації. Однак не стверджується, що когнітивна бездротова система, яка використовує лише технологію UWB, може відповідати всім вимогам

ідеального когнітивного радіо. Прогрес у реконфігурації радіочастотних інтерфейсів, зокрема реконфігурованих (кількох) антен, надає новий «апаратний» вимір для оптимізації продуктивності систем бездротового зв'язку (2007).

Перспективи UWB постійно зростають, однак майбутні бездротові системи, що використовують технологію UWB, пов'язані з багатьма новими проблемами, особливо пов'язаними з проектуванням і моделюванням UWB антен.

### 1.3 Конструкція надширокосмугових антен

#### 1.3.1 Властивості UWB антени

Антенa – це пристрій, який перетворює сигнал, що передається від джерела до лінії передачі, в електромагнітні хвилі для трансляції у вільний простір і навпаки. Зазвичай антенa потрібна для оптимізації або концентрації енергії випромінювання в одних напрямках і придушення її в інших на певних частотах. Хороша конструкція антени може зменшити системні вимоги та підвищити загальну продуктивність системи. На практиці, щоб описати характеристики антени, існує кілька часто використовуваних параметрів антени, таких як смуга пропускання імпедансу, діаграма спрямованості, спрямованість, підсилення, вхідний опір і так далі. Зокрема, UWB антенa визначається як антенa, яка має фракційну смугу пропускання більше 0,2 і мінімальну смугу пропускання 500 МГц.

$$BW = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \geq 0.2, \quad (1.1)$$

$$f_H - f_L \geq 500 \text{ МГц}$$

де  $f_L$  і  $f_H$  – частоти, що визначають робочий діапазон антени. Наприклад, система IR-UWB, яка відповідала б масці випромінювання та працювала в межах частотного діапазону 3,1-10,6 ГГц, потребує антени, яка має майже десятиліття імпедансної смуги пропускання, що охоплює 7,5 ГГц.

Однак UWB антени – це перш за все антени! Відповідно, UWB антени намагаються досягти тих самих цілей і піддаються тим самим фізичним обмеженням (наприклад, низька вартість, малий розмір, можливість інтеграції тощо) і тим самим електричним обмеженням (наприклад, узгодження імпедансу, діаграма спрямованості, спрямованість, ефективність, поляризація тощо), як у випадку вузькосмугових антен. Крім того, завдяки великій смузі пропускання електричні параметри стають залежними від частоти, що ускладнює проектування та аналіз. На додаток до звичайних параметрів характеристики, деякі специфічні параметри повинні бути досліджені, щоб врахувати ефекти спотворення, особливо критичні для IR-застосувань. Ці специфічні параметри включають групову затримку, фазову характеристику та імпульсну характеристику. Бажано, щоб діаграма спрямованості була постійною в межах загальної робочої частоти, щоб гарантувати однакові властивості імпульсу в будь-якому напрямку. Групова затримка визначається похідною розгорнутої фази антени. Якщо фаза є лінійною у всьому діапазоні частот, групова затримка буде постійною для діапазону частот. Це важлива характеристика, оскільки вона допомагає вказати, наскільки добре буде передаватися UWB імпульс і до якої міри він може бути спотворений або розсіяний.

Технічні характеристики конструкції антени будуть компромісом між цими параметрами, враховуючи не лише очікуване застосування, але й техніку передачі (кілька вузьких діапазонів або імпульсна робота), яка буде використовуватися. Деякі параметри мають бути оголошені важливішими за

інші. Можна виділити два типи вимог. Фізичні обмеження виникають, коли хтось прагне розробити антени невеликого розміру, низького профілю та низької вартості (матеріали, технічне обслуговування та виготовлення), а також із можливістю вбудовування. Електричні обмеження виникають під час проектування антен із широкосмуговою смугою імпедансу, що охоплює всі піддіапазони (для MB-OFDM) або смугою, де зосереджена більша частина енергії імпульсу джерела (для IR), постійні спрямовані або всенаправлені діаграми спрямованості, постійне посилення в цікавих напрямках, постійна бажана поляризація, висока ефективність випромінювання та лінійна фазова характеристика (для IR).

### 1.3.2 Характеристики UWB антени

У 2003 році Г. Г. Шанц представив історію UWB антен, який наголошує на відповідних минулих роботах над UWB антенами та їх важливому широкому різноманітті: «Надширокосмуговий діапазон сягає своїм корінням в оригінальних передавачах з іскровим проміжком, які стали піонерами радіо технології. Ця історія вже добре відома і має документацію як в професійних історичних джерелах, так і в інших джерелах. Розвиток антен UWB не був підданий подібному дослідженню. Як наслідок, багато конструкцій антен UWB були забуті, а потім відновлені пізніше науковцями. Отже, в останні роки було опубліковано та представлено в науковій літературі та деяких патентах багато конструкцій антен UWB. Основна проблема при розробці UWB антени пов'язана з охопленням великої смуги пропускання, тому що узгодження та передача енергії потребують перевірки для всієї смуги пропускання. Однак традиційні компроміси, такі як розмір і ефективність і розмір і пропусканна здатність (обмеження Чу-Гарінгтона), все ще впливають на характеристики та продуктивність антен.

UWB антени можна розділити на різні типи відповідно до їхніх характеристик випромінювання: частотно-незалежні антени, мультирезонансні антени, антени біжучої хвилі та антени з малими елементами.

### 1.3.3 Частотно-незалежні антени

Частотно-незалежні антени, такі як біконічні, спіральні, конічні спіральні та логперіодичні антени, є класичними широкосмуговими та UWB-антенами. Вони можуть запропонувати реальні постійні імпеданси та узгоджені властивості шаблону в діапазоні частот більше 10:1. Існує два принципи досягнення частотно-незалежних характеристик. Перший був представлений Рамсі в 1950-х роках. Принцип Рамсі припускає, що властивості діаграми спрямованості антени будуть незалежними від частоти, якщо форма антени задана лише в термінах кутів. Гарними прикладами є нескінченні біконічні та спіральні антени, форми яких повністю описуються кутами. Для логарифмічних періодичних антен вся форма визначається не лише кутами, а також залежить від довжини від початку до будь-якої точки конструкції. Однак логарифмічні антени все ще можуть демонструвати незалежні від частоти характеристики. На рис. 1.1 показано геометрію спіральних, логперіодичних і конічних спіральних антен.

Другим принципом, що враховує незалежні від частоти характеристики, є самодоповнення, яке було введено Мушіаке в 1940-х роках на основі принципу Бабіне в оптиці. Мушіаке виявив, що добуток вхідних опорів планарної електричної антени (пластини) та її відповідної антени з «магнітним струмом» є реальною константою  $\eta^2/4$ , де  $\eta$  – власний імпеданс. Отже, якщо антена є власним доповненням, виходить частотно-незалежна поведінка імпедансу. На рис. 1.1 (а), якщо довжини  $W$  і  $S$  однакові, тобто металева і

повітряна області антени рівні; спіральна антена є самодоповнювальною. На рис. 1.1 (г) показана геометрія логарифмічної спіральної антени.

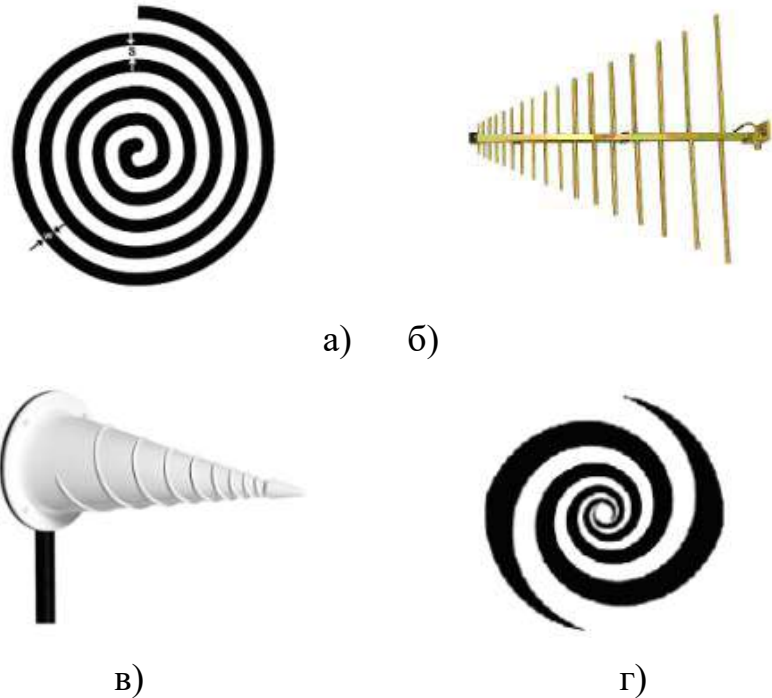


Рисунок 1.1 – а) – Спіральна антена; б) – Логарифмічна періодична антена; в) – Конічна спіральна антена; г) – Логарифмічна спіральна антена

Хоча частотно-незалежні антени можуть працювати в надзвичайно широкому діапазоні частот, вони все ще мають деякі обмеження. По-перше, щоб задовольнити вимогу Рамсі, конфігурація антени має бути нескінченною в принципі, але на практиці її розмір зазвичай скорочується. Ця вимога робить частотно-незалежні антени досить великими з точки зору довжини хвилі. По-друге, частотно-незалежні антени мають тенденцію до розсіювання, оскільки вони випромінюють різні частотні компоненти з різних частин антени, тобто частина меншого масштабу забезпечує вищі частоти, а частина великого масштабу – нижчі частоти. Як наслідок, отриманий сигнал страждає від сильних ефектів дзвінка та спотворень. Через цей недолік частотно-незалежні

антени можна використовувати лише тоді, коли дисперсія форми хвилі допустима.

#### 1.3.4 Багаторезонансні антени

Багаторезонансні антени складаються з безлічі вузькосмугових випромінюючих елементів. Цей тип антени включає в себе логперіодичні антени або антени Ягі (рис. 1.1 (б)). Існують також планарні версії цих антен. Незважаючи на те, що ці антени є UWB, вони не зручні для систем IR-UWB, оскільки їх фазові центри не мають фіксованої частоти і, отже, демонструють дисперсію.

#### 1.3.5 Антени біжучої хвилі

Антени біжучої хвилі включають рупорні антени, конічні щілинні антени та діелектричні стрижневі антени. Ці антени мають плавний і поступовий перехід між спрямованою хвилею та випромінюваною хвилею та мають хороші властивості для UWB.

Рупорні антени становлять основний клас спрямованих антен UWB, і вони зазвичай використовуються для вимірювання діаграм спрямованості або для радіолокаційних додатків, що проникають через землю. Вони складаються з прямокутних або круглих хвилеводів, які за своєю суттю є широкосмуговими. Їх пропускна здатність відносно велика, тобто 50% – 180%. Ці антени мають дуже хорошу поляризацію, дуже низьку дисперсію та дуже низьку зміну фазового центру від частоти. На рис. 1.2 (а) показана рупорна антена з подвійним гребнем як приклад.

Конусоподібна щілинова антена (TSA) є ще одним важливим класом спрямованих антен UWB. Типова TSA складається з конічної щілини, яка була

витравлена металізацією на діелектричній підкладці. Профіль звуження може приймати різні форми: лінійна конічна щілинова антена (LTSA), щілинова антена постійної ширини (CWSA), розірвана лінійно звужена щілинова антена (BLTSA) або експоненціально звужена щілинова антена (Vivaldi), як показано на рис. 1.2 (б). TSA адаптовані до широкої смуги пропускання 125% - 170%. Їх діаграма спрямованості односпрямована в площині підкладки і має низький рівень крос-поляризації. Спрямованість збільшується з частотою, і коефіцієнт посилення, досягнутий цими антенами, може досягати 10 дБі залежно від типу профілю.

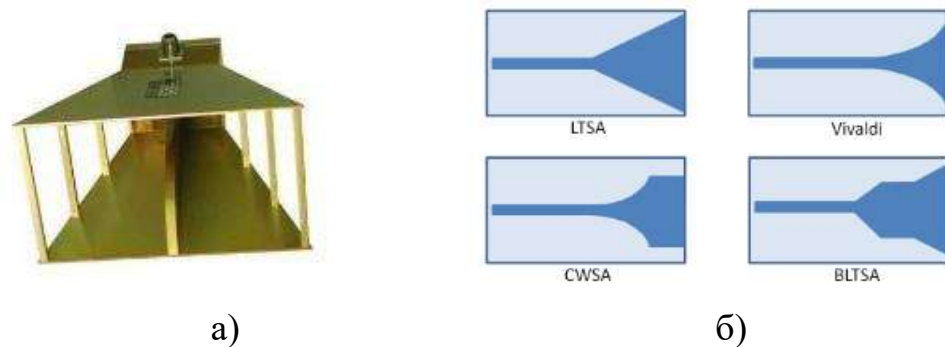


Рисунок 1.2 – а) – Рупорна антена;

б) – Конусоподібні (конічні) щілинні антени

### 1.3.6 Антени з малими елементами

Дрібноелементні антени включають біконічні антени та антени-метелик Лоджа, алмазний диполь Матера, сферичну та еліпсоїдну антени Стора та круглий диполь Томаса. Ці антени є прямим розвитком монополя та основного диполя (дублет Герца). Розробники антен виявили, що, починаючи з дипольної або монопольної антени, потовщення плечей призводить до збільшення смуги пропускання. Таким чином, для товстої дипольної або монопольної антени розподіл струму більше не є синусоїдальним, і там, де це явище майже не впливає на діаграму спрямованості антени, воно також сильно впливає на

вхідний опір. Цей ефект розширення смуги є ще сильнішим, якщо товстий диполь приймає форму біконічної антени. На рис. 1.3 (а) і на рис. 1.3 (б) показано еволюцію від тонкодротяної дипольної антени до біконічної антени, яка представляє частотно-незалежний імпедансну характеристику. Подальшу еволюцію можна знайти в дипольних і монопольних антенах, утворених сферами та еліпсоїдами. Біконічна антена розвинулася до єдиного конуса (рис. 1.3 (в)), який представляє обмежену смугу пропускання з добре узгодженим імпедансом, але стабільний фазовий центр у межах смуги пропускання. Завдяки цим якостям дисконні антени застосовуються для вимірювання UWB каналів і тестування UWB систем. На рис. 1.3 (г) і рис. 1.3 (д) показують альтернативні можливі асиметричні структури. Іншим розвитком біконічної антени є антена-метелик, плоска версія біконічної антени (рис. 1.3 (е)). Один із полюсів можна перетворити на заземлену площину (тобто електрично велику провідну пластину), як показано на рис. 1.3 (є).

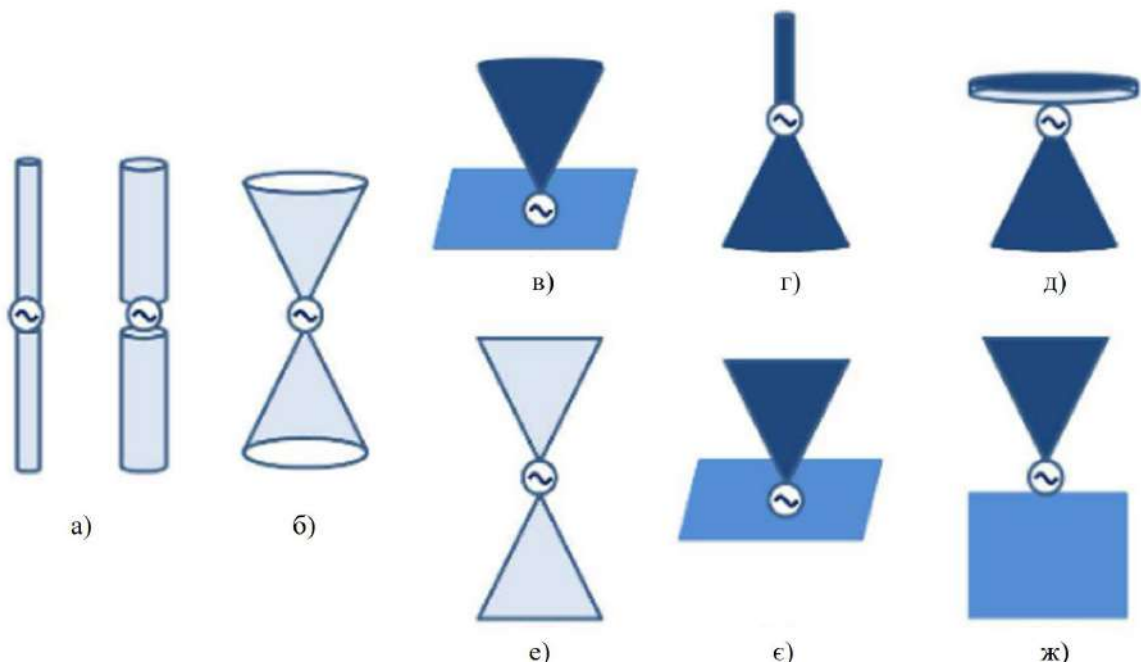


Рисунок 1.3 – Еволюція дипольних, конічних і планарних антен

На рис. 1.3 (ж) також можна розглядати як еволюцію звичайного монополя, що має конфігурацію прямого дроту проти заземленої площини. Монополя є однією з найбільш широко використовуваних антен для систем бездротового зв'язку завдяки своїй простій структурі, низькій вартості, всенаправленій діаграмі спрямованості та простоті узгодження до  $50\Omega$ . Крім того, він є незбалансованим, тому усуває потребу в балуні, який може мати обмежену пропускну здатність. Пропускна здатність прямого дротяного монополя зазвичай становить близько 10% - 20%, залежно від співвідношення радіуса до довжини монополя. Коли радіус монополя занадто великий відносно лінії живлення, неузгодженість імпедансу між ними стає значною, і смуга пропускання не може бути додатково збільшена. Нарешті, метод збільшення пропускну здатності полягає в заміні дротяного елемента пластиною, яка, очевидно, набагато «товстіша». Ця пластина може мати різні конфігурації, такі як трикутник, круг, квадрат, трапеція, п'ятикутник, шестикутник, еліптик, які наведено на рис. 1.4. Кругла та еліптична форми мають особливо хороші широкосмугові характеристики завдяки плавному переходу між випромінювачем та лінією живлення.

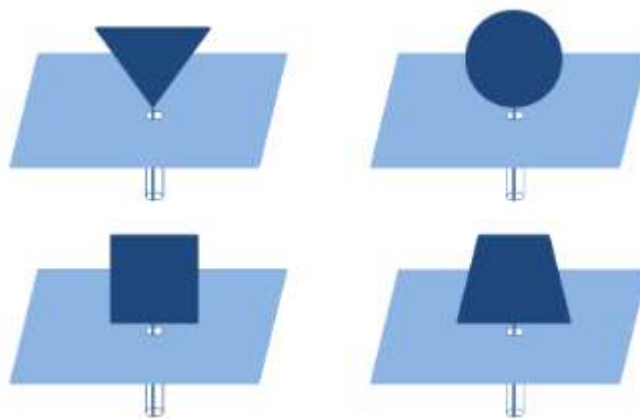


Рисунок 1.4 – Приклади монополів трикутника, кола, квадрата та трапеції

Ці широкосмугові монополі мають широкую робочу смугу пропускання, задовільні властивості випромінювання, прості структури та легкість виготовлення. Також було запропоновано кілька методів для покращення смуги пропускання антени, наприклад, використання скошеної пластини, подвійного каналу або асиметричного розташування каналу, живильна стрічка у формі тризуба тощо. Однак вони не є плоскими структурами, оскільки їхні площини землі перпендикулярні до радіаторів. Цей недолік обмежує їх практичне застосування через велику площу.

Дослідження зосереджені на антенах, які можна легко інтегрувати в інші радіочастотні схеми, а також можна вбудовувати в пристрої UWB. З 2004 року активізуються роботи над планарними та друкованими UWB антенами. Друковані монопольні антени мають широкосмугову узгоджувальну характеристику, всенаправлені діаграми спрямованості, високу ефективність випромінювання та компактні розміри. Було запропоновано багато конструкцій мікросмугових UWB антен. Планарні радіатори витравлені на діелектричній підкладці друкованих плат. Площина заземлення може бути в одній площині з радіаторами або під підкладкою.

