

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Бакалавр

Освітній рівень

Техніка покращення ізоляції в антенних решітках МІМО

Назва теми

КвРТР.2020015.01.03 ПЗ

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Шифр і назва

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Шифр і назва

Освітня програма «Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології»

Назва

Виконав:


студент III курсу, група ТР1с-20-1

  
Підпис

Іван МЕЛЬНИЧУК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник:

  
Підпис, дата

Андрій СЕЛЬСЬКИЙ

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер:

  
Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

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

  
Підпис

Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ


« 11 » червня 2023р.

Хмельницький, 2023

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру АКИТтаР

 Валерій МАРТИНЮК


« 01 » лютого 2023 р.

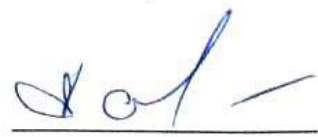
## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Мельничуку Івану Івановичу

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

- 1 Тема роботи: Техніка покращення ізоляції в антенних решітках МІМО  
Керівник роботи: к.ф.м.н., доцент Сельський Андрій Анатолійович  
Затверджено наказом по університету від «01» березня 2023р. № 5
- 2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру 03 червня 2023 року
- 3 Вихідні дані до роботи: схема технологічного процесу, технічне завдання
- 4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):  
огляд методів ізоляції в антенних системах МІМО; огляд сучасного стану випромінюючих пристроїв для бездротових мережа; конструкція та продуктивність антени; аналіз розв'язки навантаження феритової плівки.
- 5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):  
1. Конструкція базової антени МІМО. 2. Еквівалентна схема випромінювання антени із завантаженням феритової плівки. 3. Змодельовані 3D діаграми спрямованості антени із завантаженням феритової плівки.

Завдання отримав 

Керівник 

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7 Дата видачі завдання 01 лютого 2023 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на кваліфікаційну роботу	01.02.2023р.	виконано
2.	Складання індивідуального плану на кваліфікаційну роботу	15.02.2023р.	виконано
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	10.03.2023р.	виконано
4.	Написання другого розділу	26.03.2023р.	виконано
5.	Написання третього розділу	15.04.2023р.	виконано
6.	Написання четвертого розділу	30.04.2023р.	виконано
7.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до кваліфікаційної роботи	10.05.2023р.	виконано
8.	Оформлення кваліфікаційної роботи	15.05.2023р.	виконано
9.	Рецензування кваліфікаційної роботи	20.05.2023р.	виконано
10.	Презентаційні матеріали за результатами виконання кваліфікаційної роботи	28.05.2023р.	виконано

Здобувач

(підпис, дата)

Іван МЕЛЬНИЧУК

Науковий керівник

(підпис, дата)

Андрій СЕЛЬСЬКИЙ

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Техніка покращення ізоляції в антенних решітках МІМО»

Автор роботи: Мельничук Іван Іванович

Керівник роботи: к.ф.м.н., доцент Сельський Андрій Анатолійович.

Пояснювальна записка: 65 сторінок, 37 рисунків, 2 таблиці, 40 джерел.

Графічна частина: технічні креслення.

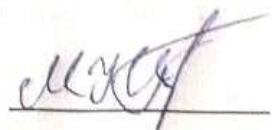
**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** 5G, АНТЕНА, МІМО, ФЕРИТОВА ПЛІВКА, ІЗОЛЯЦІЯ, МЕТОДИ РОЗ'ЄДНАННЯ, ІНВЕРТОВАНА F-АНТЕНА, LTE, НАВАНТАЖЕННЯ.

Об'єктом дослідження є широкосмугова антенна решітка МІМО.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в пом'якшенні взаємозв'язку між антенами МІМО за допомогою завантаження феритової плівки.