Випромінювачі можуть живитися по мікросмугової лінії і коаксіальному кабелю. Деякі приклади геометрії таких антен наведено на рис. 1.5.

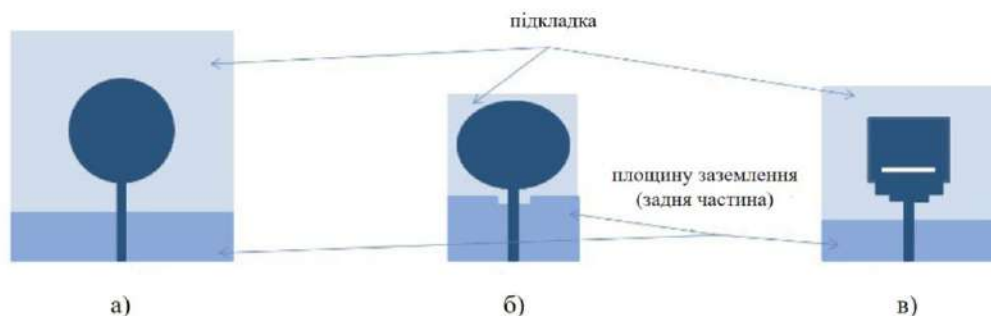


Рисунок 1.5 – а) – Кругла дискова антена; б) – еліптична антена;  
в) – Квадратна антена

Надрукований плоский круглий дисковий монополь, що живиться мікросмуговою лінією, представлений на рис. 1.5 (а). Надруковане планарне еліптичне зображення, що представляє техніку узгодження імпедансу створення виїмки на площині заземлення навпроти мікросмугової лінії, показано на рис. 1.5 (б). Прямокутний патч із двома сходинками та прорізом для покращення узгодження імпедансу, особливо на високих частотах, показаний на рис. 1.5 (в).

UWB антени – це стара, але розвиваюча тема. Було розроблено багато конструкцій, і постійно з'являються нові. Подальші роботи будуть зосереджені на вдосконаленні фактичних структур антен та інтеграції можливостей реконфігурації. Наприклад, щодо співіснування систем UWB із бездротовими службами на частоті 5 ГГц, нещодавні дослідження показали інтерес до використання композитних право-лівосторонніх метаматеріалів для розробки дуже малого режекторного фільтра, а також використовувати або PIN-діоди, або перемикачі мікроелектромеханічної системи для створення реконфігурованих UWB-антен із характеристиками смуги перерізу. З іншого боку, нещодавно також були запропоновані реконфігуровані антени, засновані на використанні активних компонентів з налаштуванням низьких частот і перемиканням діапазону UWB. Ці антени забезпечують частотну гнучкість радіочастотних каскадів, необхідну мультистандартним радіостанціям. Крім того, з точки зору можливості реконфігурації, майбутні антени повинні дозволяти змінювати діаграми спрямованості, частоту, поляризацію тощо.

Ще один напрям розвитку в майбутньому полягає в гнучких, переносних та/або текстильних антенах. Таким чином, були уявлені нові програми, де люди будуть носити ряд пристроїв і датчиків, включаючи медичні датчики або датчики позиціонування, які дозволять їм спілкуватися один з одним. У цьому контексті UWB системи є потенційними кандидатами. Потім UWB антени будуть виготовлені на гнучких органічних підкладках та інтегровані в одяг. У той же час їх продуктивність повинна бути стійкою до деформацій. Нарешті, слід також зауважити, що аналітичні рішення проблем антени (наприклад,

оптимізація геометрії) є дуже складними (майже неможливими), тому чисельне комп'ютерне моделювання стало основним інструментом проектування антени, особливо після публікації книги Гарінгтона за методом моменту в 1968 році. За останні 15 років у індустрії програмного забезпечення для антен було зроблено значні вдосконалення та прогрес. Зараз на ринку доступно багато чудових програмних пакетів, які є важливою допомогою для аналізу та проектування антен.

#### 1.4 Висновок до першого розділу

У сучасному світі зростає інтерес до надширокосмугової (UWB) технології, оскільки вона має великий потенціал для застосувань у бездротовому зв'язку та інших областях. З дозволом на використання неліцензованого UWB діапазону частот від 3,1 до 10,6 ГГц, відкрилися нові можливості для високошвидкісного зв'язку та інших застосувань. Технологія UWB пропонує велику смугу пропускання та низьку споживану потужність, що робить її привабливою для широкого спектру застосувань.

У розділі було розглянуто історію розвитку антен UWB та їхніх різних конструкцій. Науковці постійно досліджують нові конструкції та можливості реконфігурації антен, щоб відповідати сучасним вимогам. Поряд з розробкою традиційних антен UWB, дослідники також розглядають можливості гнучких, переносних та текстильних антен, що мають важливе значення для інноваційних застосувань, таких як системи носимих пристроїв та інші. Необхідно враховувати складні аналітичні рішення та користуватися чисельним комп'ютерним моделюванням для проектування та аналізу антен, що є важливим кроком у вдосконаленні їх характеристик.

Загальною висновок розділу є те, що антени UWB мають великий потенціал у бездротовому зв'язку та інших областях, і подальший розвиток та дослідження в цій галузі є вельми важливими для досягнення нових досягнень та інновацій.

## 2 МЕТОДОЛОГІЯ ЛОГПЕРІОДИЧНИХ ДИПОЛЬНИХ АНТЕН

Сучасні системи передачі медіаданих нахиляються до антен з більшою пропускною здатністю і омнідірекційними властивостями при менших розмірах. Таким чином, дипольні антени є дуже популярними кандидатами завдяки їх рівномірному охопленню в усіх напрямках, прийнятному підсиленню та відносно низькій вартості виробництва. Логарифмічні антени призначені саме для розширення діапазону частот. Фактична пропускна здатність логарифмічної антени залежить від її діапазону частот.

У телекомунікаціях частотний спектр – це цінний ресурс, і кожний діапазон виділяється для конкретних застосувань. Логарифмічна антена є широкосмуговою багатоелементною антеною з унідирекційним, вузьким променем, імпеданс та характеристики випромінювання яких регулярно повторюються у відповідності до логарифмічної функції частоти збудження. Вимірюються параметри, включаючи вхідний опір, коефіцієнт підсилення, характеристику випромінювання та проводяться симуляції.

Логарифмічний дипольний масив LPDA, Log Periodic Dipole Array - це багатоелементна напрямна антена, призначена для роботи в широкосмуговому діапазоні частот, яку було розроблено Дуайтом Ісбеллом і Реймондом Дюгамелем в 1958 році в Університеті Іллінойсу. Вона має кілька напівдипольних фундаментів з поступово збільшуваною довжиною, які підключені до живильної лінії зі змінною фазою. LPDA змінює свою роботу зі збільшенням частоти шляхом випромінювання або приймання у зоні активного регіону, і тому її називають логарифмічною антеною.

Спрямовані антени, такі як Ягі, забезпечують посилення та спрямованість, але їхня пропускна здатність обмежена. Одна з форм антени, яка здатна забезпечити посилення та спрямованість разом із широкою смугою пропускання, відома як логарифмічно періодична антена. Незважаючи на те, що вона більша за еквівалентний Ягі або іншу спрямовану конструкцію для

еквівалентного рівня посилення, вона здатна працювати на багатьох різних частотах.

## 2.1 Типи та варіанти антен з логарифмічною періодичною структурою

Існують кілька форм логарифмічних періодичних антен. Точний тип, який найбільше підходить для будь-якої конкретної застосовуваної задачі, залежить від вимог.

Основні типи антен з логарифмічною періодичною структурою включають:

*Логарифмічний дипольний масив (LPDA)* – це антенна конструкція, яка використовує логарифмічну періодичність для отримання широкосмугової характеристики випромінювання. Головна особливість LPDA полягає в тому, що розміри та імпеданс цієї антени регулярно змінюються залежно від частоти, що дозволяє їй працювати на широкому діапазоні частот. Вона складається з послідовно розташованих диполів, кожен з яких розрахований на роботу на певній частоті. При цьому, діапазон частот, на якому LPDA працює, включає в себе як низькі, так і високі частоти.

LPDA зазвичай має вузьку діаграму спрямованості, що робить її корисною для застосувань, де необхідна спрямованість сигналу, такі як радіорозвідка, системи визначення напрямку, антенні вимірювання та інші. Також, вона може працювати на широкому діапазоні частот, що робить її корисною для бездротового зв'язку та інших застосувань, де важлива широкосмугова пропускна здатність.

*Шарове логарифмічне антенне вікно* – це антенна структура, яка використовує принципи логарифмічної періодичності для отримання широкосмугової характеристики випромінювання. Ця антенна конструкція має форму кулі або сфери і включає в себе систему диполів або інших випромінюючих елементів, які розташовані на поверхні або в масиві

сферичної форми. Головна особливість цієї структури полягає в тому, що вона може працювати на широкому діапазоні частот, забезпечуючи при цьому спрямованість і високий коефіцієнт підсилення.

Шарові логарифмічні антенні вікна використовуються в різних бездротових комунікаційних системах, радіорозвідці, антенних вимірюваннях та інших додатках, де потрібна спрямованість та широкосмугова пропускна здатність.

*Антенний масив логарифмічного типу "зігзаг"* – це модифікована версія логарифмічного антенного масиву (LPDA), де дипольні елементи розташовані у вигляді зігзагоподібної конфігурації. Ця антенна має ряд дипольних елементів, які інтерферують між собою та створюють логарифмічну періодичність для досягнення широкосмугової характеристики випромінювання.

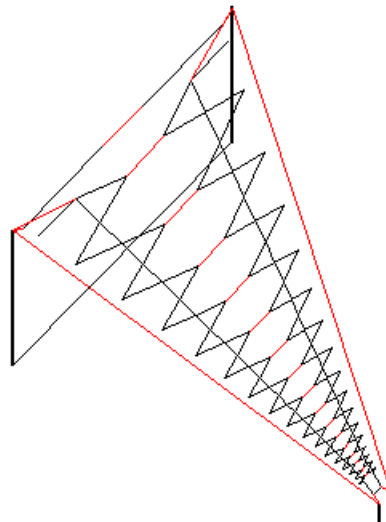


Рисунок 2.1 – Схема зігзагоподібної короткохвильової антени LPDA, чорним позначено металеві провідники, червоним – ізоляційні опори

Головна перевага антенного масиву логарифмічного типу "зігзаг" полягає в тому, що він може працювати на широкому діапазоні частот, забезпечуючи високу спрямованість та великий діапазон частот. Ця антенна конструкція знаходить застосування у бездротовому зв'язку, системах

радіорозвідки, визначення напрямку та інших застосуваннях, де важлива спрямованість та можливість працювати на різних частотах.

*Трапецієподібний логарифмічний антенний масив* – це один з типів логарифмічних антенних масивів, де дипольні елементи розташовані у вигляді трапецій або трапецієподібних структур. Ця конфігурація створює логарифмічну періодичність і дозволяє антенному масиву працювати на широкому діапазоні частот.

Трапецієподібні логарифмічні антенні масиви використовуються для застосувань, де важлива спрямованість та можливість роботи на різних частотах. Вони знаходять застосування в радіокомунікаційних системах, радіорозвідці, системах надширокосмугового зв'язку та інших областях, де важлива комбінація високої діаграми спрямованості та широкосмугової характеристики випромінювання.

*V-подібний логарифмічний антенний масив* – це один з видів логарифмічних антенних масивів, де дипольні елементи розташовані у вигляді структур, що нагадують букву "V". Ця конфігурація антенного масиву спеціально створена для роботи на широкому діапазоні частот.

Антенні масиви типу "V-подібний" часто використовуються в бездротовому зв'язку та інших застосуваннях, де необхідно поєднати спрямованість та велику смугу пропускання. Вони здатні працювати на різних частотах в широкосмуговому діапазоні, що робить їх корисними для сучасних комунікаційних технологій.

Загалом, V-подібні логарифмічні антенні масиви можуть забезпечити високий рівень підсилення та велику смугу пропускання, роблячи їх важливими компонентами в сучасних бездротових системах зв'язку та інших радіотехнічних застосуваннях.

Найбільш поширеним типом є логарифмічний дипольний масив, LPDA, і саме його розглянуто в даній роботі.

## 2.2 Огляд логарифмічних періодичних антен та їх застосувань

Логарифмічний дипольний масив складається з кількох дипольних елементів. Розмір цих елементів поступово зменшується від задньої частини до передньої – напрямком максимального випромінювання є від менших передніх елементів.

Кожен дипольний елемент LPDA живиться, проте фаза між сусідніми дипольними елементами обертається – це забезпечує правильну фазову синхронізацію сигналу між різними елементами. Це також означає, що потрібно мати живлення по всій довжині антени. Зазвичай це організовано так, щоб воно було частиною механічної структури антени.

Не всі антенні масиви активні на будь-якій заданій частоті. Активна область, тобто ділянки антени, які сприяють передачі чи прийому, змінюється зі зміною частоти, і лише близько трьох можуть дійсно сприяти випромінюванню на будь-якій заданій частоті. Також існує плавний перехід активної області LPDA вздовж антени зі зміною робочої частоти.

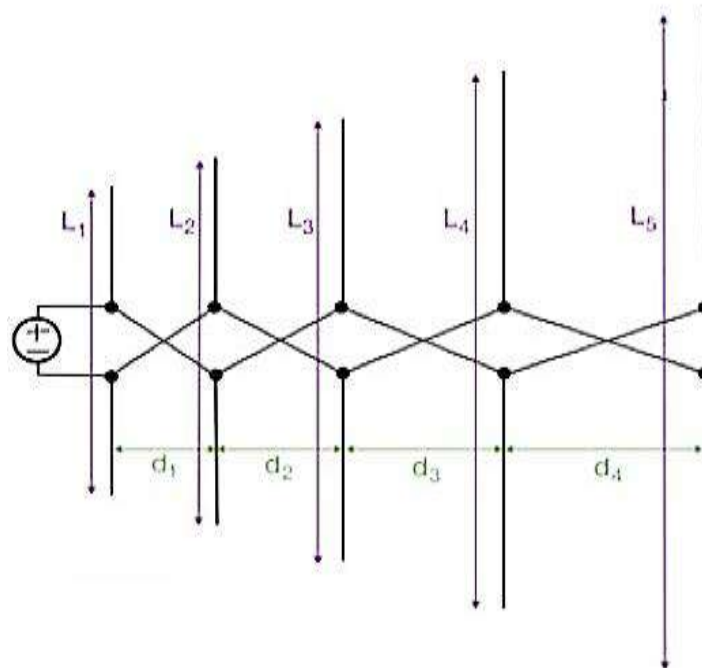


Рисунок 2.2 – Масив логарифмічних періодичних диполів,  
концепція LPDA

Елемент, що розташований ззаду антенного масиву, де елементи найбільші, є півхвильовим при найнижчій частоті роботи - найдовший елемент діє як півхвильовий диполь при найнижчій частоті. Інтервал між елементами також зменшується в напрямку до передньої частини антени, де розташовані найменші елементи. Верхня частота залежить від довжини найкоротшого елемента.

Крім того, зазвичай існує короткозамкнутий узгоджувальний фідерний шлейф, прикріплений до кінця фідера, який знаходиться далі від найкоротшого елемента, щоб забезпечити необхідне узгодження з антенним фідером і вздовж лінії живлення в антені.

Один з ключових елементів концепції LPDA - це зміщення фази між сусідніми дипольними елементами. Це забезпечує коректну фазову співвіднесеність між різними елементами антени. Кожен диполь живиться, і для цього потрібен живильний кабель, який зазвичай вбудований в конструкцію антени.

LPDA має активну область, яка змінюється зі зміною частоти, і вона використовується на деяких частинах антени, щоб забезпечити працездатність на конкретних частотах. Таким чином, LPDA надає можливість працювати на багатьох різних частотах з високою напрямленістю та доброю співвіднесеністю імпедансу.

Ця концепція дозволяє створювати антени з широкосмуговими характеристиками, що робить LPDA корисними в безлічі застосувань, включаючи радіолокацію, визначення напрямку, вимірювання імпульсної амплітуди та інші.

### 2.3 Продуктивність логарифмічної антени на практиці

Логарифмічний дипольний масив, LPDA, зазвичай може працювати в діапазоні частот приблизно 2:1 і забезпечувати підсилення вперед порівняно з диполем.

Схоже на антену Ягі, він має підсилення вперед та високе співвідношення передньої та задньої частини, але LPDA може працювати в набагато ширшому діапазоні частот і матиме менше підсилення порівняно з антеною Ягі з аналогічною кількістю елементів.

При роботі діаграма випромінювання конструкції LPDA залишається приблизно такою ж протягом всього робочого діапазону. Крім того, такі параметри, як опір випромінювання та відображена потужність, які вказуються коефіцієнтом стоячої хвилі.

З точки зору характеристик, типова логарифмічна антена може забезпечувати від 3 до 6 дБ підсилення вперед порівняно з диполем в діапазоні частот 2:1, при цьому підтримується рівень коефіцієнта стоячої хвилі менше 1,3:1. З таким рівнем продуктивності він ідеально підходить для багатьох застосувань, хоча логарифмічна антена буде набагато більшою, ніж антена Ягі з аналогічним підсиленням.

### 2.4 Застосування логарифмічних антен

Логарифмічні антени використовуються в багатьох областях, де потрібні широкосмугові характеристики разом із спрямованістю та підсиленням. Ця антена застосовується в кількох сферах, зокрема:

Високочастотний зв'язок: логарифмічні антени часто використовуються для дипломатичного трафіку на високочастотних діапазонах. Логарифмічні антени добре справляються з цим завданням, оскільки посольства та подібні користувачі повинні працювати на широкому спектрі частот у

високочастотних діапазонах, і часто реально мати лише одну антену. Одна логарифмічна антена надає доступ до достатньої кількості частот у високочастотних діапазонах, що дозволяє вести зв'язок незважаючи на зміни в іоносфері, які впливають на оптимальні робочі частоти

Наземне телебачення UHF: логарифмічна періодична антена іноді використовується для прийому УВЧ-ефірного телебачення. Оскільки телевізійні канали можуть розташовуватися в широкій частині спектру УВЧ, логарифмічна періодичність дозволяє охопити достатній широкопasmовий діапазон частот.

Вимірювання електромагнітної сумісності (EMC): EMC є ключовим питанням для всіх електронних продуктів. Тестування вимагає проведення сканування частот в широких діапазонах частот. При тестуванні на випромінювання потрібна антена, яка може забезпечити рівномірну відповідь в широкому діапазоні частот. Логарифмічна антена здатна надати необхідну продуктивність і широко використовується в цій формі застосування.

Інші застосування: Існують численні інші застосування, де можна використовувати логарифмічні антени. Будь-які застосування, де потрібна спрямованість і широкопasmовий діапазон, ідеальні для цього типу конструкції радіочастотних антен.

З огляду на її розмір та менший підсилення у порівнянні з Ягі, логарифмічний дипольний масив зазвичай не використовується так широко, як Ягі. Однак LPDA добре показує себе, коли потрібні широкопasmові діапазони.

## 2.5 Основні принципи логарифмічних антен

По мірі поширення радіосигналу вдовж живлення в антенні він досягає такої точки, де реверсія живлення та відстань між елементами призводять до загального зсуву фази приблизно на  $360^\circ$ . В цей момент спостерігається ефект,

як у випадку двох фазованих диполів. Сигнал від суміжних диполів перебуває в одній фазі. Ця область, в якій це відбувається, називається "активною областю" логарифмічної періодичної антени. Важливо відзначити, що, хоча в прикладі згадуються лише два диполя, на практиці активна область може включати в себе більше елементів – це може бути три або більше – точна кількість залежить від кута  $\alpha$  та константи конструкції (рисунок 2.3).

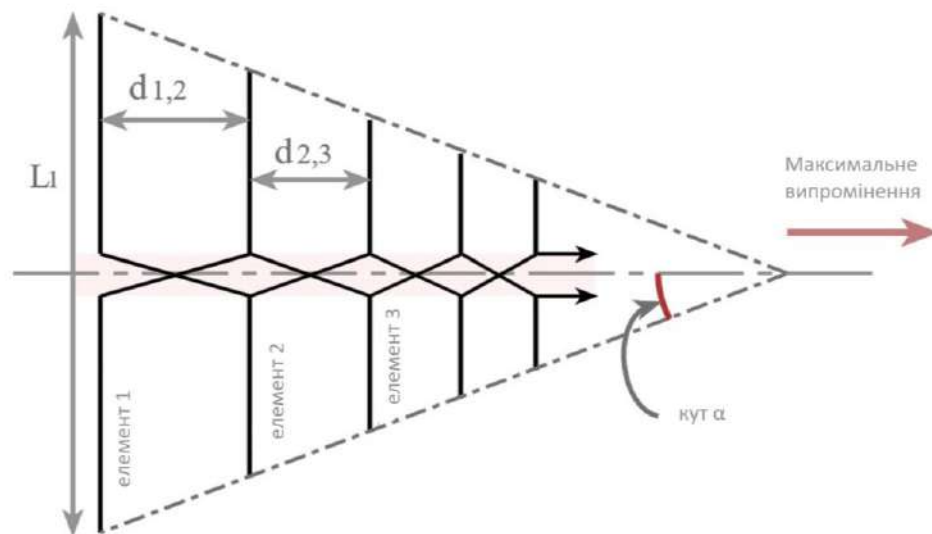


Рисунок 2.3 – Основні розміри для логарифмічного дипольного масиву

За активною областю сигнал знову випадає з фази і випромінювання не відбувається. Елементи за межами активної області отримують невелику пряму потужність. Незважаючи на це, виявлено, що більші елементи резонансні нижче робочої частоти і здаються індуктивними. Ті, що знаходяться попереду, резонують вище робочої частоти і є ємнісними. Це абсолютно ті самі критерії, що й у Ягі. Відповідно, елемент безпосередньо за активною областю діє як відбивач, а ті, що знаходяться попереду, діють як директори. Це означає, що максимальне випромінювання спрямоване на точку живлення.

Один із найважливіших параметрів, що описують логарифмічну антену, - це фактор масштабування. Цей фактор дозволяє зберігати постійні розміри антени в термінах довжини хвилі ( $\lambda$ ). Ця умова необхідна для збереження однакових імпедансів та випромінювальних характеристик на великому діапазоні частот. Іншими двома параметрами є фактор відстані та коефіцієнти відбиття.

Основні розміри для логарифмічного дипольного масиву включають:

1.Ширина діапазону частот: Це розмах частот, на якому антена може працювати з прийнятною ефективністю.

2.Довжина  $L_x$ : Довжина антени визначається кількістю диполів, їхнім розташуванням і довжиною кожного диполя.

3.Розмір диполів: Розмір і пропорції кожного диполя в антенному масиві грають важливу роль у визначенні характеристик антени.

4.Кут нахилу ( $\alpha$ ): Кут нахилу диполів антени відносно основного балку впливає на її характеристики та діапазон робочих частот.

5.Зовнішня структура: Конструкція антени, включаючи диполі, важільки, підсилювачі та систему живлення.

Зазначені розміри можуть змінюватися в залежності від конкретної конструкції та вимог додаткового застосування антени.

Відносна константа відстані ( $\sigma$ ) – це відношення довжини одного елемента до його найближчого, довшого сусіднього елемента.

За визначенням фактору  $\sigma$  можна побачити відношення між розмірами та відстанями різних елементів.

$$\sigma = \frac{L_{n+1}}{L_n}, \quad \sigma = \frac{d_{n+1}}{d_n}, \quad (2.1)$$

де  $d$  – відстань між елементами  $p$  та  $q$ .

Також можна визначити причину назви "логарифмічна періодична" антена з математичних розрахунків, пов'язаних із цією антеною.

Особливості антени зростають настільки, що мають постійний геометричний множник. Внаслідок того, що всі елементи зростають на постійний геометричний множник, відношення логарифмів буде постійним. Це виражено в наступній формулі.

$$\log(\sigma) = \frac{\log(f_{n+1})}{\log(f_n)}. \quad (2.2)$$

Також можна пов'язати три основні характеристики за допомогою наведеної нижче формули або рівняння.

$$\cot(\alpha) = \frac{4\sigma}{1-\tau}. \quad (2.3)$$

Також можна встановити зв'язок між відстанню між двома елементами та довжиною кожного з них, використовуючи кут, який утворюють довжини елементів в вершині, за допомогою наведеної нижче формули.

$$d_{x,y} = \frac{1}{2}(L_x - L_y) \cot(\alpha). \quad (2.4)$$

Це основні формули та рівняння, які встановлюють зв'язок між основними параметрами логарифмічної періодичної антени.

## 2.6 Еквівалентна схема вхідного опору UWB антени

У проектуванні схеми антени розглядаються як навантажені імпеданси. У вузькосмугових системах антена просто представлена резистором 50  $\Omega$  або

паралельним колом RLC для розгляду невідповідності. Однак, коли розглядаються UWB антени, моделювання схеми стає більш складним, оскільки потрібно враховувати кілька суміжних резонансів. Ефективний метод, також заснований на параметричному підході, може отримати еквівалентну схему вхідних опорів антени. Дійсно, параметричний підхід також можна застосувати до вхідного опору антени та пов'язати з методом синтезу пасивного фільтра Фостера, що дозволяє визначити еквівалентну схему цього опору.

Спочатку вхідний опір антени  $Z_a$  виводиться з коефіцієнта відбиття  $\Gamma$  за допомогою рівняння, записаного як

$$Z_a = Z_0(1 + \Gamma)/(1 - \Gamma), \quad (2.5)$$

де  $Z_0$  — опорний опір (зазвичай  $Z_0=50\Omega$ ). Як зазначалося раніше, можна визначити параметричну модель  $Z_a$ . Потім отриману модель можна ідентифікувати як імпеданс фільтра Фостера, заданий як

$$Z(p) = \sum_j \frac{A_j p}{p^2 + 2\alpha_j p + \omega_j^2}. \quad (2.6)$$

Нарешті, параметрична модель досліджуваного вхідного опору антени має 12 комплексних і спряжених пар полюсів і залишків. Модель еквівалентної схеми представлена на рис. 2.4. Слід зазначити, що деякі резистори мають від'ємні значення і, отже, є нефізичними електричними компонентами. Однак електричне коло веде себе як вхідний опір антени.

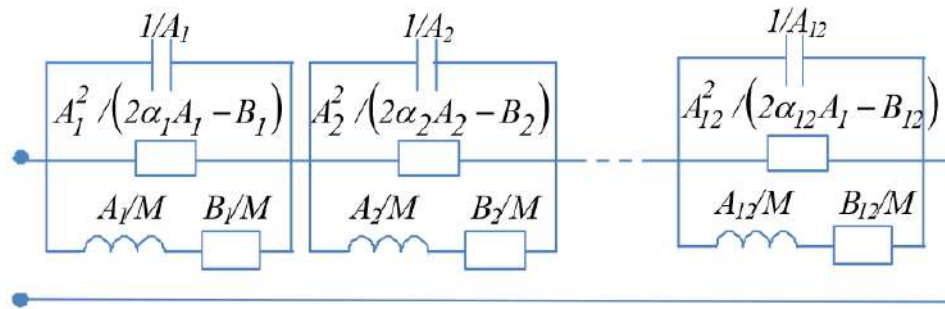


Рисунок 2.4 – Еквівалентна електрична схема вхідного опору антени

Отже, представлені основні розміри та параметри для логарифмічного дипольного масиву, які є ключовими компонентами антен для широкосмугового зв'язку. Розглядаючи ширину діапазону частот, довжини диполів, кут нахилу, внутрішню структуру та відносну константу відстані, розкрито важливі аспекти, які впливають на характеристики антени та її здатність працювати на різних частотах. Розуміння цих параметрів є важливим для розробки та налагодження антен, які задовольняють конкретні вимоги різних застосувань. Дотримання правильних розмірів та пропорцій допомагає досягти бажаних характеристик антени, таких як широкосмуговість та висока дірективність.

## 2.7 Моделювання радіолінії UWB, включаючи антени

Новий цікавий спосіб моделювання UWB-антен полягає в тому, щоб розглядати їх як частину радіолінії, щоб розробити або оптимізувати повний UWB-приймач. Такі трансивери, як правило, є складними радіочастотними, аналоговими та змішаними сигнальними системами. Їм потрібне аналогове та змішане середовище моделювання для радіочастотного, аналогового та цифрового моделювання.

Для системного моделювання високого рівня традиційно використовується Matlab, але його використання зазвичай обмежується

функціональним дослідженням. Коли потрібен рівень проектування схем, кожна «конструкторська спільнота» має власні інструменти моделювання: цифрові конструктори працюють із симуляторами, керованими подіями, аналогові розробники використовують SPICE-подібні симулятори, а розробникам радіочастотних інтегральних схем (RFIC) потрібна певна частота/час інструменти аналізу домену. Така велика кількість симуляторів робить проектування дорогим і створює багато проблем із сумісністю. Нещодавно два основних середовища зробили можливим поєднання трьох згаданих сімейств моделювання, щоб задовольнити потреби розробників гібридних систем; Нещодавно випущений Advance MS RF (ADMS RF) від Mentor Graphics, потік проектування RFDE від Cadence/Agilent дозволяють багатоабстрактне моделювання та моделювання змішаних сигналів, а також багатомовне моделювання (VHDL-AMS і SPICE). Деякі роботи показали корисність такого підходу для проектування складної системи змішаних сигналів. Жодна з цих робіт не включила антени в свої моделі. Однак модель радіоканалу UWB, включаючи антени, може бути записана в VHDL-AMS (мова опису апаратного забезпечення дуже високої швидкості інтегральної схеми – аналоговий і змішаний сигнал) з параметричної моделі параметра передачі S21. Щоб проілюструвати цей підхід, повне коло зв'язку UWB, засноване на простій архітектурі з технікою некогерентного прийому, моделюється та проілюстрований на рис. 2.5.

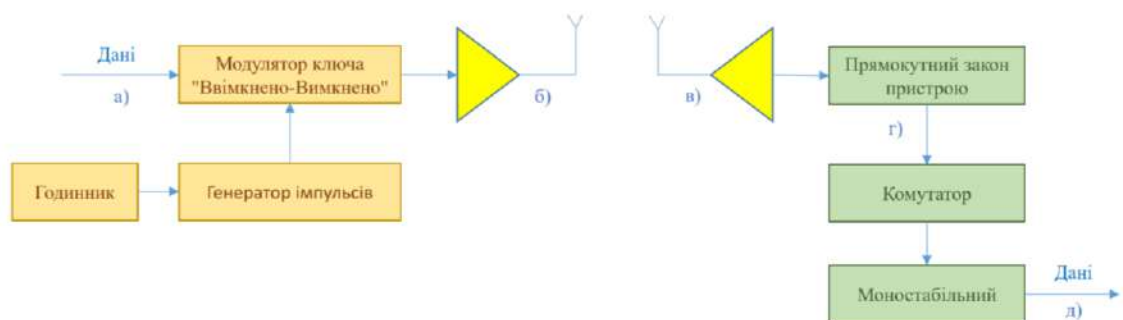


Рисунок 2.5 – Змодельоване комунікаційне коло UWB

У колі передачі використовується генератор імпульсів Релея, керований годинником. Отже, цифрові дані модулюються за допомогою ООК (On-Off Keying), що є класичною технікою модуляції, яка використовується для приймачів виявлення енергії UWB. Коло прийому складається з квадратичного пристрою, який використовується для детектування енергії прийнятого сигналу, компаратора та моностабільної схеми.

## 2.8 Висновок до другого розділу

В цьому розділі розглянуто основні принципи логарифмічних антен і надали методологію дослідження. Основні принципи включають розуміння структури та принципу роботи логарифмічних антен, такі як логарифмічна періодичність і функція антени. Також розглянуто основні параметри та розміри, які характеризують логарифмічні антени, включаючи діапазон робочих частот, довжину елементів, відстані між елементами та кут нахилу диполів.

Методологія дослідження описана для підходів, що використовуються в дослідженні логарифмічних антен, включаючи використання програмного забезпечення для моделювання та проектування, а також проведення експериментів та аналіз результатів. Надає методологію як основний підхід для досягнення мети дипломної роботи щодо дослідження логарифмічних антен.

Цей розділ надає теоретичні засади та методологічний підхід до дослідження логарифмічних антен і встановлює основу для подальших досліджень та експериментів.

### **3 МЕТОДИ МІНІАТЮРИЗАЦІЇ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ РОЗМІРУ ДРУКОВАНИХ ЛОГПЕРІОДИЧНИХ ДИПОЛЬНИХ АНТЕН**

В наші дні, в умовах стрімкого технологічного прогресу та постійного розвитку бездротових технологій, існує зростаюча потреба в системах зв'язку та бездротових пристроях нового покоління. Цей технологічний прогрес обумовлює розширення доступного бездротового діапазону частот, який призначений для використання у бездротових комунікаційних системах. Однією з важливих характеристик таких систем є їх здатність працювати в широкосмугових діапазонах частот, що охоплюють значний спектр від 3,1 ГГц до 10,6 ГГц. Для забезпечення ефективної роботи бездротових комунікаційних систем в цих діапазонах частот, вимагаються антени з великою пропускною здатністю та стійкими характеристиками діаграми спрямленості.

Зазвичай, однією з антенних конструкцій, яку дослідники розглядають для застосувань у надширокосмугових системах, є монопольні антени. Ці антени мають потенціал для створення ефективних пристроїв, які можуть передавати або приймати сигнали в широкому діапазоні частот. Проте важливо відзначити, що багато з існуючих монопольних антен не здатні забезпечити стійку діаграму напрямленості на всьому діапазоні частот, що може зменшувати їх ефективність та придатність для певних застосувань. Тому для деяких додаткових вимог, пов'язаних із стійкістю та спрямованістю сигналу, інженери шукають інші рішення та типи антен.

В різноманітних сферах технологій, таких як бездротовий зв'язок, радары, системи ідентифікації за радіочастотними мітками та багато інших, вимагається наявність надійних та ефективних антен, які можуть працювати у надширокосмугових діапазонах частот. Це важливо для забезпечення високої швидкості передачі даних, низьких витрат енергії та відповідності регуляторним вимогам.

У цьому контексті, монопольні антени можуть бути привабливим варіантом завдяки їхній здатності до широкосмугової роботи. Проте існує виклик, а саме необхідність підтримувати стабільну діаграму спрямованості протягом всього діапазону частот. Для деяких додаткових застосувань, таких як системи з точною спрямованістю сигналу, може знадобитися інша антенна конструкція або пошук нових рішень, що задовольняють ці вимоги.

Поміж антенами для надширокосмугових застосувань, окрім монопольних, належать і антени типу Вівальді, також відомі як конічні щілинні антени. Вони представляють собою інший ефективний варіант завдяки своїм особливим властивостям. Конічні щілинні антени вирізняються сталою діаграмою спрямованості у всьому діапазоні частот та здатністю надійно передавати або приймати сигнали у напрямку кінцевої точки призначення. Це робить їх привабливим вибором для сфер, де потрібна стійка і надійна спрямованість сигналу.

Конічні щілинні антени істотно вдосконалені для роботи в надширокосмугових діапазонах частот, що охоплюють значний спектр від 3,1 ГГц до 10,6 ГГц. У порівнянні з іншими типами антен, вони можуть забезпечувати стійку характеристику діаграми спрямованості, яка залишається стала в усьому діапазоні частот. Важливою особливістю конічних щілинних антен є їхні високі характеристики у відношенні до низьких витрат на виробництво та простоту інтеграції з іншими пристроями. Деякі з основних областей використання включають безпроводні зв'язок, радіолокаційні системи, системи ідентифікації на радіочастоті та безпеку загального призначення.

Проте, антени типу Вівальді можуть мати великі розміри, особливо при операціях на низьких частотах. Ця особливість може становити суттєве обмеження для деяких застосувань, де обмежена фізична площа є критичним фактором, наприклад, на борту безпілотних літальних апаратів чи у

стаціонарних системах відеоспостереження. У таких випадках можуть бути необхідні альтернативні антенні рішення, які дозволяють зберегти високу продуктивність, але при цьому мають менші розміри і об'єми.

Анени типу Вівальді, не зважаючи на свої переваги щодо характеристик випромінювання, можуть вимагати значного обсягу простору та ресурсів для розміщення та підтримки. Це може бути непрактичним у деяких обмежених або вимогливих середовищах, де фізичні розміри мають велике значення. Тому в ряді сучасних бездротових застосувань може виникнути необхідність в антенних рішеннях, які об'єднують в собі переваги надширокосмугової антени та компактні розміри, дозволяючи забезпечувати ефективний прийом і передачу сигналів в обмеженому просторі.

Було проведено кілька досліджень і запропоновано декілька методів для зменшення розміру друкованих LPDA антен. У цьому розділі розглядаються різні методи мініатюризації, запропоновані дослідниками для зменшення розміру друкованих LPDA антен.

### 3.1 Метод верхнього навантаження

Методи верхнього навантаження включають в себе додавання елементів різної форми, таких як Т-подібні, подвійні Т-подібні, у формі капелюха, дугоподібні, С-подібні або інших форм елементів, на кінці диполів звичайної друкованої LPDA. Проте, при додаванні елемента верхнього навантаження елемент на кінці диполя, фізична довжина диполя повинна залишатися такою самою, як і раніше. Елементи з верхнім навантаженням у Т-подібній формі та елементи з верхнім навантаженням у формі капелюха були запропоновані та впроваджені в роботі [25] для проектування 48-дипольної PLPDA, яка працює в діапазоні частот від 0,55 ГГц до 9 ГГц та забезпечує реалізований коефіцієнт підсилення понад 7 дБі в робочому діапазоні частот. Спочатку була

розроблена звичайна 48-дипольна друкована LPDA з коефіцієнтом масштабування ( $\tau$ ) 0,935 і коефіцієнтом розносу ( $\sigma$ ) 0,174 з метою досягнення спрямованості на рівні 9,5 дБі. Однак у спробі скоротити загальну довжину антени фактор відстані був зменшений з 0,174 до 0,06 з метою досягнення зменшення розміру довжини елемента антени на 20%, зменшивши таким чином довжину друкованої LPDA з 321 мм до 268 мм. Додатково, для скорочення загальної ширини антени, елементи з верхнім навантаженням у Т-подібній формі та елементи з верхнім навантаженням у формі капелюшка були впроваджені на кінцях останніх шести найдовших диполів. Цей метод дозволив зменшити загальну ширину антени на 27%. Загальний розмір антени 268 мм  $\times$  194 мм (довжина  $\times$  ширина) антени був досягнутий після впровадження цього методу. Дослідження, представлене в цій статті, також демонструє, що за однакової фізичної довжини резонанс на найнижчій робочій частоті прямого монополю може бути знижений за допомогою елементів верхнього навантаження у Т-подібній формі. Резонанс у нижній смузі частот, отриманий шляхом введення Т-подібних навантажених елементів, може бути додатково знижений шляхом введення вертикальних частин, щоб зробити його елементом, навантаженим верхньою частиною. Простий аналіз, що підтримує цей метод, був продемонстрований у [25] шляхом проектування прямого монополю, який резонує на частоті 1 ГГц. Після введення Т-подібного навантаженого елемента та капелюшного навантаженого елемента до прямого монополю резонанс змістився з 1 ГГц до 0,8 ГГц і 0,7 ГГц відповідно. Таким чином, введення елемента верхнього навантаження у формі капелюшка замість використання прямого монополю для отримання резонансу на частоті 0,7 ГГц дало змогу отримати зменшення розміру на 35%. Однак обмеженням таких методів навантаження є те, що стає важко досягти максимальної смуги пропускання імпедансу через відносно вищий Q-фактор. З цієї причини

виникає потреба в методах розширення смуги пропускання, які будуть представлені в мініатюрній версії друкованої LPDA.