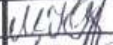



Зменшення взаємозв'язку між елементами антени з декількома входами та декількома виходами (МІМО) вимагає вибору відповідної техніки роз'єднання без зміни геометрії чи робочої частоти антени. У даній кваліфікаційній роботі запропоновано простий і гнучкий підхід, який передбачає навантаження невеликої феритової плівки на ділянку випромінювання пари антен МІМО для пом'якшення небажаного взаємозв'язку. Завдяки ретельному дослідженню двох елементів інвертованої F-антени з відстанню між елементами лише 1,4 мм можуть бути належним чином роз'єднані шляхом належного контролю області навантаження феритової плівки і товщини феритової плівки разом із збереженням бажаних робочих частот і прийнятних характеристик випромінювання в діапазоні LTE 42 (3,4–3,6 ГГц). Оптимальне навантаження феритової плівки на заземлену гілку елемента інвертованої F-антени може підвищити ізоляцію від  $-6,64$  дБ до  $-10,43$  дБ і розширити смугу частот з 3,20–3,88 ГГц до 2,83–3,65 ГГц, а його ефективність може досягати 45,5%, а також підсилення на 2 дБ.

03.06.2023 р.



## ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	4
ВСТУП.....	5
1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ІЗОЛЯЦІЇ В АНТЕННИХ СИСТЕМАХ МІМО.....	8
1.1 Методи покращення ізоляції в антенних системах МІМО .....	8
1.2 Роз'єднання мереж.....	9
1.3 Паразитичні елементи .....	11
1.4 Дефекти наземних конструкцій .....	12
1.5 Лінії нейтралізації.....	14
1.6 Метаматеріали.....	16
1.7 Висновки до першого розділу .....	19
2 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ВИПРОМІНЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖАХ.....	20
2.1 Огляд характеристик інвертованої F-антени .....	23
2.2 Еволюція антен .....	25
2.3 Планарна реалізація інвертованої F-антена .....	26
2.4 Практичне застосування інвертованої антени.....	29
2.5 Висновки до другого розділу .....	31
3 КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРОДУКТИВНІСТЬ АНТЕНИ .....	32
3.1 Математичне моделювання антени .....	32
3.2 Конструкція базової антени МІМО .....	37

КвРТР.2020015.01.03 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
		Розроб. Мельничук І.І.		19.08.20
		Перевір. Сельський А.А.		09.08.20
		Реценз.		
		Н. Контр. Корецька Л.О.		09.08.20
		Затверд. Мартинюк В.В.		09.08.20
Техніка покращення ізоляції в антенних решітках МІМО				
Пояснювальна записка				
			Лім.	Арк.
			2	65
ХНУ, зр. ТР1с-20-1				

3.3	Параметри запропонованої антени МІМО .....	38
3.4	Висновки до третього розділу.....	44
4	АНАЛІЗ РОЗВ'ЯЗКИ НАВАНТАЖЕННЯ ФЕРИТОВОЇ ПЛІВКИ.....	45
4.1	Тривимірне моделювання діаграми спрямованості.....	51
4.2	Моделювання S-параметрів для антен із різними площами навантаження .....	53
4.3	Висновки до четвертого розділу.....	60
	ВИСНОВКИ.....	61
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	62
	ДОДАТКИ.....	66

					КВРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

CSRR	– резонатор з додатковим розділеним кільцем (Complementary Split Ring Resonator)
EBG	– електромагнітна заборонена зона (Electromagnetic Band Gap)
IFA	– Інвертована F-антена (Inverted-F antenna)
IoT	– Internet of Things
LAN	– бездротові локальні мережі
LTE	– Long Term Evolution
MIMO	– Multiple-Input Multiple-Output
NL	– лінія нейтралізації (Neutralization Line)
PIFA	– Planar Invented F-antenna
SAR	– потужність електромагнітних хвиль
SIMO	– система з одним входом і багатьма виходами
SISO	– система з одним входом і одним виходом
SRR	– резонатор із розділеним кільцем (Split-Ring Resonators)
TE	– поперечні електричні хвилі
TM	– поперечні магнітні хвилі
WiMAX	– Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	– бездротові локальні мережі
MTM	– Метаматеріали

					КВРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

З тих пір, як зв'язок 5G став комерційною реальністю, попит на більш високу пропускну здатність каналів і швидкість передачі даних значно зріс у системах бездротового зв'язку [1, 2]. Використання технології MIMO (multi-input-multiple-output) – це ефективний спосіб підвищити ефективність використання спектру та збільшити пропускну здатність каналу. Ця технологія може дозволити системі зв'язку надсилати та отримувати більше одного потоку сигналів даних одночасно через той самий радіоканал, використовуючи некорельовані шляхи каналів у багатошляховому середовищі [3]. Однак технологія MIMO може зазнати втрат від взаємного зв'язку між елементами антени MIMO, що може погіршити пропускну здатність каналу [4, 5]. Тому методи розв'язки мають вирішальне значення для підвищення ефективності та пропускну здатності систем зв'язку з великою кількістю антен; однак це складно для мобільних терміналів, які мають значні обмеження в просторі.