Знову ж таки, в [25] розширення смуги пропускання для мініатюрної друкованої LPDA досягається шляхом введення меандрованої лінії живлення, трапецієподібного резистивного штекера для модифікованих диполів і балуна у формі стріли біля живлення антени. На рисунку 3.1 показано схематичну діаграму реалізованих методів навантаження капелюха, а також методів Т-подібного навантаження до друкованої LPDA антени в [25].

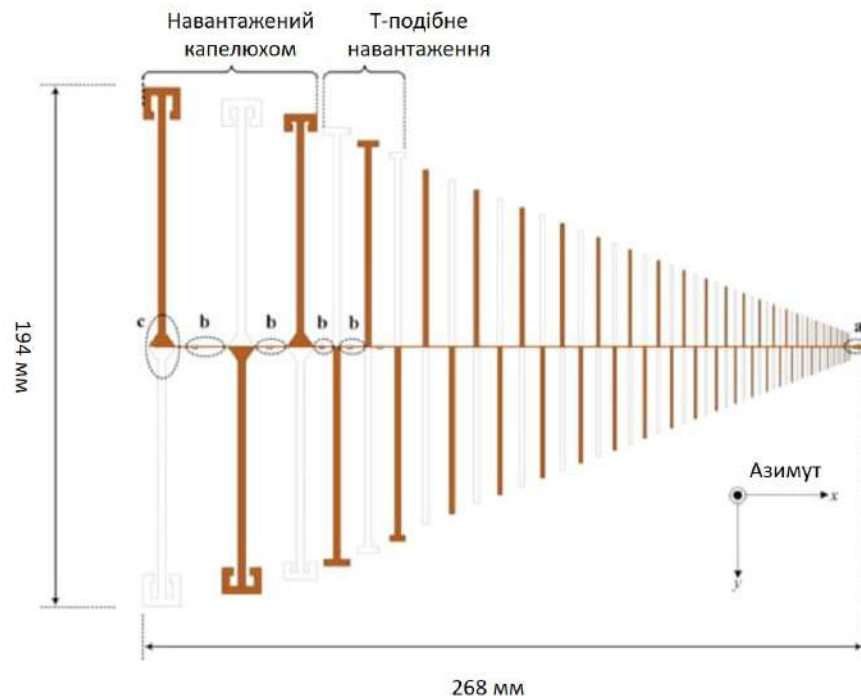


Рисунок 3.1 – Конструкція друкованої LPDA антени із реалізованими методами навантаження у формі капелюшка і Т-подібного навантаження

Інше дослідження представляє друковану LPDA антену, яка працює в діапазоні частот від 8 ГГц до 18 ГГц [26]. У цьому дослідженні до диполя, який виступає в якості індуктивного навантаження, вводяться фасетовані елементи (елементи з відсіченими кутами) верхнього навантаження у С-подібній формі. Це дослідження вказує на можливість зменшення розміру звичайної друкованої LPDA антени на 60%.

Була розроблена мініатюризowana 13-дипольна друкована LPDA з С-подібним навантаженням, загальний розмір якої становив 33 мм × 9 мм (довжина × ширина) і яка може забезпечити реалізований коефіцієнт підсилення від 6,1 дБі до 7,1 дБі в робочому діапазоні частот [26]. На рисунку 3.2 показано вид зверху САD-моделі друкованої LPDA з С-подібним методом навантаження, реалізованим у [26].

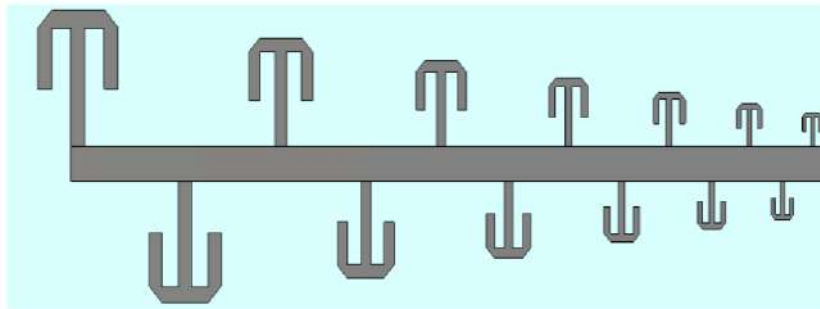


Рисунок 3.2 – Конструкція друкованої LPDA з реалізованою С-подібним методом верхнього навантаження

Унікальний варіант Т-подібного верхнього навантаження у вигляді дугового Т-подібного навантаження представлено в [27]. У цьому дослідженні представлено LPDA, що працює в діапазоні частот від 0,82ГГц до 2,09 ГГц із середнім реалізованим підсиленням 5 дБі. У цьому дослідженні стверджується, що довжини диполя зменшилися на 55%. Коефіцієнт відбиття антени значною мірою залежить від радіуса дугоподібного диполя, тому необхідно провести оптимізацію радіуса дуги, щоб вибрати правильний радіус для необхідної конструкції. Таким чином, подібний підхід може бути використаний для розробки друкованої LPDA. На рисунку 3.3 показана реалізація Т-подібного навантаження по дузі окружності, реалізована на LPDA антену в [27].

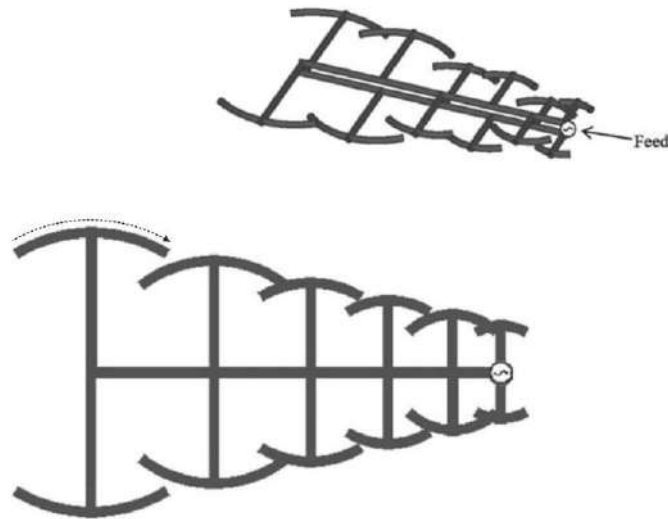


Рисунок 3.3 – Конструкція друкованої LPDA з Т-подібним навантаженням по дузі окружності

Цікаве дослідження щодо зменшення ширини друкованої LPDA представлено в [28], де друковану LPDA розроблено для роботи в діапазоні частот від 2,3 ГГц до 8 ГГц із середнім підсиленням 5–6 дБі. Спочатку дев'ятидипольна звичайна друкована LPDA розроблена для роботи в діапазоні від 2,3 ГГц до 8 ГГц. Загальні розміри цієї звичайної конструкції друкованої LPDA становлять 120 мм × 90 мм (довжина × ширина). Розмір цієї звичайної друкованої LPDA було зменшено шляхом модифікації прямих диполів у Т-подібні диполі таким чином, що загальна довжина диполя не змінюється. Цей метод забезпечує 50% зменшення поперечного розміру звичайної друкованої LPDA, завдяки чому досягаються розміри 125 мм × 45 мм. Розмір модифікованої друкованої LPDA був додатково зменшений шляхом введення подвійних Т-подібних диполів таким чином, щоб загальна довжина залишалася такою ж, як у прямого диполя. За допомогою цієї методики спостерігалось зменшення розміру модифікованих дипольних елементів на 54% порівняно з оригінальними дипольними елементами. Загальний розмір цієї модифікованої конструкції друкованої LPDA з подвійним Т-подібним верхнім навантаженням становив 125 мм × 38 мм.

### 3.2 Фрактально-ітераційний метод

Альтернативний підхід до мініатюризації друкованої LPDA, подібний до підходу верхнього навантаження, передбачає, що диполь складається з фрактальних форм таким чином, що загальна довжина шляху струму збільшується. Можна використовувати декілька фрактальних форм, як запропоновано в [29]. Крім того, інші фрактальні форми, такі як фрактал Мінковського [30], фрактал Квазі-Мінковського [31], фрактал Коха [32], трикутний фрактал Коха [33], квадратний фрактал замка [33], фрактал дерева [33], фрактал Пеано [33] і меандр [33] широко використовуються для мініатюризації розмірів антени.

Детальне порівняння друкованої LPDA з різними фрактальними формами та різною кількістю ітерацій подано в [33] для застосувань у ширококутових системах передачі даних. Додатково, в даному посиланні також пропонується нова конструкція друкованої LPDA зі звивистими ділянками Пеано на краях відсічених ромбовидних гілок і спіральними пазами, яка може працювати в надширококутовому діапазоні частот від 3,1 ГГц до 10,6 ГГц з відхиленням смуги на частотах 5,8 ГГц та 8,3 ГГц. Запропонована друкована LPDA також забезпечує коефіцієнт підсилення більше 5 дБі в робочому діапазоні частот та призводить до мініатюризації звичайної друкованої LPDA на 11,1%.

Порівняння кількох фрактальних методів і відсоток їх мініатюризації наведено в таблиці 3.1. На рисунку 3.4 показано вид зверху моделі САД конструкції друкованої LPDA з ромбічними диполями, закінченими фракталами Пеано другого порядку.

Порівняння друкованої LPDA з різними формами фракталів

Метод живлення	Фрактальна пропускна здатність	Фрактальна форма	Мініатюризація
Мікросмугова лінія	47%	Фрактал Коха	12%
Мікросмугова лінія	67%	Меандрова лінія	21%
Мікросмугова лінія	67%	Нерівномірна лінія	32%
НМПІХ	109%	Трикутний фрактал Коха	11.9%
НМПІХ	109%	Квадратний фрактал Коха	10.3%
НМПІХ	109%	Фрактал дерева – перша ітерація	27.1%
НМПІХ	109%	Фрактал дерева – друга ітерація	35.1%
НМПІХ	109%	Фрактал Пеано в ромбі LPDA	11.1%

НМПІХ – напівмодовий поверхнево-інтегрований хвилевід

Ще одна спроба мініатюризувати звичайну друковану LPDA була продемонстрована в [36] з використанням фракталів Коха другого порядку. Це підсилення показує, як фрактали Коха вищого порядку можна створити за допомогою чотирьох ітерацій. Проте запропонована антена друкованої LPDA використовує фрактали Коха другого порядку для мініатюризації звичайної дев'ятидипольної друкованої LPDA. Запропонована друкована LPDA антена має зменшені розміри 90 мм × 60 мм порівняно зі звичайною друкованою антеною LPDA, розміри якої становили 120 мм × 90 мм. Ця друкована LPDA

антена працює в діапазоні від 2 ГГц до 8 ГГц і має середній коефіцієнт підсилення 5,8 дБі. На рисунку 3.5 показано ітераційний процес, який використовується для отримання фракталів Коха другого порядку в [36].

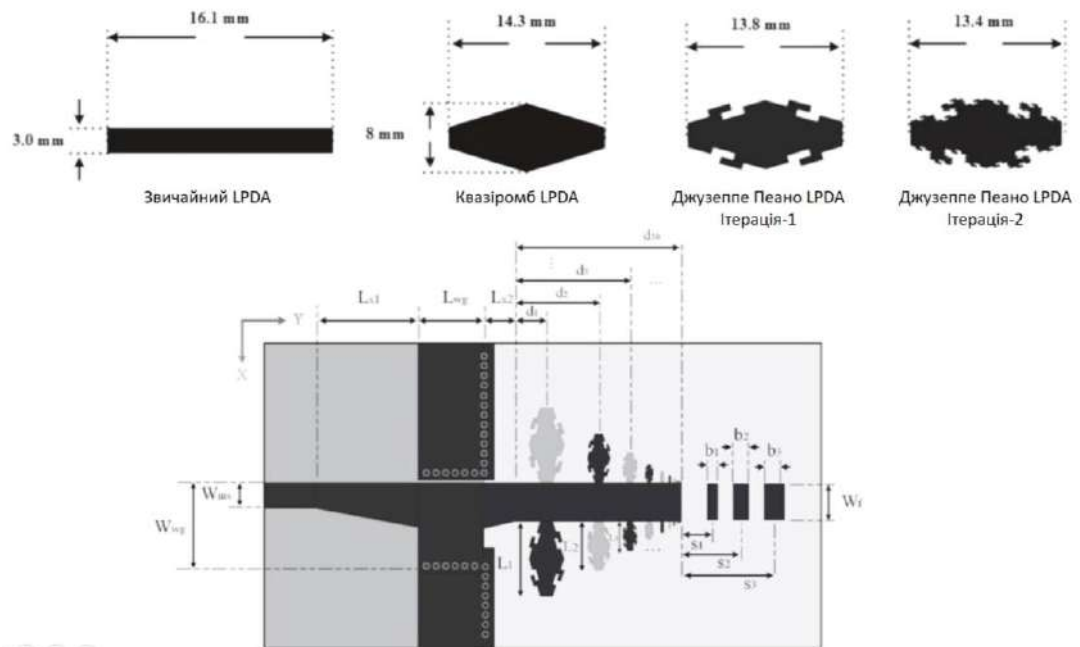


Рисунок 3.4 – Конструкція друкованої LPDA з ромбічними диполями, закінченими за допомогою фракталів Пеано

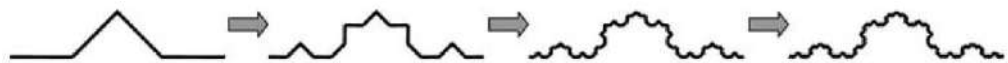


Рисунок 3.5 – Форма фракталів Коха другого порядку, які використовуються як диполі в конструкції друкованої LPDA антени

Цікавий підхід було запропоновано в [37], де замість введення реактивного навантаження була введена концепція нерівномірної лінії передачі (НЛП) з метою мініатюризації звичайної друкованої LPDA. Це було досягнуто за допомогою модуляції імпедансного профілю прямих дипольних елементів у скорочений ряд Фур'є з використанням оптимізованих коефіцієнтів Фур'є. Цей метод дозволив досягнути зменшення розміру прямих

диполів на 32%. Запропонована друкована LPDA з скороченими диполями ряду Фур'є має робочий діапазон частот 2–4 ГГц і забезпечує пікове підсилення 7 дБі. На рисунку 3.6 показано конструкцію друкованої LPDA з модифікованими диполями, досягнутими шляхом оптимізації коефіцієнтів Фур'є [37].

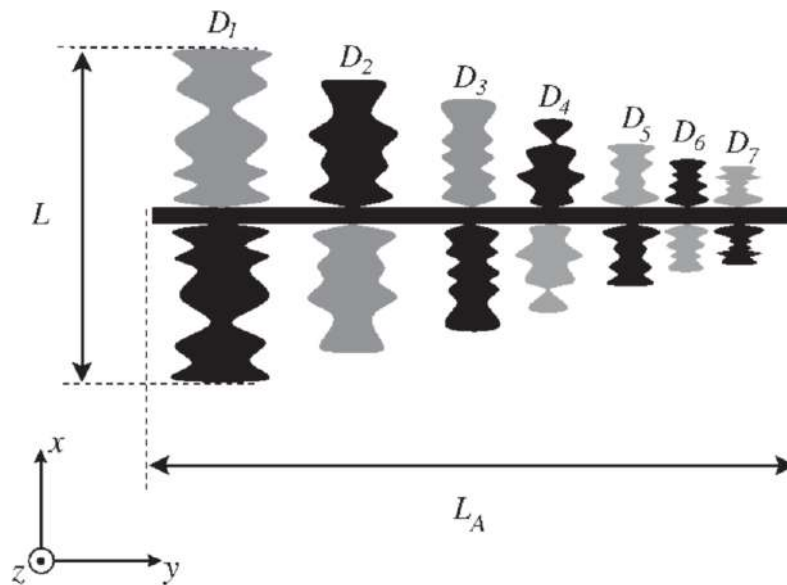


Рисунок 3.6 – Конструкція друкованої LPDA з модифікованими диполями з використанням оптимізованих коефіцієнтів Фур'є

Крім того, автори в [38] представили компактну конструкцію друкованої LPDA з методом зменшення розміру меандрової лінії, яка охоплює більшість частот у надширокопasmовому діапазоні. Проте запропонована в нашій статті антена має ширшу смугу пропускання (включаючи ультрависокочастотний діапазон частот та надширокопasmовий діапазон частот), а також більший коефіцієнт підсилення порівняно з антеною, представленою в [38].

### 3.3 Метод відсіченого елемента

Метод відсіченого елемента (Truncated Boom Technique) – це метод, який використовується для мініатюризації антен.

Більшість методів мініатюризації застосовуються до найдовшого диполя друкованої LPDA, щоб зменшити бічний розмір друкованої LPDA. Наприклад, метод фракталізації Коха в [30,35,39], верхнє навантаження в [25,27,28,40] і метаматеріали в [40,41] в основному застосовуються до довших диполів, так що бічний розмір друкованої LPDA скорочується. Проте в [42] пропонується унікальний і корисний підхід, який можна використати для зменшення осьового розміру друкованої LPDA шляхом зменшення довжини стріли.

Автори в [42] пропонують використовувати двозонні диполі замість однозонних прямих диполів. Таким чином зменшується кількість диполів, які необхідні друкованій LPDA для покриття широкого робочого діапазону, що, у свою чергу, також зменшує довжину штанги. Двохвильовий диполь сконструйований таким чином, що він має напівхвильовий принциповий диполь, який потім навантажується допоміжним диполем, який діє як резистивне навантаження. Потім цей дводіпазонний диполь слідує звичайній моделі друкованої LPDA.

Друкована LPDA, запропонована у [42], складається з 25 дводіпазонних диполів, а антена працює в діапазоні частот від 0,5 ГГц до 10 ГГц. Запропонована конструкція призводить до зменшення загальної осьової довжини друкованої LPDA на 40% порівняно з довжиною звичайної друкованої LPDA. Крім того, кількість диполів, необхідних для досягнення такої ж продуктивності, як 66 диполів, зменшено лише до 25 диполів у запропонованій конструкції друкованої LPDA. Загальна осьова довжина у випадку 66-дипольної звичайної друкованої LPDA склала 364 мм, і вона була зменшена до 218 мм у випадку запропонованої 25-ти дводіпазонної дипольної друкованої LPDA.

Додатково було помічено, що якщо звичайну друковану LPDA такої ж довжини, як запропонована антена друкована LPDA, було б розроблено зі зменшеним фактором відстані, загальна пропускна здатність була б на 58% нижчою, порівняно з запропонованою антеною друкованої LPDA. Загальні розміри запропонованої друкованої LPDA становлять 218 мм × 260 мм (осьова

довжина  $\times$  поперечна довжина). Для запропонованої друкованої LPDA антени використовується підкладка Rogers RO4003 із діелектричною константою 3,55 та товщиною підкладки 0,508 мм. Заявлено, що антена досягає коефіцієнта підсилення 5 дБі в усьому діапазоні частот. Єдиним обмеженням цієї методики є те, що підсилення антени зменшується. Однак для збільшення коефіцієнта підсилення запропонованої друкованої LPDA антени можна використовувати декілька методів підсилення. На рисунку 3.7 показана верхня частина САД-моделі конструкції друкованої LPDA з диполями подвійної смуги з [42].

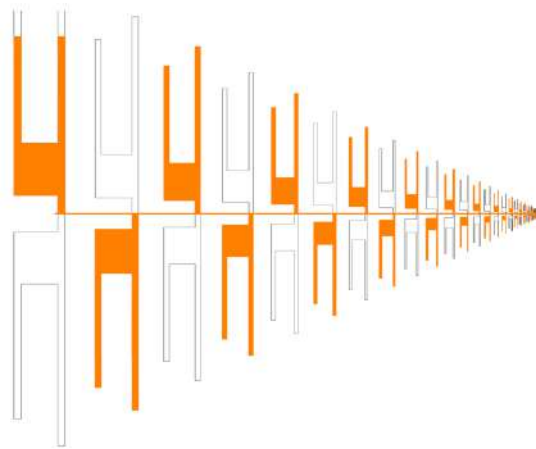


Рисунок 3.7 – Конструкція друкованої LPDA з дводіапазонними диполями

### 3.4 Метод використання рефлектора для підвищення коефіцієнта підсилення

Багато методів мініатюризації призводять до зменшення розмірів антени; проте в декількох випадках після мініатюризації коефіцієнт підсилення антени зменшується. Цікавий підхід представлено в [43], де запропоновано друковану LPDA, яка має робочий діапазон частот від 3,3 ГГц до 20,7 ГГц з середнім коефіцієнтом підсилення 6 дБі. Конструкція друкованої LPDA складається з 17 диполів, які відповідають звичайній конструкції друкованої LPDA. Крім того, після найдовшого диполя з обох боків підкладки, як запропоновано в [43], додається площина заземлення. Ця площина заземлення діє як відбивач і,

отже, забезпечує збільшений коефіцієнт підсилення для антени. Антену виготовлено на підкладці з матеріалу FR-4 з діелектричною константою 4,4 і товщиною підкладки 1,6 мм. Крім того, автори також демонструють цікавий підхід для створення смугового загасання в робочій смузі за допомогою U-подібних вирізів. На елементах антени розміщено U-подібний слот, і його положення оптимізується до отримання необхідного смугового загасання. Конструкція, запропонована в цій роботі, використовує U-подібний слот з розмірами 6,87 мм × 2,6 мм (довжина × ширина), щоб досягнути загасання у діапазоні частоти 5,8 ГГц для WLAN.

Аналогічний підхід для збільшення коефіцієнта підсилення друкованої LPDA запропоновано в [44], де після найдовшого диполя використовується вбудований в підкладку хвилевід (Substrate Integrated Waveguide, SIW).

Подібний підхід для збільшення підсилення друкованої LPDA запропоновано в [44], де інтегрований хвилевід підкладки (Substrate Integrated Waveguide, SIW) використовується після найдовшого диполя. SIW діє як відбивач і призводить до збільшення коефіцієнта підсилення. Крім того, отримано ще більше підвищення коефіцієнта підсилення друкованої LPDA за рахунок додавання паразитних ділянок після кінця найкоротшого диполя, які сприяють підсиленню антени. Цей підхід передбачає ідею поєднання переваг логперіодичних антен і антен квазі-Ягі.

Запропонована антена призначена для роботи в діапазоні від 40 ГГц до 50 ГГц і, крім того, стверджується, що вона досягає коефіцієнта підсилення від 9 до 12,6 дБі. Метод поєднання квазі-Ягі та логперіодичних конструкцій забезпечує підвищення коефіцієнта підсилення приблизно від 2,5 дБ до 3,4 дБ порівняно зі звичайною друкованою антеною LPDA [44].

### 3.5 Метод діелектричного навантаження

Новий та корисний підхід до мініатюризації звичайної друкованої LPDA антени за допомогою двохступеневих діелектричних матеріалів,

використовуючи метод діелектричного навантаження, представлено у статті [45]. Дана друкована LPDA працює в діапазоні частот від 200 до 803 МГц і забезпечує коефіцієнт підсилення більше 4 дБі. Конструкція, запропонована у цьому дослідженні, передбачає використання 22-синусоїдальних диполів замість прямих диполів, як показано на рисунку 3.8. Причиною використання синусоїдальних диполів є те, що вони забезпечують розширені шляхи для струму і можуть також резонувати на нижчих частотах порівняно з прямими диполями.

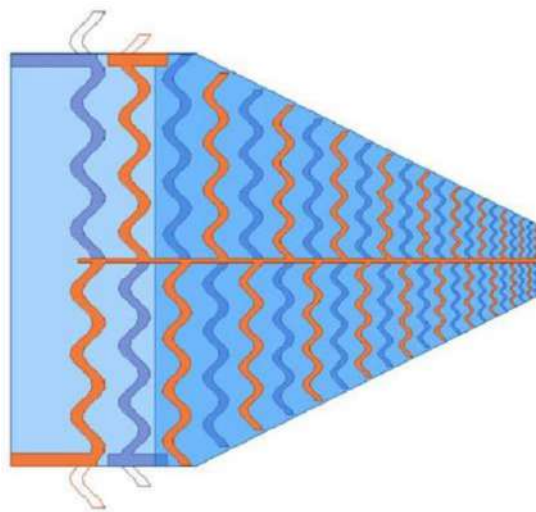


Рисунок 3.8 – Конструкція друкованої LPDA з методом діелектричного навантаження

Для виготовлення антени використовується поліфенова підкладка з діелектричною проникністю 2,55 і тангенсом втрат 0,0011. Товщина цієї підкладки становить 3 мм. Унікальність цієї конструкції полягає в тому, що вона містить шар повітря товщиною 2 мм, який частково завантажений у цю підкладку. Додаткове зменшення розміру антени досягається завдяки використанню двоступеневого діелектричного матеріалу з діелектричною проникністю 10 і тангенсом втрат 0,0035, який використовується для покриття антени з обох сторін. Крім того, чотири паразитні елементи додані на кінці перших двох синусоїдальних диполів, щоб реалізувати метод ємнісного навантаження для зменшення розміру антени.

Загальний розмір цієї антени становить  $576,6 \text{ мм} \times 420 \text{ мм} \times 29,6 \text{ мм}$  (довжина  $\times$  ширина  $\times$  товщина). Оскільки ця антена має високу потужність, вона може знайти застосування в бортових платформах

### 3.6 Диполь зі складеною плоскою спіраллю

Були успішні спроби мініатюризувати друковану антену LPDA, замінюючи прямі диполі на диполі іншого розміру та/або форми, щоб зменшити бічний розмір антени. Однак більшість цих прийомів призводять до погіршення коефіцієнта підсилення. Подібний, але корисний підхід запропоновано в [46], де прямі диполі замінені диполями зі складеною плоскою спіраллю (FPH), як показано на рисунку 3.9. Впровадження цієї методики призводить до зменшення розміру диполя на 39%. Крім того, це призводить до погіршення коефіцієнта підсилення всього на 0,2 дБ, що значно менше порівняно з іншими методами мініатюризації. Запропонована друкована LPDA антена має робочий діапазон частот від 400 до 800 МГц.

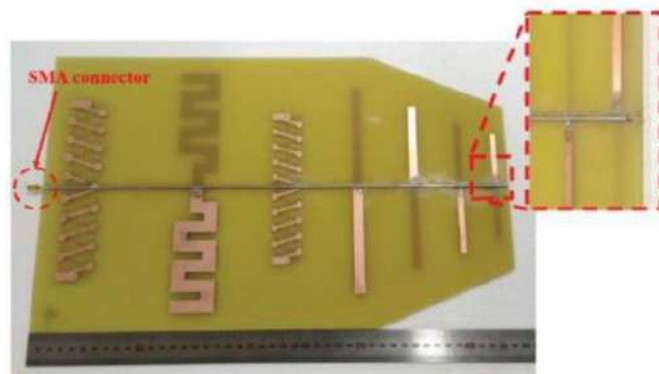


Рисунок 3.9 – Конструкція друкованої LPDA з двома складеними плоскими спіральними диполями

Початкова конструкція була досягнута шляхом заміни найдовшого прямого диполя на диполь зі складеною плоскою спіраллю, що призвело до зменшення розміру на 18,2%. Однак, коли використовувалися два диполі зі складеною плоскою спіраллю, розмір було додатково зменшено, і було

отримано загальне зменшення на 39% порівняно зі звичайною друкованою LPDA. Цей метод також дозволяє покращити у відношенні спереду до тилу антени та досягає коефіцієнта підсилення 5,5 дБі. Обидві запропоновані антени розроблені на підкладці FR4 з діелектричною проникністю 4,4 і товщиною підкладки 3,2 мм.

Габаритні розміри запропонованої друкованої LPDA з використанням меандрового диполя між двома дипольними елементами зі складеною плоскою спіраллю складають 445 мм × 273 мм × 3,2 мм.

### 3.7 Висновок до третього розділу

У цьому розділі дипломної роботи були досліджені і представлені різні методи мініатюризації для зменшення розміру друкованих LPDA. Висвітлені методи включали в себе використання верхнього навантаження, фрактально-ітераційний метод, метод відсіченого елемента, використання рефлектора для підвищення коефіцієнта підсилення, заземлення рефлектора для підвищення підсилення, діелектричне навантаження та диполь зі складеною плоскою спіраллю.

Ці методи дозволили зменшити розміри LPDA, що має важливе значення для застосувань, де обмежені просторові розміри є ключовим фактором. Зменшення розмірів антен допомагає покращити їхню придатність до різних застосувань і розширює можливості їх використання в обмежених просторах. Такі підходи до мініатюризації антен мають практичне застосування та сприяють розвитку бездротових комунікаційних систем і радіоспостереження.

## 4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ШИРОКОСМУГОВОЇ ДРУКОВАНОЇ ЛОГПЕРІОДИЧНОЇ ДИПОЛЬНОЇ АНТЕНИ

У сучасному світі, зростаючий обсяг бездротових технологій та систем зв'язку вимагає антен, які можуть працювати на різних частотних діапазонах та в різноманітних умовах. Однак для багатьох застосувань, таких як системи безпілотних літальних апаратів, високочастотні бездротові системи та інші, важливими є компактні розміри антени. Розмір антени може бути критичним у випадках, коли обмежені просторові ресурси. Такі вимоги ставлять під сумнів застосування традиційних антен, зокрема, антен типу логарифмічна періодична дипольна антена (LPDA), які можуть бути великими на низьких частотах.

З метою вирішення цього завдання проведено ряд досліджень та розробок, спрямованих на мініатюризацію антен типу LPDA. Однією зі способів досягнення компактності антен є проектування друкованих LPDA антен. Цей підхід має численні переваги, включаючи можливість мініатюризації та зниження витрат на виготовлення. У даному розділі розглянуто питання проектування та реалізації широкосмугових друкованих LPDA антен з метою вирішення вимог щодо компактності та ефективності.

### 4.1 Огляд моделювання надширокосмугових антен

Аналізуючи антену у якості елемента, розробник з радіочастот (РЧ) звертає увагу на такі характеристики, як діаграма напрямленості, спрямованість, підсилення, апертура, ефективність та поляризація. Однак, у випадку розгляду антени як компонента радіочастотної схеми, розробник РЧ схеми більше цікавиться її вхідним опором, коефіцієнтом відбиття та коефіцієнтом стоячої хвилі напруги. Беручи до уваги вузькосмугові системи, усі ці характеристики можна вважати незалежними від частоти, тобто постійними для використовуваного діапазону частот. Тоді як у

широкосмугових системах звичайні властивості стають сильно залежними від частоти. Отже, однією з важливих особливостей UWB-антен є те, що вони вносять деяку дисперсію імпульсів завдяки своїм частотно-чутливим характеристикам. Особливо щодо застосування імпульсного радіо, антени є критично важливими компонентами, оскільки форми випромінюваного та отриманого імпульсу спотворюються.

Було введено нові параметри для врахування перехідних випромінювань і виявлення ефектів зміни фази. Ефективну довжину антени можна вважати для визначення характеристик імпульсного випромінювання та прийому антен. Нещодавно, з появою технології UWB, передавальним функціям у частотній області та відповідній імпульсній відповіді у часовій області, отриманій із ефективною довжиною антени, віддали перевагу для опису цих характеристик.

Потім антена моделюється як система з лінійним інваріантом у часі (LTI), продуктивність якої впливатиме на загальну продуктивність системи бездротового зв'язку. Було запропоновано різні визначення параметрів, залучених до отримання функцій передачі передавання та прийому. На практиці передатні функції виводять із змодельованого або вимірюваного комплексного параметра розсіювання, тобто коефіцієнта пропускання  $S_{21}$ . Векторний мережевий аналізатор (VNA) зазвичай використовується в частотній області, а додаткова обробка дозволяє оцінити вимірювання у часовій області. Слід зазначити, що вимірювання у часовій області можливе, але відповідне калібрування не завжди добре встановлено, однак було продемонстровано, що два підходи є квазіеквівалентними.

У літературі в статтях, які представляють нові UWB антени, пропонуються не тільки конструктивні аспекти та звичайні характеристики, але також, дедалі більше, характеристика у часовій області, щоб підтвердити здатність антени передавати короткі імпульси та приймати ці імпульси з низьким спотворенням. Крім того, параметри продуктивності (наприклад, коефіцієнт точності та повна ширина на половині максимуму), видані для

функції передачі або імпульсної характеристики, були введені для кількісної оцінки та аналізу ефективності збереження імпульсу UWB антен.

Однією з проблем багатьох опублікованих вимірювань розповсюдження було те, що ефект антени неявно включений у вимірювання, але явно не дозволено в аналізі каналу, наприклад, стандартна модель IEEE 802.15.3a. Таким чином, розгляд ефектів антени з метою аналізу або оцінки продуктивності системи UWB також передбачав впровадження моделей антени на основі функції передачі або імпульсної характеристики.

З іншого боку, багато досліджень присвячено підходам до моделювання UWB антен безпосередньо в симуляторах радіочастотних схем, щоб імітувати роботу схеми з включеними антенами. Для UWB антен була запропонована перехідна модель з використанням каскадних ідеальних ліній передачі. Деміркан і Спенс представили загальний метод моделювання довільних UWB антен безпосередньо в симуляторах радіочастотних схем.

Підхід моделювання антени також базується на вимірюваннях S-параметрів. Нарешті, останні дослідження показали, що параметричне моделювання може покращити моделювання. Аналітичні та компактні вирази функцій передачі та імпульсних характеристик можна обчислити за допомогою моделювання або вимірювань. Параметричні методи базуються на методі розширення сингулярності (SEM), який забезпечує набір полюсів і залишків.

Щодо антен MIMO, у випадку вузькосмугових, для характеристики фізичних ефектів можна використовувати різні параметри: параметри розсіювання, кореляцію огинаючої та загальний коефіцієнт активного відбиття. Однак ці описи не є повністю адекватними при дослідженні UWB систем. Деякі роботи пропонують додаткові заходи, присвячені антенним системам MIMO-UWB, щоб покращити ефект взаємного зв'язку. Вплив зв'язку масиву UWB було досліджено за допомогою загальних виразів для коефіцієнта активного масиву у часовій області та коефіцієнта активного елемента. Було проаналізовано взаємодію між радіаторами в біконічній

решітці UWB. Розсіювання та зв'язок розрізняються, і вводиться коефіцієнт розсіювання, нехтуючи кривизною падаючої хвилі та ефектами ближнього поля, але дозволяючи передбачити характеристики кількох антен. Було представлено метод порівняння систем із подвійною антеною шляхом введення контрольного посилення рознесеності. Було вивчено модель сполучених антен, щоб інтегрувати ефекти зв'язку між антенами в модель каналу розповсюдження, отриману за допомогою трасування променів або асимптотичних методів. З параметрів розсіювання вводиться матриця зв'язку, і цей підхід підтверджується для випадку канонічних антен і UWB антен.

#### 4.2 Конструкція звичайної друкованої логперіодичної дипольної антени для діапазону частот від 0,7 ГГц до 8 ГГц

У цьому розділі представлено широкосмугову друковану антену LPDA з 25 диполями, яка має робочий діапазон від 0,7 ГГц до 8 ГГц. Розміри антени для друкованої LPDA були отримані з використанням звичайних рівнянь LPDA, введених Каррелом [19, 20], а потім обчисленням розмірів з урахуванням відносної діелектричної проникності підкладки антени. Принципова схема звичайної LPDA антени показана на рисунку 4.1.

Кут при вершині – це половина кута, у якому розташовані всі диполі, і він математично виражається як

$$\alpha = \tan^{-1} \left[ \frac{1 - \tau}{4\sigma} \right]. \quad (4.1)$$

У наведеному вище виразі параметр  $\tau$  називається «коефіцієнтом масштабування» і є відношенням довжин або діаметрів двох послідовних диполів, як показано в наступному виразі:



до звичайних LPDA, ця друкована LPDA також складається з диполів, які розташовані в зростаючому порядку від передньої до задньої частини антени. Єдина відмінність полягає в тому, що діелектрична підкладка (FR4) з відносною діелектричною проникністю 4,3 присутня між верхньою та нижньою частиною, а не в повітрі. Таким чином, можна припустити, що верхня частина та диполі, прикріплені до неї, вбудовані у верхню частину підкладки, тоді як нижня частина та диполі, прикріплені до нижньої частини підкладки. Товщина підкладки становить 1 мм. Живлення антени забезпечується за допомогою коаксіального кабелю, який підключений до верхньої штанги. Провідна частина кабелю приєднується на початок нижньої штанги. Габаритні розміри запропонованої антени: 250 мм × 170 мм × 1 мм (довжина × ширина × товщина). Змодельована модель антени показана на рисунку 4.2.

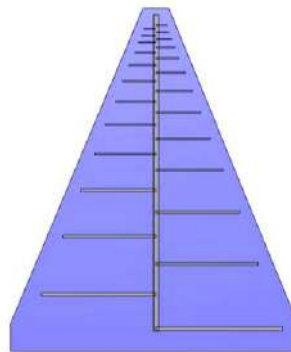


Рисунок 4.2 – Модель CST звичайної друкованої LPDA антени

Модель CST складалася з 83 184 192 шестикутних елементів сітки з найменшим розміром елемента 0,35 мм. Моделювання цієї моделі було виконано в часовій області з точністю  $-50$  дБ і апаратним прискоренням за допомогою графічного процесора Nvidia GP100. Розміри цієї антени наведено в таблиці 4.2. Де

$L_n$  – довжина  $n$ -го диполя;

$s_n$  – відстань між  $n$ -м та  $(n+1)$ -м диполем;

$d_n$  – ширина  $n$ -го диполя;

L-подібний профіль – довжина профілю;

W-подібний профіль – ширина профілю;

H-подібний профіль – товщина профілю (еквівалент товщини мідного покриття у цьому випадку).

Таблиця 4.2

## Розміри звичайної друкованої LPDA антени

Параметри	Значення	Параметри	Значення	Параметри	Значення
L1	5 мм	L14	22 мм	d1	0.5
L2	5.5 мм	L15	25 мм	d2	0.5
L3	6 мм	L16	28 мм	d3	0.5
L4	7 мм	L17	30.5 мм	d4	0.5
L5	8 мм	L18	34.5 мм	d5	0.5
L6	9 мм	L19	38 мм	d6	0.6
L7	10 мм	L20	43 мм	d7	0.7
L8	11 мм	L21	48 мм	d8	0.8
L9	12 мм	L22	53 мм	d9	0.9
L10	14 мм	L23	59 мм	d10	1 мм
L11	16 мм	L24	66 мм	d11	1 мм
L12	18 мм	L25	73 мм	d12	1 мм
L13	20 мм	s13	7 мм	d13	1 мм
s0	7 мм	s14	7 мм	d14	1 мм
s1	2 мм	s15	8 мм	d15	1 мм
s2	2 мм	s16	9 мм	d16	1 мм
s3	2 мм	s17	10 мм	d17	1 мм
s4	2 мм	s18	11 мм	d18	1 мм
s5	2 мм	s19	13 мм	d19	1 мм
s6	3 мм	s20	14 мм	d20	1.5 мм
s7	3 мм	s21	16 мм	d21	2 мм

Параметри	Значення	Параметри	Значення	Параметри	Значення
s8	3.5 мм	s22	18 мм	d22	2 мм
s9	4 мм	s23	20 мм	d23	2 мм
s10	4.5 мм	s24	22 мм	d24	2.5 мм
s11	5 мм	L-профіль	230 мм	d25	3 мм
s12	6 мм	H-профіль	35 $\mu$ m	W-профіль	3 мм

Вимірювання підсилення здійснювалися за допомогою методу двох антен, де дві ідентичні антени використовувалися для вимірювання коефіцієнта  $S_{12}$  від однієї антени до іншої.