Нещодавно було проведено значні дослідження щодо пом'якшення небажаного взаємозв'язку за допомогою різних методів роз'єднання. У деяких дослідженнях [3, 6–8] лінія нейтралізації, що з'єднує дві пов'язані радіаційні плями, використовувалася для придушення струму зв'язку, що могло б покращити ізоляцію. Дефектовані заземлені структури та електромагнітні структури із забороненою зоною були підтверджені як ефективні методи зміни поверхневої хвилі або шляхів потоку струму, збільшуючи ізоляцію [9–11]. Паразитарна структура або спільна ділянка випромінювання також була запропонована як роз'єднувальна конструкція для досягнення хорошої ізоляції, пропонуючи додатковий шлях зв'язку, якщо дозволяє простір [12–15]. На додаток до цих роз'єднаних структурних конструкцій, концепція розподілу поля була використана для оптимізації відносного розташування антен для отримання низького взаємозв'язку, включаючи розподіл струму [16], розподіл слабого поля [17] і точки поля з нульовою амплітудою [18]. Крім того, метаматеріал,

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

метаповерхня та інтегровані хвилеводні (SIW – substrate integrated waveguide) структури також використовувалися для придушення зв'язку між сусідніми елементами антени, які можуть бути застосовані для широкого діапазону діапазонів частот із простотою процесу виготовлення, низькою вартістю та високим рівнем ізоляції між елементами масиву [19–22]. Незважаючи на те, що всі вищезазначені методи розв'язки працюють добре, вони вимагають додаткових структур роз'єднання або мереж, які займають додатковий простір і роблять структуру антени МІМО негнучкою для налаштування.

Для промислових застосувань необхідний високий рівень ізоляції, використовуючи єдину гнучку конструкцію з можливостями мініатюризації. Пропозиція нових матеріалів може потенційно допомогти пом'якшити фундаментальні обмеження, що стосуються антен, щодо розміру [23]. Таким чином, магнітодіелектричні матеріали, що поєднують як діелектричні, так і магнітні властивості, були широко досліджені для їх використання в антенах для зміни їхніх властивостей випромінювання. Серед цих магнітних матеріалів ферити демонструють здатність просто налаштувати робочі характеристики мікросмужкових антен, зберігаючи при цьому складність конструкції та відносно низьку вартість. Важливими цілями при використанні феритових матеріалів у компактних антенах є мініатюризація антени та розширення смуги пропускання, які мають вирішальне значення для забезпечення достатнього розділення між двома антенами в обмеженому просторі систем МІМО [24–29]. Проте ферити мають низьку електропровідність, що зменшує втрати на вихрові струми, що робить їх ідеальними компонентами для високочастотних пристроїв, таких як ізолятори, циркулятори, фазообертачі та магнітооптичні пристрої [30–34]. Однак цей ефект ізоляції рідко враховувався в конструкції антени, що могло б сприяти контролю розподілу взаємодіючого електричного струму на антенах МІМО.

У даній кваліфікаційній роботі пропонується простий метод, який включає завантаження невеликої частини мікрохвильової феритової плівки на елементи

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

антени для пом'якшення небажаного взаємного зв'язку та реалізації компактної конструкції мобільної системи 5G MIMO. Запропонована антена MIMO, заснована на елементах інвертованої F-антени (IFA), яка працює в діапазоні 3,5 ГГц (3,4–3,6 ГГц, LTE Band 42), який є одним із діапазонів нижче 6 ГГц. У конструкції двоелементної антени MIMO вплив площі завантаження феритової плівки та її товщини на характеристики випромінювання та ізоляції систематично досліджувався за допомогою моделювання та експериментальних досліджень. Завдяки належному контролю завантаження феритової плівки дві інвертовані F-антени стають роз'єднаними з високим рівнем ізоляції. Детально описано механізм дії навантаження феритової плівки на розв'язку MIMO-антен. Нарешті, антену MIMO на основі двох інвертованих F-антен було промодельовано, щоб переконатися, що концепція розв'язки феритової плівки добре працює в діапазоні 3,5 ГГц мобільних терміналів 5G MIMO.

					КВРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ІЗОЛЯЦІЇ В АНТЕННИХ СИСТЕМАХ МІМО

Зростаючі стандарти на високу пропускну здатність каналу та швидкість передачі даних вкрай необхідний у сучасних системах бездротового зв'язку. У зв'язку зі зростаючим попитом на вбудовування кількох антен у користувальницьке обладнання бездротові програми швидко переходять на МІМО від систем з одним входом і одним виходом (SISO) і з одним входом і багатьма виходами (SIMO). Дослідники зосередилися на антені МІМО через її високу пропускну здатність і високошвидкісний бездротовий зв'язок. Початок МІМО був у Bell Labs у період з 1997 по 2002 роки під назвою BLAST для Bell Labs Layered Space-Time. За допомогою МІМО він використовує багатопробеневість для отримання дуже високої спектральної ефективності (було виміряно 10 біт/с/Гц). Розглянуті різні проблеми проектування антени 4G МІМО – це взаємний зв'язок, розмір антени, продуктивність на місці, пропускну здатність каналу та відповідність нормам SAR. Збільшений взаємний зв'язок між елементами та висока кореляція в каналі погіршують продуктивність антенної системи МІМО. Протягом останнього десятиліття дослідники рекомендували різні методи зменшення взаємного зв'язку. У даному розділі представлено огляд різних методів ізоляції антен МІМО

## 1.1 Методи покращення ізоляції в антенних системах МІМО

Розміщені поруч антени на відстані менше  $\lambda/4$  викликають високий зв'язок. Взаємний зв'язок можна звести до мінімуму, використовуючи антени з деякою відстанню всередині мобільного терміналу. Його можна розмістити або на двох верхніх краях, або один у верхній частині, а інший у нижній частині. Розташування антен також порушує фазу струмів зв'язку разом із заважанням

					КВРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

поляризації випромінюваних полів. Зв'язок між землею та полем можна зменшити, якщо сусідні антени орієнтовані перпендикулярно одна до одної (тобто під кутом  $90^\circ$ ). Лінійно поляризовані антени, розташовані ортогонально один одному, збільшують ізоляцію і забезпечують поляризаційне рознесення. Однак вони вимагають великого простору для антени та землі. У літературі повідомлялося про різні методи ізоляції антенних систем MIMO.

## 1.2 Роз'єднання мереж

Взаємозв'язок визначається як взаємодія електромагнітного поля між елементами антени. Він змінює діаграму спрямованості, отримані напруги елементів і узгоджувальну характеристику елемента антени. Взаємозв'язок можна звести до мінімуму, використовуючи роз'єднувальні мережі. Вони роз'єднують вхідні порти сусідніх елементів, забезпечуючи негативний зв'язок таким чином, що він скасовує зв'язок між сусідніми антенами. Зосереджені елементи разом із розподіленими елементами успішно застосовувалися для зменшення зв'язку, тим самим покращуючи ізоляцію між сусідніми антенами. Мережі роз'єднання, побудовані з використанням зосереджених елементів, не працюватимуть на частотах менше 700 МГц, оскільки лінія передачі стає довшою для розв'язаної мережі, і, отже, зосереджені елементи реалізуються за допомогою гібридних з'єднувачів, що вирішує проблему простору. Мережі роз'єднання (Decoupling Networks – DN) часто використовувалися через їхню перевагу просторової ефективності. Хоча звичайні DN також мають недолік вузької смуги пропускання, широка смуга пропускання досягається в DN за допомогою паралельного резонансного контуру, який підходить для невеликих просторів, таких як мобільні пристрої.