На рисунку 4.3 представлено коефіцієнт відбиття запропонованої конструкції антени. На графіку видно, що антена має низький  $S_{11}$  нижче  $-10$  дБ у всьому робочому діапазоні частот від 0,7 ГГц до 8 ГГц. Таким чином, антена досягає хорошого узгодження. Крім того, графік також свідчить про те, що змодельовані результати загалом добре узгоджуються з вимірюваннями.

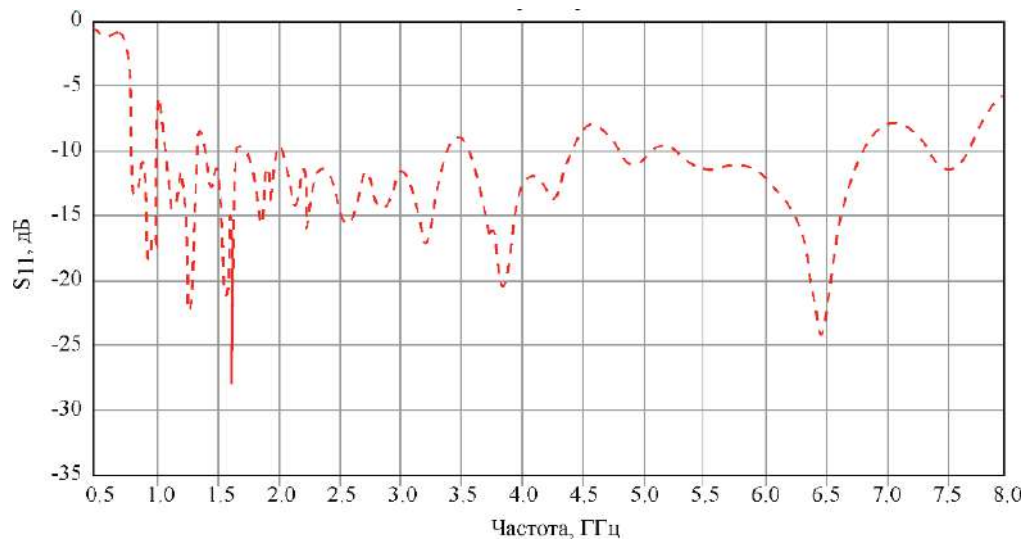


Рисунок 4.3 – Моделювання конструкції друкованої LPDA антени

На рисунку 4.4 представлено змодельоване підсилення антени. Антена досягає рівного підсилення приблизно 5,5 дБі в робочому діапазоні частот.

Змодельовані результати добре узгоджуються. Коефіцієнт підсилення антени вимірювали методом двох антен.

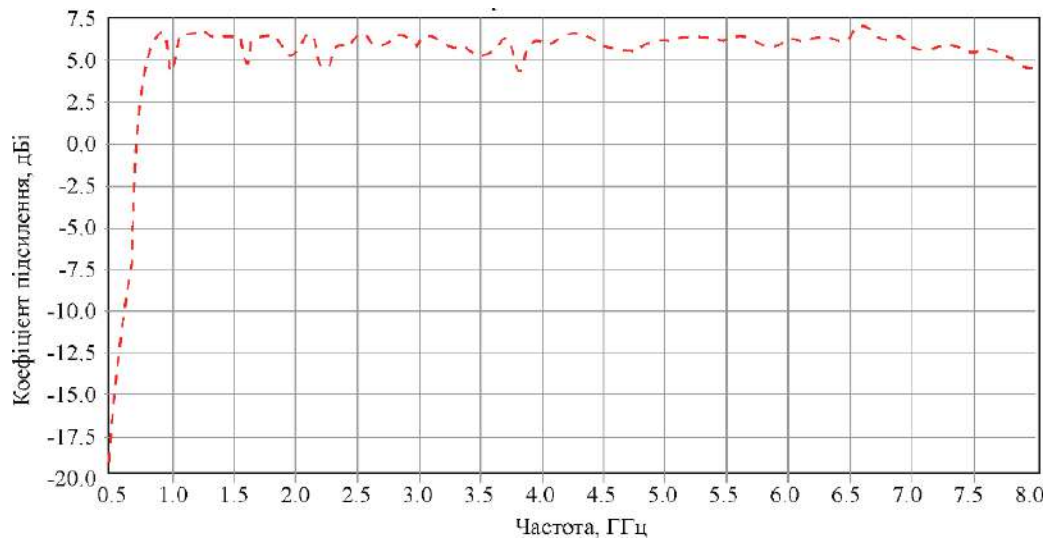


Рисунок 4.4 – Моделювання реалізованого підсилення антени типу друкованої LPDA

4.3 Конструкція друкованої логперіодичної дипольної антени з розширеною низькочастотною характеристикою для діапазону частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц

Для розширення нижньої робочої частоти антени, запропоновано новий варіант антени, яка працює в діапазоні частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц. З принципу роботи звичайних антен типу друкованої LPDA антени очевидно, що продуктивність антени на нижчих частотах залежить від декількох найдовших диполів. Отже, найдовший прямий диполь було замінено на трикутний диполь для збільшення підсилення та ширини смуги антени. З введенням цього нового типу диполя було виконано оптимізацію довжини найдовших чотирьох диполів, трьох інтервалів та чотирьох ширин диполів за допомогою алгоритму Trust Region Framework (TRF) у CST. Проте можливе використання різних інших алгоритмів оптимізації, таких як оптимізація роєм частинок (PSO) у [47,48], PSO<sub>vm</sub> (PSO з мутацією швидкості) у [49,50] та оптимізація за

допомогою інвазивного бур'яну (IWO) у [51,52,53,54]. Крім того, в [55] представлено порівняльне дослідження кількох алгоритмів оптимізації. Крім того, у [55] представлено порівняльне дослідження кількох алгоритмів оптимізації. Цілі оптимізації були встановлені для отримання значень S11 нижче -12 дБ і вищого підсилення понад 5,5 дБ у діапазоні частот від 0,4 ГГц до 1,2 ГГц. Решта диполів і частот, які не були враховані в процесі оптимізації, практично не впливають на частоти вище 1,2 ГГц, оскільки враховано лише розміри чотирьох найдовших диполів. Задачі оптимізації можна чітко побачити у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

## Цілі оптимізації

Параметри	Цілі	Частота	вага
S11	<-12 дБ	0.4 ГГц–1.2 ГГц	5.0
Підсилення	>5 дБі	0.4 ГГц–1.2 ГГц	5.0

На рисунку 4.5 показана модель CST оптимізованої антени. Модель складалася з 92 452 080 елементів шестигранної сітки з найменшим розміром одиниці сітки 0,35 мм. Моделювання проводилося у часовій області з точністю до -50 дБ. Загальні розміри оптимізованої друкованої LPDA антени становлять 270 мм × 279 мм × 1 мм (довжина × ширина × товщина). Якби така сама антена була розроблена з використанням звичайних рівнянь проектування друкованої LPDA антени, загальні розміри цієї антени були б приблизно 380 мм × 300 мм × 1 мм. Таким чином, очевидно, що довжина покращеної друкованої LPDA зменшена на 29% порівняно зі звичайною друкованою LPDA, розробленим для того самого діапазону частот.

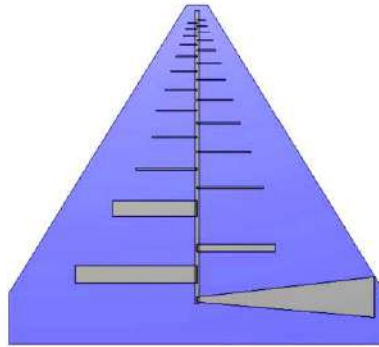


Рисунок 4.5 – Модель CST запропонованої антени типу друкованої LPDA антени

Крім того, розміри вдосконаленої друкованої LPDA антени наведено в таблиці 4.4.

Рисунок 4.6 демонструє модель  $S_{11}$ , яка була симульована для запропонованої антени типу друкованої LPDA антени. Це свідчить про те, що антена має хороше узгодження з низькими значеннями  $S_{11}$  нижче  $-10$  дБ у більшій частині діапазону робочих частот. На деяких частотах потрібні подальші вдосконалення.

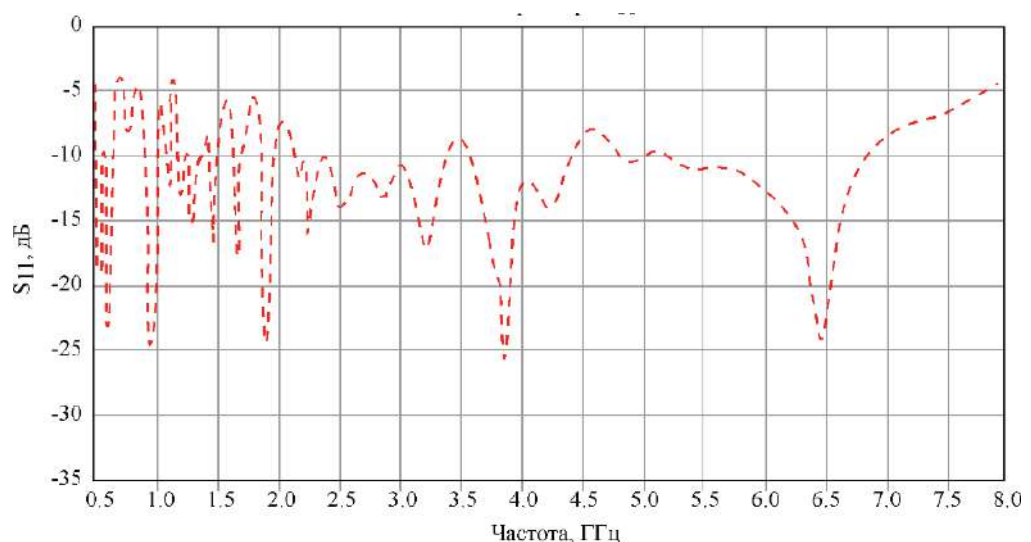


Рисунок 4.6 – Графік  $S_{11}$  для вдосконаленої конструкції друкованої LPDA антени

Розміри вдосконаленої друкованої LPDA антени

Параметри	Значення	Параметри	Значення	Параметри	Значення
L1	5 мм	L14	22 мм	d1	0.5
L2	5.5 мм	L15	25 мм	d2	0.5
L3	6 мм	L16	28 мм	d3	0.5
L4	7 мм	L17	30.5 мм	d4	0.5
L5	8 мм	L18	34.5 мм	d5	0.5
L6	9 мм	L19	38 мм	d6	0.6
L7	10 мм	L20	43 мм	d7	0.7
L8	11 мм	L21	48 мм	d8	0.8
L9	12 мм	L22	60.9 мм	d9	0.9
L10	14 мм	L23	56.5 мм	d10	1 мм
L11	16 мм	L24	88.3 мм	d11	1 мм
L12	18 мм	L25	130 мм	d12	1 мм
L13	20 мм	s13	7 мм	d13	1 мм
s0	7 мм	s14	7 мм	d14	1 мм
s1	2 мм	s15	8 мм	d15	1 мм
s2	2 мм	s16	9 мм	d16	1 мм
s3	2 мм	s17	10 мм	d17	1 мм
s4	2 мм	s18	11 мм	d18	1 мм
s5	2 мм	s19	13 мм	d19	1 мм
s6	3 мм	s20	14 мм	d20	1.5 мм
s7	3 мм	s21	9.5 мм	d21	2 мм
s8	3.5 мм	s22	21.5 мм	d22	12.4 мм
s9	4 мм	s23	11 мм	d23	6.4 мм
s10	4.5 мм	s24	11 мм	d24	13.8 мм
s11	5 мм	L-профіль	230 мм	d25	32.3 мм
s12	6 мм	H-профіль	35 мкм	W-профіль	3 мм

На рисунку 4.7 показано змодельоване реалізоване підсилення запропонованої антени. На графіку видно, що антена забезпечує підсилення понад 5,5 дБі в більшій частині діапазону частот; однак нижчі значення підсилення спостерігаються від 0,4 ГГц до 1 ГГц. Однак реалізований показник підсилення значно вищий у нижніх частотах, ніж у випадку звичайної конструкції з антеною, яка лише трохи довша (270 мм замість 250 мм), але значно ширша (279 мм замість 170 мм). Показники роботи запропонованої антени можуть бути додатково покращені шляхом впровадження інших методів підсилення та повторної оптимізації антени.

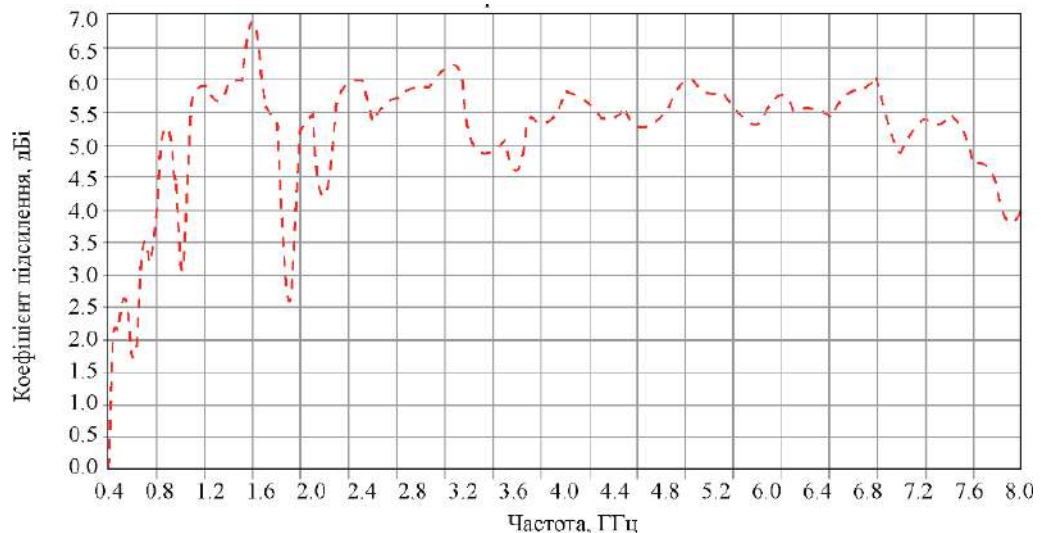


Рисунок 4.7 – Реалізований показник підсилення вдосконаленої конструкції друкованої LPDA антени

На рисунку 4.8 показано співвідношення спереду і ззаду запропонованої конструкції друкованої LPDA антени. Це показує, що антена має високі характеристики спрямованості; однак можна покращити ефективність антени в діапазоні частот від 0,4 ГГц до 0,7 ГГц.

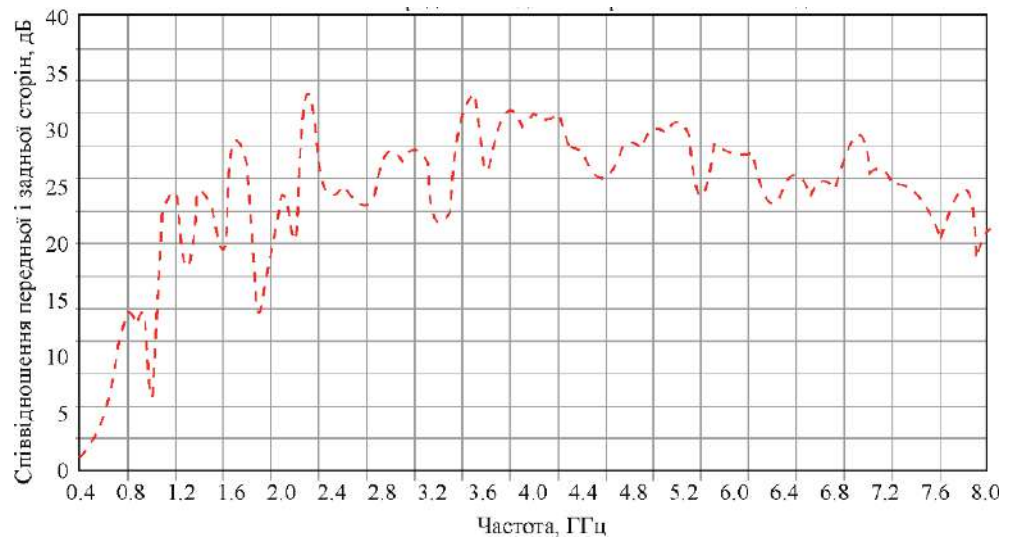


Рисунок 4.8 – Співвідношення спереду та ззаду покращеної конструкції друкованої LPDA антени

На рисунку 4.9 показано полярні графіки змодельованої діаграми спрямованості Е-площини вдосконаленої конструкції друкованої LPDA на (а) 0,4 ГГц, (б) 0,8 ГГц, (в) 2 ГГц, (г) 4 ГГц, (д) 6 ГГц, та (е) 8 ГГц відповідно. Це також свідчить про те, що антена демонструє стабільні діаграми спрямованості у всьому діапазоні частот.

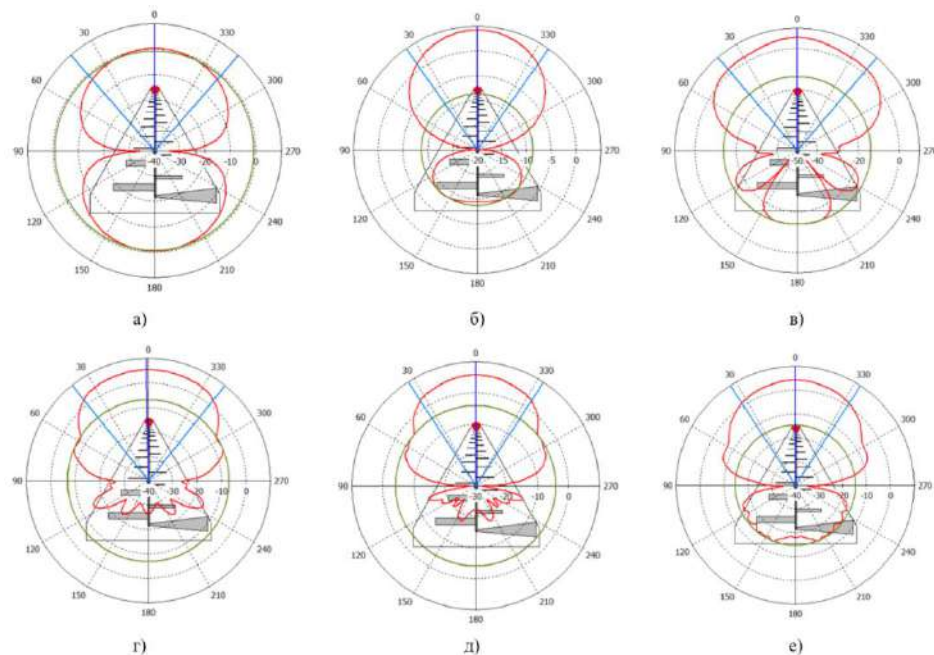


Рисунок 4.9 – Полярні графіки діаграм спрямованості випромінювання запропонованої антени в Е-площині

#### 4.4 Висновок до четвертого розділу

У даному розділі були представлені методи мініатюризації антен із логарифмічною періодичною структурою з метою зменшення їхніх розмірів. Для цього було запропоновано та досліджено дві моделі друкованих PLPDA антен, призначені для роботи у широкому діапазоні частот.

Перша модель представляє собою 25-дипольну друковану LPDA антену, яка забезпечує широкосмуговий діапазон від 0,7 ГГц до 8 ГГц і має коефіцієнт підсилення понад 5,5 дБі. Друга модель є оптимізованою версією першої, в якій використовується трикутний найдовший диполь замість прямого. Ця оптимізація форми та геометричних параметрів диполів дозволила підвищити пропускну здатність антени, забезпечуючи робочий діапазон від 0,4 ГГц до 8 ГГц та підсилення понад 5 дБі більшу частину смуги пропускання.