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Плаваюча паразитна цифрова розв'язувальна структура для надширокосмугової антени забезпечує характеристики широкосмугової ізоляції приблизно 20 дБ. Штири, розміщені на заземленій поверхні радіатора, відповідають за досягнення широкосмугового діапазону. Паразитні елементи на задньому кінці антени діють як незалежні паразитні резонатори. Смужки зібрані у вигляді цифр. Смуги та прорізи, зроблені між ними, діють як резонансні елементи для різних частот, а також допомагають підвищити ізоляцію, вводячи кілька резонансів. Непрямий зв'язок досягається шляхом розв'язки мережі, що складається з двох спрямованих зв'язків. Ці муфти з'єднані двома відрізками лінії електропередачі довжиною 25,4 мм. Частина вхідного сигналу з порту 1 може бути підключена до порту 2, запроваджуючи непрямої зв'язок із контрольованою величиною та фазою, який використовується для усунення прямого зв'язку, викликаного просторовими та поверхневими хвилями між елементами масиву. Спостережуваний взаємний зв'язок був нижче  $-58$  дБ на центральній частоті 7,5 ГГц, як показано на рисунку 1.1,б.

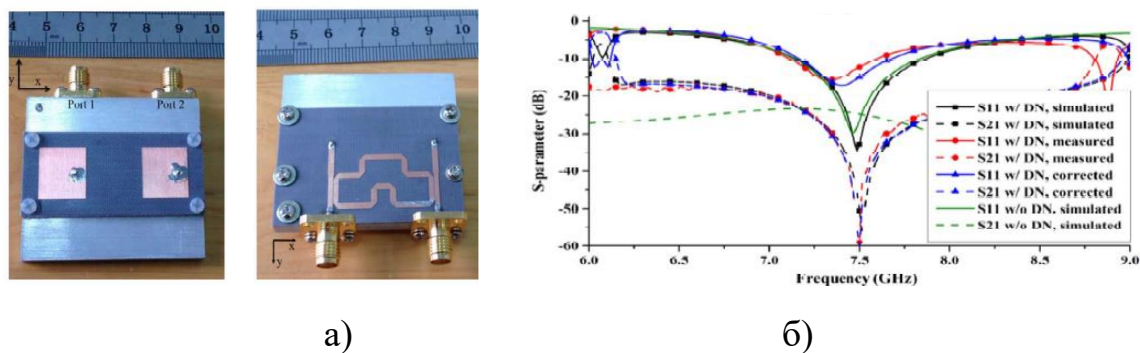


Рисунок 1.1 – а) Виготовлена антена (вид зверху та знизу);

б) Взаємний зв'язок і зворотні втрати елемента 1

Розв'язка досягається за допомогою двомодового  $180^\circ$  гібридного зв'язувача, який побудований з використанням мікросмужкових ліній, що складається з лінійних індукторів, послідовних LC резервуарів і паралельних

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пластин конденсаторів. Він працює як сполучник у діапазоні 2,45 ГГц і діє як пара ізольованої лінії передачі в діапазоні 5,25 ГГц. Взаємний зв'язок із відстанню решітки  $0,08 \lambda$  становить менше  $-20$  дБ в обох діапазонах.

Для робочого діапазону LTE 700/WWAN було запропоновано два прості RIFA з парним живленням. Ізоляція  $-10$  дБ і  $-15$  дБ досягається для нижньої смуги (704-960 МГц) і (1710-2170 МГц) верхньої смуги відповідно за допомогою структури розв'язки. Ця структура складається з відведеної лінії передачі з двома висновками, закороченими на заземлену площину, і конденсатора, імплантованого в середині лінії. Частоту ізоляції також можна змінювати шляхом налаштування ємності. Отримано регульовану смугу ізоляції 260 МГц.