Отже, проведені дослідження та оптимізація конструкції друкованої LPDA антени дозволили отримати антени зі значними покращеннями в їхніх характеристиках, роблячи їх більш привабливими для високочастотних бездротових систем та інших застосувань

## ВИСНОВКИ

У цій дипломній роботі було проведено дослідження та розглянуто різні аспекти мініатюризації та оптимізації друкованих антен, зокрема антен з логарифмічною періодичною структурою та антен для надширокосмугових технологій.

У першому розділі було надано огляд розвитку антен UWB та їхніх різних конструкцій. Встановлено, що технологія UWB має великий потенціал у бездротовому зв'язку та інших галузях завдяки своїй великій смугі пропускання та низькій споживаній потужності. Науковці продовжують досліджувати нові конструкції та можливості реконфігурації антен для відповіді сучасним вимогам.

Другий розділ розглянув основні принципи логарифмічних антен та надав методологію для їх дослідження. Визначено ключові параметри та розміри, які характеризують логарифмічні антени, і надано методи дослідження цих антен, включаючи використання програмного забезпечення для моделювання та проведення експериментів.

Третій розділ присвячено дослідженню методів мініатюризації для зменшення розміру друкованих LPDA антен. Були розглянуті різні методи, такі як використання верхнього навантаження, фрактально-ітераційний метод, метод відсіченого елемента, використання рефлектора та інші. Ці методи дозволили зменшити розміри антен, зробивши їх більш привабливими для обмежених просторів.

У четвертому розділі були представлені дві моделі друкованої LPDA антени з оптимізованою конструкцією для роботи у широкому діапазоні частот. Оптимізація дозволила підвищити пропускну здатність антен та покращити їхні характеристики.

Загальний висновок цієї дипломної роботи полягає в тому, що дослідження та оптимізація антен є важливим завданням для досягнення нових досягнень та інновацій у бездротових комунікаційних системах та інших галузях. Мініатюризація та оптимізація антен дозволяють покращити їхню продуктивність та адаптувати до конкретних вимог застосувань. Такі дослідження мають важливе значення для подальшого розвитку бездротових технологій та сприяють створенню більш ефективних та компактних антен.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Nadeem, Q.-U.-A., Kammoun, A., Debbah, M., et al.: 'Design of 5G full dimension massive MIMO systems', *IEEE Trans. Commun.*, 2018, 66, pp. 726–740
2. Hayward, S.J.; van Lopik, K.; Hinde, C.; West, A.A. A survey of indoor location technologies, techniques and applications in industry. *Internet Things* 2022, 20, 100608.
3. Jang, B.; Kim, H. Indoor Positioning Technologies without Offline Fingerprinting Map: A Survey. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2018, 21, 508–525.
4. Li, K.-J.; Zlatanova, S.; Torres-Sospedra, J.; Perez-Navarro, A.; Laoudias, C.; Moreira, A. Survey on Indoor Map Standards and Formats. In *Proceedings of the 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Pisa, Italy, 30 September–3 October 2019; pp. 1–8.
5. Che, F.; Ahmed, A.; Ahmed, Q.Z.; Zaidi, S.A.R.; Shakir, M.Z. Machine Learning Based Approach for Indoor Localization Using Ultra-Wide Bandwidth (UWB) System for Industrial Internet of Things (IIoT). In *Proceedings of the 2020 International Conference on UK-China Emerging Technologies (UCET)*, Glasgow, UK, 20–21 August 2020; pp. 1–4.
6. Schroerer, G. A Real-Time UWB Multi-Channel Indoor Positioning System for Industrial Scenarios. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Nantes, France, 24–27 September 2018; pp. 1–5.
7. Cao, B.; Wang, S.; Ge, S.; Ma, X.; Liu, W. A Novel Mobile Target Localization Approach for Complicate Underground Environment in Mixed LOS/NLOS Scenarios. *IEEE Access* 2020, 8, 96347–96362.
8. Guembe, I.P.; Lopez-Iturri, P.; Klaina, H.; Ezker, G.G.; Urdanoz, F.S.D.J.; Cestau, J.L.Z.; Azpilicueta, L.; Falcone, F. Wireless Characterization and Assessment of an UWB-Based System in Industrial Environments. *IEEE Access* 2021, 9, 107824–107841.

9. Pan, Y.; Pan, C.; Zhu, H.; Ahmed, Q.Z.; Chen, M.; Wang, J. Content offloading via D2D communications based on user interests and sharing willingness. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, France, 21–25 May 2017; pp. 1–6.
10. Islam, F.B.; Nwakanma, C.I.; Lee, J.-M.; Kim, D.-S. UWB Sensor Assisted Self-Quarantined Person Health Status Monitoring using LSTM. In Proceedings of the International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju Island, Republic of Korea, 20–22 October 2021; pp. 1750–1753.
11. Du, X.; Liao, X.; Liu, M.; Gao, Z. CRCLoc: A Crowdsourcing-Based Radio Map Construction Method for WiFi Fingerprinting Localization. *IEEE Internet Things J.* 2021, 9, 12364–12377.
12. Own, C.M.; Hou, J.; Tao, W. Signal Fuse Learning Method With Dual Bands WiFi Signal Measurements in Indoor Positioning. *IEEE Access* 2019, 7, 131805–131817.
13. Sadowski, S.; Spachos, P. RSSI-Based Indoor Localization with the Internet of Things. *IEEE Access* 2018, 6, 30149–30161. [Google Scholar] [CrossRef]
14. Yadav, R.K.; Bhattarai, B.; Gang, H.-S.; Pyun, J.-Y. Trusted K Nearest Bayesian Estimation for Indoor Positioning System. *IEEE Access* 2019, 7, 51484–51498.
15. Danis, F.S.; Cemgil, A.T.; Ersoy, C. Adaptive Sequential Monte Carlo Filter for Indoor Positioning and Tracking with Bluetooth Low Energy Beacons. *IEEE Access* 2021, 9, 37022–37038.
16. Kordi, K.A.; Alhammadi, A.; Roslee, M.; Alias, M.Y.; Abdullah, Q. A Review on Wireless Emerging IoT Indoor Localization. In Proceedings of the IEEE 5th International Symposium on Telecommunication Technologies (ISTT), Shah Alam, Malaysia, 9–11 November 2020; pp. 82–87.
17. Alvarez, Y.; Las Heras, F. ZigBee-based Sensor Network for Indoor Location and Tracking Applications. *IEEE Lat. Am. Trans.* 2016, 14, 3208–3214.

18. Shafiq, Y.; Henricks, J.; Ambulo, C.P.; Ware, T.H.; Georgakopoulos, S.V. A Battery-Free Temperature Sensor with Liquid Crystal Elastomer Switching between RFID Chips. *IEEE Access* 2020, 8, 87870–87883.
19. Khadka, G.; Arefin, S.; Karmakar, N.C. Using Punctured Convolution Coding (PCC) for Error Correction in Chipless RFID Tag Measurement. *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* 2020, 30, 701–704.
20. Abdulhadi, A.E.; Denidni, T.A. Self-Powered Multi-Port UHF RFID Tag-Based-Sensor. *IEEE J. Radio Freq. Identif.* 2017, 1, 115–123.
21. Sorrentino, R.; Carobbi, C.; Manara, G.; Michel, A.; Nepa, P. Report on Italian URSI annual meeting 2019 and IEEE RFID-TA 2019. *URSI Radio Sci. Bull.* 2020, 2020, 92–95.
22. Haibi, A.; Oufaska, K.; Yassini, K.E.; Boulmalf, M.; Bouya, M. Systematic Mapping Study on RFID Technology. *IEEE Access* 2022, 10, 6363–6380.
23. Jiang, C.; Chen, S.; Chen, Y.; Liu, D.; Bo, Y. An UWB Channel Impulse Response De-Noiseing Method for NLOS/LOS Classification Boosting. *IEEE Commun. Lett.* 2020, 24, 2513–2517.
24. Tian, Q.; Wang, K.I.-K.; Salcic, Z. Human Body Shadowing Effect on UWB-Based Ranging System for Pedestrian Tracking. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2019, 68, 4028–4037.
25. Otim, T.; Bahillo, A.; Díez, L.E.; Lopez-Iturri, P.; Falcone, F. FDTD and Empirical Exploration of Human Body and UWB Radiation Interaction on TOF Ranging. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2019, 18, 1119–1123.
26. Fan, J.; Awan, A.S. Non-Line-of-Sight Identification Based on Unsupervised Machine Learning in Ultra Wideband Systems. *IEEE Access* 2019, 7, 32464–32471.
27. Jiang, C.; Shen, J.; Chen, S.; Chen, Y.; Liu, D.; Bo, Y. UWB NLOS/LOS Classification Using Deep Learning Method. *IEEE Commun. Lett.* 2020, 24, 2226–2230.

28. Park, J.; Nam, S.; Choi, H.; Ko, Y.; Ko, Y.B. Improving deep learning-based UWB LOS/NLOS identification with transfer learning: An empirical approach. *Electronics* 2020, 9, 1714.
29. Yang, B.; Li, J.; Shao, Z.; Zhang, H. Robust UWB Indoor Localization for NLOS Scenes via Learning Spatial-Temporal Features. *IEEE Sensors J.* 2022, 22, 7990–8000.
30. Fontaine, J.; Ridolfi, M.; Van Herbruggen, B.; Shahid, A.; De Poorter, E. Edge Inference for UWB Ranging Error Correction Using Autoencoders. *IEEE Access* 2020, 8, 139143–139155.
31. Kim, J.-H.; Choi, J.-H.; Park, Y.-H.; Leung, C.K.-S.; Nasridinov, A. KNN-SC: Novel Spectral Clustering Algorithm Using k-Nearest Neighbors. *IEEE Access* 2021, 9, 152616–152627.
32. Gallego, A.-J.; Calvo-Zaragoza, J.; Rico-Juan, J.R. Insights Into Efficient k-Nearest Neighbor Classification with Convolutional Neural Codes. *IEEE Access* 2020, 8, 99312–99326.
33. Tavakoli, E.B.; Beygi, A.; Yao, X. RPKNN: An OpenCL-Based FPGA Implementation of the Dimensionality-Reduced kNN Algorithm Using Random Projection. *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst.* 2022, 30, 549–552.
34. Borges, F.; Fernando, B.; Andrey, P.; Diogo, R.; Tássio, B.; Daniel, P.; Ricardo, M.; Bruno, B.; Danton, F. An Unsupervised Method based on Support Vector Machines and Higher-Order Statistics for Mechanical Faults Detection. *IEEE Lat. Am. Trans.* 2020, 18, 1093–1101.
35. Avolio, M.; Fuduli, A. A Semiproximal Support Vector Machine Approach for Binary Multiple Instance Learning. *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.* 2021, 32, 3566–3577.
36. Rivera-Lopez, R.; Canul-Reich, J. Construction of Near-Optimal Axis-Parallel Decision Trees Using a Differential-Evolution-Based Approach. *IEEE Access* 2018, 6, 5548–5563.

37. Shirakawa, M.; Nakayama, K.; Hara, T.; Nishio, S. Wikipedia-Based Semantic Similarity Measurements for Noisy Short Texts Using Extended Naive Bayes. *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput.* 2015, 3, 205–219.
38. Wisanwanichthan, T.; Thammawichai, M. A Double-Layered Hybrid Approach for Network Intrusion Detection System Using Combined Naive Bayes and SVM. *IEEE Access* 2021, 9, 138432–138450.
39. Rusek, K.; Suárez-Varela, J.; Almasan, P.; Barlet-Ros, P.; Cabellos-Aparicio, A. RouteNet: Leveraging Graph Neural Networks for Network Modeling and Optimization in SDN. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2020, 38, 2260–2270.
40. Rakkiyappan, R.; Cao, J.; Velmurugan, G. Existence and Uniform Stability Analysis of Fractional-Order Complex-Valued Neural Networks with Time Delays. *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.* 2015, 26, 84–97.
41. Sun, J.; Sathasivam, S.; Ali, M.K.B.M. Analysis and Optimization of Network Properties for Bionic Topology Hopfield Neural Network Using Gaussian-Distributed Small-World Rewiring Method. *IEEE Access* 2022, 10, 95369–95389.
42. Han, S.; Kong, G.; Choi, S. A Detection Scheme with TMR Estimation Based on Multi-Layer Perceptrons for Bit Patterned Media Recording. *IEEE Trans. Magn.* 2019, 55, 1–4.
43. Dorantes, N.M.; Mendez, G.M. Non-iterative Radial Basis Function Neural Networks to Quality Control via Image Processing. *IEEE Lat. Am. Trans.* 2015, 13, 3447–3451.
44. Tiemann, J.; Wietfeld, C. Scalability, Real-Time Capabilities, and Energy Efficiency in Ultra-Wideband Localization. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2019, 15, 6313–6321.
45. Li, J.; Peng, Z.; Xiao, B. Smartphone-assisted smooth live video broadcast on wearable cameras. In *Proceedings of the 2016 IEEE/ACM 24th International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*, Beijing, China, 20–21 June 2016; pp. 1–6.
46. Nguyen, C.T.; Van Huynh, N.; Chu, N.H.; Saputra, Y.M.; Hoang, D.T.; Nguyen, D.N.; Pham, Q.; Niyato, D.; Dutkiewicz, E.; Hwang, W.-J. Transfer

Learning for Wireless Networks: A Comprehensive Survey. *Proc. IEEE* 2022, 110, 1073–1115.

47. Ovalle-Magallanes, E.; Aldana-Murillo, N.G.; Avina-Cervantes, J.G.; Ruiz-Pinales, J.; Cepeda-Negrete, J.; Ledesma, S. Transfer Learning for Humanoid Robot Appearance-Based Localization in a Visual Map. *IEEE Access* 2021, 9, 6868–6877.

48. Nguyen, T.T.; Ngo, K.T.; Nguyen, S.; Vo, H.D. A Variability Fault Localization Approach for Software Product Lines. *IEEE Trans. Softw. Eng.* 2022, 48, 4100–4118.

49. Hu, W.; Cao, G. Energy-aware video streaming on smartphones. In *Proceedings of the 2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, Hong Kong, China, 26 April–1 May 2015.

50. Amjad, B.; Ahmed, Q.Z.; Lazaridis, P.I.; Hafeez, M.; Khan, F.A.; Zaharis, Z.D. Radio SLAM: A Review on Radio-Based Simultaneous Localization and Mapping. *IEEE Access* 2023, 11, 9260–9278

51. Ghaseminajm, F.; Alsamdi, M.; Ikki, S.S. Error Bounds for Localization in mmWave MIMO Systems: Effects of Hardware Impairments Considering Perfect and Imperfect Clock Synchronization. *IEEE Syst. J.* 2022, 16, 6350–6359.

52. Xiong, J.; Xiong, Z.; Ding, Y.; Cheong, J.W.; Dempster, A.G. Multihypothesis Gaussian Belief Propagation for Radio Ranging-Based Localization and Mapping. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2022, 71, 1–13.

53. Chen, W.; Childs, J.; Ray, S.; Lee, B.S.; Xia, T. RFID Technology Study for Traffic Signage Inventory Management Application. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2022, 23, 17809–17818.

54. Fereidoony, F.; Chamaani, S.; Mirtaheri, S.A. UWB Monopole Antenna With Stable Radiation Pattern and Low Transient Distortion. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2011, 10, 302–305.

55. Niemelä, V.; Haapola, J.; Hämäläinen, M.; Inatti, J. An Ultra Wideband Survey: Global Regulations and Impulse Radio Research Based on Standards. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2017, 19, 874–890.

## **ДОДАТКИ**

# ДИПЛОМНА РОБОТА

## МЕТОД КОНФІГУРАЦІЇ ДИПОЛЬНОЇ АНТЕНИ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМ

Виконав:  
здубувач II курсу, група ТРм-22-1  
**Коломієць Євген Ярославич**

Науковий керівник:  
К.Т.Н, доцент  
**Мішан Віктор Володимирович**

**LPDA**, log-periodic dipole antenna  
логоперіодична дипольна антена

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ:** полягає в необхідності розвитку та вдосконалення комунікаційних систем і бездротових технологій у сучасному світі.

**МЕТА РОБОТИ:** аналіз та вдосконалення мініатюризованих друкованих антен типу LPDA для забезпечення їх високочастотної працездатності та компактності

**ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ:** широкосмугова антена, призначена для застосувань у надширокосмугових системах зв'язку та визначення напрямку на широкому діапазоні частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц.

**ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ:** проектування та оптимізація мініатюризованих друкованих LPDA-антен з розширеною низькочастотною характеристикою для роботи в діапазоні частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц.

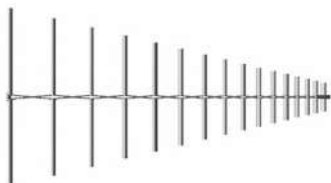
## НАУКОВА НОВИЗНА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

- представлено нову конструкцію мініатюризованої друкованої LPDA-антени, яка працює в діапазоні частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц
  - Розробка та застосування методів мініатюризації, які дозволяють зменшити розміри LPDA-антени без втрати її ефективності.
  - Визначення оптимальних параметрів антени для досягнення кращої продуктивності в робочому діапазоні частот.
  - Підвищення технічних характеристик мініатюризованих LPDA-антен, зокрема, підсилення, широкосмуговості та спрямованості випромінювання.
  - Використання отриманих результатів для застосувань у сучасних бездротових системах та антенних технологіях.

3

**Логперіодична антена ( LP ),** також відома як **логперіодична решітка**, – це багатоелементна спрямована антена, призначена для роботи в широкому діапазоні частот

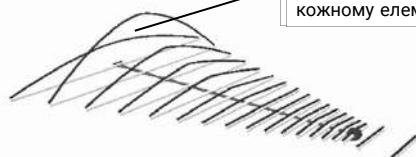
Стандартна та зигзагоподібна конфігурації LPDA



Найпоширенішою формою логперіодичної антени є **логперіодична дипольна решітка** або **LPDA (log-periodic dipole antenna)**.

LPDA складається з кількох напівхвильових дипольних елементів, що поступово збільшуються в довжину, кожен з яких складається з пари металевих стрижнів

Червоні дуги представляють величину струму збудження на кожному елементі.