### 1.3 Паразитичні елементи

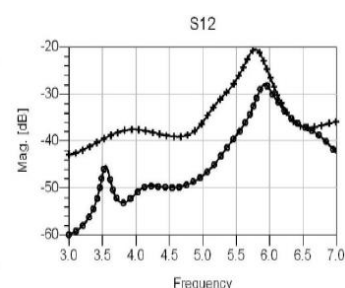
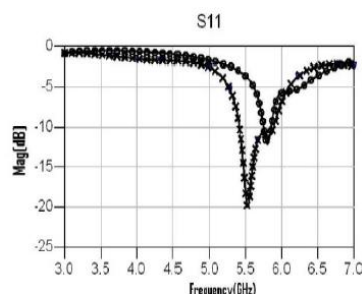
Паразитні елементи фактично не підключені до антен. Ці елементи використовуються серед антен, щоб припинити частину зв'язаних полів між ними шляхом створення протилежного поля зв'язку, таким чином мінімізуючи загальний зв'язок на цільовій антені. Вони можуть бути резонаторного типу, плаваючими або короткозамкненими. Також паразитні елементи призначені для контролю смуги пропускання, діапазону ізоляції та величини зв'язку. Для мінімізації взаємного зчеплення між двома квадратними монопольними елементами використовується Т-подібна заземлююча втулка з прорізом. Заглушка покращує узгодження антени, а отвір у ній відображає випромінювання від елементів і покращує ізоляцію. Зменшення взаємного зв'язку на  $-37,2$  дБ було отримано шляхом розміщення паразитної стрічки поверх мікросмушкової антени. Відстань між стрічкою та антеною становить 4 мм. Стрічки розміщені на діелектричній платі з  $\epsilon_r = 3$  для опори. Розмір і положення стрічки мають важливе значення для зменшення взаємного зчеплення.

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Структури електромагнітної забороненої зони (Electromagnetic Band Gap – EBG) – це періодично розташовані металеві або діелектричні елементи, які демонструють одну або кілька заборонених частотних смуг. Структури EBG використовуються для зменшення взаємного зв'язку, хоча вони складні та вимагають великої конструкції. Грибовидна структура EBG діє як паразитний елемент і вводить між двома антенними елементами, які підтримують або поперечні електричні (TE), або поперечні магнітні (TM) хвилі, діючи як смуговий фільтр. Грибоподібна структура EBG дорівнює паралельному резонансному контуру LC. Ємність вводить від зазору, а індуктивність від струму вздовж сусідніх комірок. Таким чином, поверхневі хвилі не можуть поширюватися, таким чином зменшуючи зв'язок між елементами. Грибоподібні структури EBG із слотами, завантаженими, як показано на рисунку 1.2,а, між монопольними антенами зменшують взаємний зв'язок між прямокутними елементами накладки. Досягається ізоляція -36 дБ, що показано на рисунку 1.2,б.



а)



б)

Рисунок 1.2 – а) Геометрія антени; б) Виміряні параметри  $S_{11}$  і  $S_{12}$

#### 1.4 Дефекти наземних конструкцій

Струм, створений на заземленій площині, може поєднуватися з сусідніми елементами, викликаючи високий зв'язок, що погіршує ізоляцію та кореляцію антенної системи МІМО. Зв'язок між сусідніми елементами антени можна

					КВРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

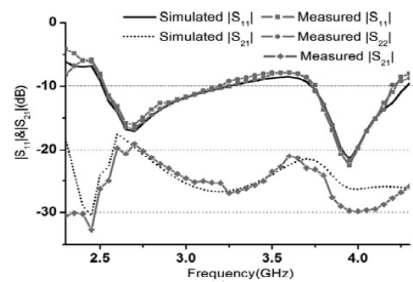
мінімізувати шляхом зміни площини заземлення. Модифікація може бути введена у вигляді щілин або дефектів у формі тупика тощо. Вона діє як смуговий фільтр і пригнічує зв'язані поля між сусідніми елементами антени шляхом зменшення струму на площині заземлення. DGS класифікується за характеристиками обмеження смуги, завдяки яким він запобігає поширенню електромагнітних хвиль. DGS розміщується під лінією електропередачі, яка скасовує поля ЕМП навколо дефекту. Електричні поля поблизу DGS викликають ефект ємності, а поверхневі струми навколо дефекту викликають ефект індуктивності. DGS діє як смуговий фільтр і пригнічує вищі гармоніки. Взаємне зчеплення було зменшено за допомогою травлення щілин і прорізів на площині заземлення, що називається дефектною структурою заземлення, але для досягнення цього зменшення потрібна велика площа заземлення. Крім того, системи DGS мають недоліки в практичному застосуванні через їх складну наземну структуру.