**Збудження елементів LPDA на різних частотах**

6 MHz

4

## Методи мініатюризації для зменшення розміру друкованих LPDA антен

- ✓ **Метод верхнього навантаження**
- ✓ Фрактально-ітераційний метод
- ✓ Метод відсіченого елемента
- ✓ Метод діелектричного навантаження
- ✓ Диполь зі складеною плоскою спіраллю

### Метод верхнього навантаження

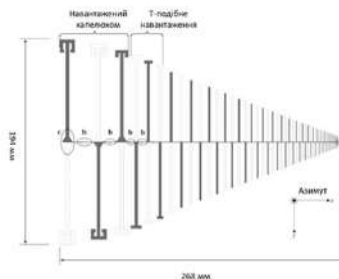


Рис. 1 – Конструкція друкованої LPDA антени із реалізованими методами навантаження у формі капелюшка і Т-подібного навантаження

- метод забезпечує 50% зменшення поперечного розміру звичайної друкованої LPDA



Рис. 2 – Конструкція з Т-подібним навантаженням по дузі окружності

## Методи мініатюризації для зменшення розміру друкованих LPDA антен

- ✓ **Метод верхнього навантаження**
- ✓ **Фрактально-ітераційний метод**
- ✓ Метод відсіченого елемента
- ✓ Метод діелектричного навантаження
- ✓ Диполь зі складеною плоскою спіраллю

### Фрактально-ітераційний метод

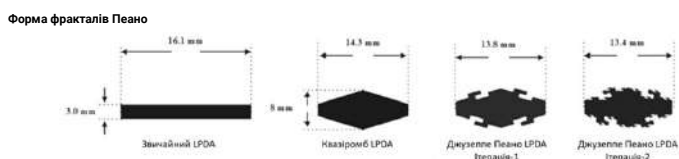


Рис. 3 – Конструкція друкованої LPDA антени із реалізованими фрактально-ітераційними методами

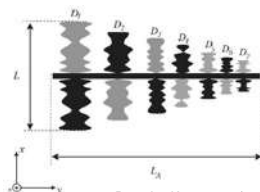


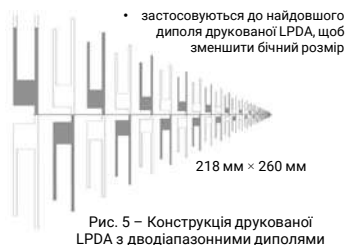
Рис. 4 – Конструкція друкованої LPDA з модифікованими диполями з використанням оптимізованих коефіцієнтів Фур'є

- метод дозволив досягнути зменшення розміру прямих диполів на 32%

## Методи мініатюризації для зменшення розміру друкованих LPDA антен

- ✓ Метод верхнього навантаження
- ✓ Фрактально-ітераційний метод
- ✓ Метод відсіченого елемента
- ✓ Метод діелектричного навантаження
- ✓ Диполь зі складеною плоскою спіраллю

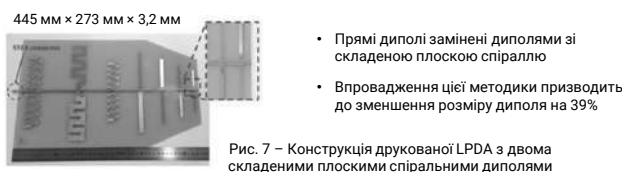
### Метод відсіченого елемента



### Метод діелектричного навантаження



### Метод відсіченого елемента



## Конструкція звичайної друкованої LPDA для діапазону частот від 0,7 ГГц до 8 ГГц

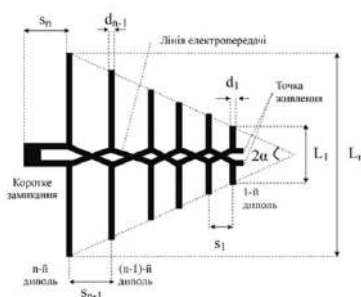


Рис. 8 – Схематична схема звичайної LPDA антени

Кут при вершині – це половина кута, у якому розташовані всі диполі, і він математично виражається як

$$\alpha = \tan^{-1} \left[ \frac{1 - \tau}{4\sigma} \right] \quad (1)$$

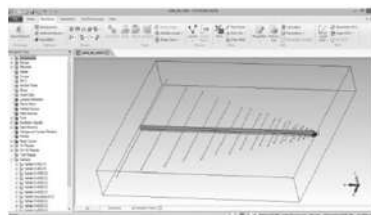
де  $\tau$  – коефіцієнт масштабування – відношення довжин або діаметрів двох послідовних диполів:

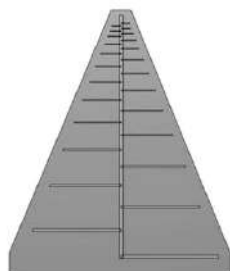
$$\tau = \frac{L_{n+1}}{L_n} = \frac{d_{n+1}}{d_n} \quad (2)$$

де  $L_n$  і  $d_n$  – довжина і діаметр n-го диполя.

Коефіцієнт інтервалу  $\sigma$  
$$\sigma = \frac{s_n}{2L_n} \quad (3)$$

де  $s_n$  – відстань між n-м диполем і його послідовним (n + 1)-м диполем. Загальні фізичні розміри антени значно залежать від двох вищезазначених факторів ( $\tau$  і  $\sigma$ )





довжина 250 мм x ширина 170 мм x товщина 1 мм

Рис. 9 – Модель звичайної друкованої LPDA антени

Таблиця 1 – Розміри звичайної друкованої LPDA антени

Параметри	Значення	Параметри	Значення	Параметри	Значення
L1	5 мм	L14	22 мм	d1	0.5
L2	5.5 мм	L15	25 мм	d2	0.5
L3	6 мм	L16	28 мм	d3	0.5
L4	7 мм	L17	30.5 мм	d4	0.5
L5	8 мм	L18	34.5 мм	d5	0.5
L6	9 мм	L19	38 мм	d6	0.6
L7	10 мм	L20	43 мм	d7	0.7
L8	11 мм	L21	48 мм	d8	0.8
L9	12 мм	L22	53 мм	d9	0.9
L10	14 мм	L23	59 мм	d10	1 мм
L11	16 мм	L24	66 мм	d11	1 мм
L12	18 мм	L25	73 мм	d12	1 мм
L13	20 мм	s13	7 мм	d13	1 мм
s0	7 мм	s14	7 мм	d14	1 мм
s1	2 мм	s15	8 мм	d15	1 мм
s2	2 мм	s16	9 мм	d16	1 мм
s3	2 мм	s17	10 мм	d17	1 мм
s4	2 мм	s18	11 мм	d18	1 мм
s5	2 мм	s19	13 мм	d19	1 мм
s6	3 мм	s20	14 мм	d20	1.5 мм
s7	3 мм	s21	16 мм	d21	2 мм
s8	3.5 мм	s22	18 мм	d22	2 мм
s9	4 мм	s23	20 мм	d23	2 мм
s10	4.5 мм	s24	22 мм	d24	2.5 мм
s11	5 мм	L-профіль	230 мкм	d25	3 мм
s12	6 мм	H-профіль	35 мкм	W-профіль	3 мм

- L<sub>n</sub> – довжина n-го диполя;
- s<sub>n</sub> – відстань між n-м та (n+1)-м диполем;
- d<sub>n</sub> – ширина n-го диполя;
- L-подібний профіль – довжина профілю;
- W-подібний профіль – ширина профілю;
- H-подібний профіль – товщина профілю (еквівалент товщини мідного покриття у цьому випадку).

- Низький коефіцієнт відбиття (S11) менше -10 децибелів (дБ) на всьому робочому діапазоні частот від 0,7 ГГц до 8 ГГц свідчить про відсутність втрат сигналу та добре узгоджену імпедансу антени з системою.
- Графік підсилення на рис. 4.4 показує, що антена досягає приблизно однакового рівня підсилення приблизно 5,5 дБі в робочому діапазоні частот, що підтверджено результатами моделювання та вимірювань методом двох антен.

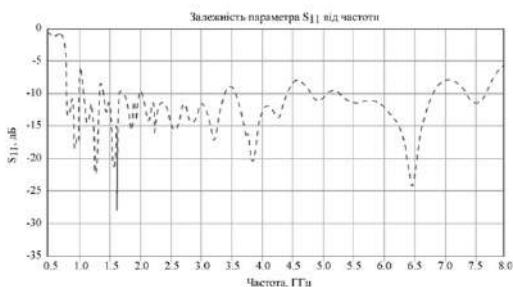


Рис. 10 – Моделювання конструкції друкованої LPDA антени

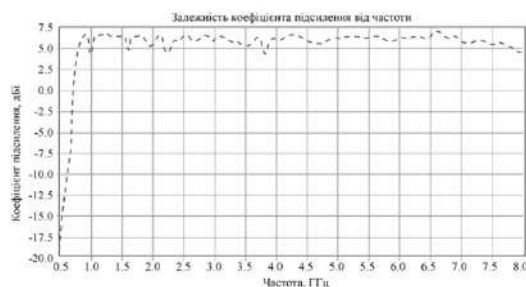
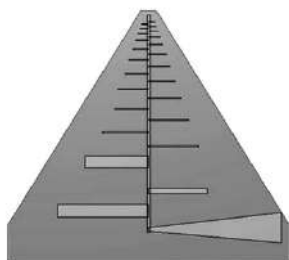


Рис. 11 – Моделювання підсилення антени типу друкованої LPDA

## Конструкція друкованої LPDA антени з розширеною низькочастотною характеристикою для діапазону частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц



довжина 270 мм × ширина 279 мм × товщина 1 мм

Рис. 12 – Модель запропонованої антени типу друкованої LPDA антени

Таблиця 3 – Розміри вдосконаленої друкованої LPDA антени

Параметри	Значення	Параметри	Значення	Параметри	Значення
L1	8 мм	L18	34.5 мм	d5	0.5
L2	9 мм	L19	38 мм	d6	0.6
L3	10 мм	L20	43 мм	d7	0.7
L4	11 мм	L21	48 мм	d8	0.8
L5	12 мм	L22	60.9 мм	d9	0.9
L6	14 мм	L23	56.5 мм	d10	1 мм
L7	16 мм	L24	88.3 мм	d11	1 мм
L8	18 мм	L25	130 мм	d12	1 мм
L9	20 мм	s13	7 мм	d13	1 мм
L10	7 мм	s14	7 мм	d14	1 мм
L11	2 мм	s15	8 мм	d15	1 мм
L12	2 мм	s16	9 мм	d16	1 мм
L13	2 мм	s17	10 мм	d17	1 мм
s0	2 мм	s18	11 мм	d18	1 мм
s1	2 мм	s19	13 мм	d19	1 мм
s2	3 мм	s20	14 мм	d20	1.5 мм
s3	3 мм	s21	9.5 мм	d21	2 мм
s4	3.5 мм	s22	21.5 мм	d22	12.4 мм
s5	4 мм	s23	11 мм	d23	6.4 мм
s6	4.5 мм	s24	11 мм	d24	13.8 мм
s7	5 мм	L-профіль	230 мм	d25	32.3 мм
s8	6 мм	H-профіль	35 мкм	W-профіль	3 мм
s9	8 мм	L18	34.5 мм	d5	0.5
s10	9 мм	L19	38 мм	d6	0.6
s11	10 мм	L20	43 мм	d7	0.7
s12	11 мм	L21	48 мм	d8	0.8

Таблиця 2 – Цілі оптимізації

Параметри	Цілі	Частота	вага
S11	<-12 дБ	0.4 ГГц–1.2 ГГц	5.0
Підсилення	>5 дБі	0.4 ГГц–1.2 ГГц	5.0

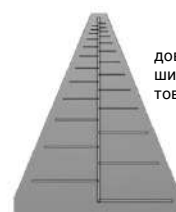
Оптимізовану антену вдалося зменшити на 29% порівняно зі звичайною друкованою LPDA антеною

## Моделювання ширококугової LPDA антени

- Антенa досягає значно кращого показника підсилення на нижніх частотах порівняно із звичайною конструкцією



Рис. 13 – Підсилення вдосконаленої конструкції друкованої LPDA антени



довжина 250 мм  
ширина 170 мм  
товщина 1 мм

Рис. 9 – Модель звичайної друкованої LPDA антени



довжина 270 мм  
ширина 279 мм  
товщина 1 мм

Рис. 12 – Модель запропонованої антени типу друкованої LPDA антени

## Моделювання широкосмугової LPDA антени

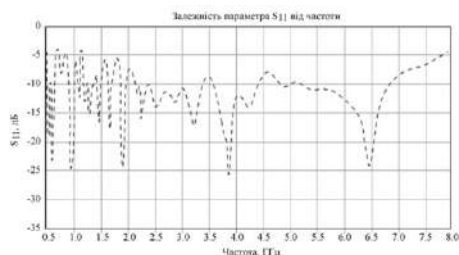


Рис. 14 – Графік S11 для вдосконаленої конструкції друкованої LPDA антени

- Антена добре узгоджена з низькими значеннями S11 менше -10 дБ в більшій частині робочого діапазону частот

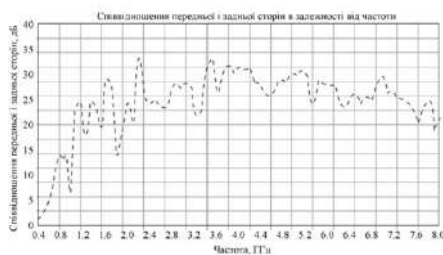
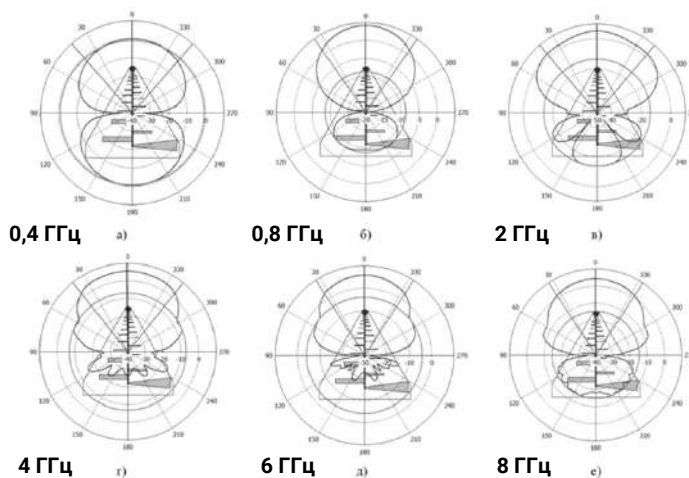


Рис. 15 – Співвідношення антени у двох напрямках покращеної конструкції друкованої LPDA антени

- Антена володіє високою характеристикою спрямованості
- Показники роботи запропонованої антени можуть бути додатково покращені шляхом впровадження інших методів підсилення та повторної оптимізації антени.

## Полярні графіки діаграм спрямованості випромінювання



- антена володіє стабільними діаграмами спрямованості на всьому діапазоні частот

Рис. 16 – Полярні графіки діаграм спрямованості випромінювання запропонованої антени в Е-площині

## **ВИСНОВКИ ВИСНОВКИ**

- Досліджено та розглянуто різні аспекти мініатюризації та оптимізації друкованих антен, зокрема антен з логарифмічною періодичною структурою та антен для надширокопосмугових технологій.
- Оглянуто розвиток антен UWB та їхніх різних конструкцій. Встановлено, що технологія UWB має великий потенціал у бездротовому зв'язку та інших галузях завдяки своїй великій смузі пропускання та низькій споживаній потужності.
- Досліджено методи мініатюризації для зменшення розміру друкованих LPDA антен. Були розглянуті різні методи, такі як використання верхнього навантаження, фрактально-ітераційний метод, метод відсіченого елемента, використання рефлектора та інші.
- Представлені дві моделі друкованої LPDA антени з оптимізованою конструкцією для роботи у широкому діапазоні частот. Оптимізація дозволила підвищити пропускну здатність антен та покращити їхні характеристики.

*Апробація*

15

**ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!**

Завідувачу кафедри телекомунікацій,  
медійних та інтелектуальних технологій  
д.т.н., доценту ПІДЧЕНКУ Сергію  
здобувача вищої освіти  
КОЛОМІЙЦЯ Євгена  
ФІТ, гр. ТРм-22-1

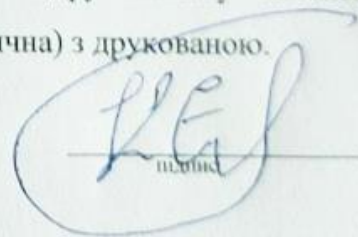
### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений (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.

27 листопада 2023 р.  
дата



підпис

Имя пользователя:  
Kafedra TMIT KhNU

ID проверки:  
1015980603

Дата проверки:  
07.12.2023 14:46:06 EET

Тип проверки:  
Doc vs Internet + Library

Дата отчета:  
07.12.2023 14:48:53 EET

ID пользователя:  
100005657

Название файла: Коломієць\_ТРм\_22

Количество страниц: 97 Количество слов: 16795 Количество символов: 126115 Размер файла: 2.49 MB ID файла: 1015t

## 0.79% Совпадения

Наибольшее совпадение: 0.25% с источником из Библиотеки (ID файла: 1015617238)

0.72% Источники из Интернета 92 ..... Страница 99

0.45% Источники из Библиотеки 24 ..... Страница 99

## 0.3% Цитат

Цитаты 3 ..... Страница 100

Не найдено ни одной ссылки

## 0% Исключений

Нет исключенных источников

## Модификации

Обнаружены модификации текста. Подробная информация доступна в онлайн-отчете.

Замененные символы 5

**Anti-Plagiarism v-15.257****Максимальное совпадение с одним документом 0.0%****Словари проверки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Ошибка в документах: 10%**

ID: 122014 Название: Метод конфігурації дипольної антени для бездротових систем Добавлено в БД: 2023-12-07 Авторы: Коломієць Євген Ярославович Руководители: Мішан Віктор Володимирович Консультанты: Оponentы:	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	99569	1522	676 (1%)	13 (1%)

## Источник плагиата

ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы

РІШЕННЯ

кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

ПРО ДОПУСК МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

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

Назва: Метод конфігурації дипольної антени для бездротових систем

Автор: Коломісць Євген Ярославович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: к.т.н., доцент Мішан Віктор Володимирович

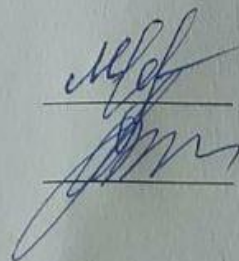
Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	-
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	відповідає
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: Виявленні запозичення не є плагіатом так як розміщенні в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження (є власні терміни, визначення тощо), складають 0,79% та мають посилання на приведений список літературних джерел.

«07» грудня 2023 р.

Науковий керівник



Віктор МІШАН

Завідувач кафедри ТМІТ

Сергій ПІДЧЕНКО

РЕЦЕНЗІЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Дипломник: Коломієць Євген Ярославович

Тема роботи: Метод конфігурації дипольної антени для бездротових систем

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг дипломної роботи

Кількість листів креслень \_\_\_\_\_ Кількість сторінок записки 89

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Мета дипломної роботи полягає в розробці, аналізі та вдосконаленні мініатюризованих друкованих антен типу LPDA з метою забезпечення їхньої високочастотної ефективності та компактності. Робота спрямована на виготовлення цих антен привабливими для використання в високочастотних бездротових системах та інших сучасних застосуваннях.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Дипломна робота відповідає виданому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: У роботі проведено огляд методів мініатюризації друкованих логперіодичних дипольних антен для зменшення їхніх розмірів. По-перше, розглянута конструкція звичайної друкованої логперіодичної дипольної антени, яка працює в широкому діапазоні частот від 0,7 ГГц до 8 ГГц. Також представлено новий метод для покращення низькочастотних характеристик антени шляхом використання трикутної дипольної структури та оптимізації довжини та розташування диполів, що дозволяє робити антену ефективною в діапазоні від 0,4 ГГц до 8 ГГц зі зниженням коефіцієнта підсилення на низьких частотах.
4. Позитивні сторони роботи: Позитивні аспекти роботи включають розробку нових методів та оптимізацію мініатюризованих друкованих антен типу LPDA. Запропоновані вдосконалення включають новий метод розширення низькочастотної характеристики антен за допомогою трикутної дипольної структури та оптимізацію найдовших диполів. Отримані результати підтверджують можливість роботи антени у широкому діапазоні частот від 0,4 ГГц до 8 ГГц з певним зниженням коефіцієнта підсилення на низьких частотах. Це робить їх привабливими для високочастотних бездротових систем та інших застосувань.

5. Негативні сторони роботи: включають обмеження або втрати ефективності на низьких частотах в результаті нового методу розширення низькочастотної характеристики антени за допомогою трикутної дипольної структури та оптимізації найдовших диполів. Додатково, може виникнути необхідність у подальших дослідженнях та вдосконаленнях для досягнення оптимальних результатів в різних умовах та застосуваннях.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає

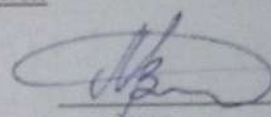
7. Відгук про роботу в цілому: В цілому дипломна робота виконано на високому технічному рівні, вона має безперечну актуальність в області сучасних технологій телекомунікацій. Автор чітко визначив мету та завдання роботи, проаналізував різні методи мініатюризації друкованих антен, розробив новий метод розширення низькочастотних характеристик та вдосконалення антени типу LPDA. Загальною суттю дипломної роботи є важливий внесок у розвиток області антенної техніки та безпроводних технологій.

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка дипломної роботи: Дипломна робота відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки добре (4,25/5), а її автору Коломіїцю Є.Я., присвоєння кваліфікації магістра зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка»

10. Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, місце роботи) Мартинюк Валерій Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

« 5 » грудня 2023р.

  
підпис