H-подібний DGS  $W_d \times L_d$  розміром  $2 \times 20 \text{ мм}^2$  з міжцентровим проміжком 0,2 мм вигравіруваний під квадратом розміром  $52 \times 52 \text{ мм}^2$ , який функціонує як смуговий фільтр, пригнічуючи гармоніки вищого порядку понад 20 дБ. Зв'язок між портами двох прямокутних ділянок зменшено шляхом введення дефектної структури землі під ділянками. Він складається з двох коцентрованих круглих розрізних кільцевих прорізів, вигравіруваних на площині заземлення, кожна з яких відповідає резонансній частоті патчів. Два резонансних щілини з розділеними кільцями створюють дві смуги зупинки. Завдяки правильному вибору розмірів радіусів круглого роз'ємного кільця необхідний смуговий фільтр забезпечує характеристики смуги затримки на 3,35 ГГц і 4,5 ГГц. Отриманий коефіцієнт зв'язку становить  $-33 \text{ дБ}$  на 3,35 ГГц і  $-27 \text{ дБ}$  на 4,5 ГГц.

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)

Рисунок 1.3 – а) Геометрія антени;

б) Змодельовані та виміряні S-параметри

### 1.5 Лінії нейтралізації

Ізоляцію можна посилити за допомогою лінії нейтралізації (Neutralization Line – NL). Струм на входному елементі береться в певному місці, де опір мінімальний, а струм максимальний, а потім його фаза змінюється шляхом вибору відповідної довжини для NL. Цей зворотний струм подається на сусідню антену, щоб зменшити величину пов'язаного струму. Лінія нейтралізації, вставлена між двома антенами, створює певний струм на лініях нейтралізації та створює додаткове електромагнітне поле для припинення взаємного зв'язку. Роз'єднання портів також може бути досягнуто за допомогою відкладених металевих ліній, які скасовують реактивний зв'язок між антенами, і це називається технікою нейтралізації. Визначити місце, де струм береться за інвертований, складно, оскільки потрібен детальний аналіз розподілу струму на випромінювальній антені. Для досягнення високої ізоляції два симетричних щільних антенних елементів розташовані спиною до спиною з хрестоподібним роз'єднувальним отвором і з'єднувальною металевою лінією, яка відбита на площині заземлення, яка діє як мережа розв'язки та лінія нейтралізації.

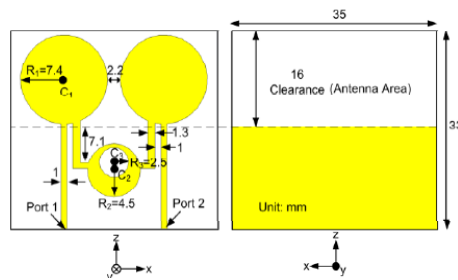
Розроблена широкопasmова подвійна антена складається з двох антенних елементів (F як монополь), розташованих симетрично, і NL у верхній частині

друкованої плати. Кожен елемент антени має гілку, приєднану до заземленої площини, яка називається заземленою гілкою. Цю гілку можна розглядати як паразитичний монополь. Між двома елементами антени закріплюється NL, з'єднаний з основною площиною заземлення з зазором до двох заземлених гілок подвійної антени. Він забезпечував ізоляцію менше ніж -15 дБ у діапазонах 1,7–2,76 ГГц.

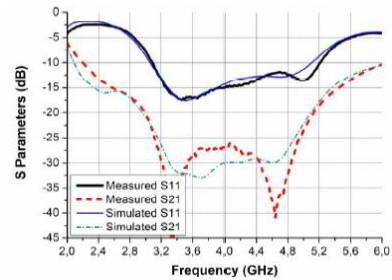
Дві друковані короткозамкнуті монопольні антени розміром 8 мм × 14,5 мм розміщені на протилежних вигинах підкладки з відстанню 14 мм із розміром 13 мм × 14 мм для заземленої частини між ними. Цей простір можна використовувати для розміщення живильної мережі. Невелику заземлену частину площини заземлення системи було видалено лише на 1,5 мм всередину від верхнього кута, щоб розмістити тонку надруковану лінію нейтралізації, яка пов'язана з монополями відносно близько до портів живлення антени. При включенні нейтралізації лінії антени ізоляція порту збільшується. Була отримана ізоляція порту антени менше -19 дБ.

На підкладці нанесені круглі монополи з відстанню 2,2 мм. Лінія нейтралізації з'єднана та чергується між двома монополями на підкладці, як на рисунку 1.4. Лінія нейтралізації складається з двох металевих смуг і металевого круглого диска. Круговий диск забезпечує шляхи розв'язки струму різної довжини для припинення струму зв'язку на площині заземлення, забезпечуючи широкосмуговий зв'язок. Круглий слот, відбитий на антені, знижує найвищі частоти розв'язки до 5 ГГц. Завдяки додаванню широкосмугової лінії нейтралізації над заземленою площиною вводиться велика ємність. Оскільки NL підключено до двох антен, його коефіцієнт якості збільшується, що, у свою чергу, зменшує смугу пропускання, яка все ще покриває смугу пропускання UWB-MIMO 3,1 ГГц–5 ГГц, забезпечуючи ізоляцію понад 22 дБ, як показано на рисунку 1.4, б.

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15



а)



б)

Рисунок 1.4 – а) Геометрія антени; б) Змодельовані та виміряні S-параметри

### 1.6 Метаматеріали

Метаматеріали (MTM) – це матеріали, які мають негативну діелектричну чи проникну здатність або обидва. Виходячи з літератури, антени на основі метаматеріалів класифікуються на два типи. Антени, які використовують підкладку ENG (Epsilon Negative), MNG ( $\mu$ -negative) або DNG (Double Negative), називаються антенами на основі MTM, а інші, які використовують лише елементарну комірку MTM, наприклад SRR (Split Ring Resonator), CSRR (Complementary Split Ring Resonator) називають антенами, натхненними MTM.

Метаматеріали (MTM) використовуються для посилення ізоляції між сусідніми елементами через наявність забороненої зони в їх частотній характеристикі. Зазори можуть діяти як смугові режекторні фільтри та руйнувати взаємний зв'язок між сусідніми елементами антени. Найпоширенішими базовими структурами MTM для посилення ізоляції між суміжними елементами є використання резонаторів із розділеним кільцем (Split-Ring Resonators – SRR) і резонатора з додатковим розділеним кільцем (Complementary Split Ring Resonator – CSRR) або використання петель із ємнісним навантаженням (Capacitively-Loaded-Loops – CLL). ЕМ-поля від

сусідньої антени можна заблокувати за допомогою SRR, якщо зовнішнє магнітне поле знаходиться під прямим кутом до кілець резонатора. Резонатори з розділеним кільцем (SRR) можуть функціонувати як ізолятори для блокування електромагнітних хвиль, таким чином зменшуючи взаємний зв'язок між елементами.

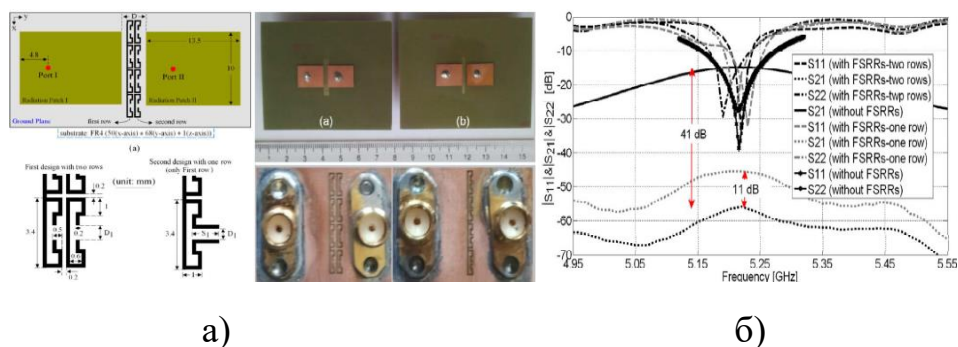
Резонатор з додатковим розділеним кільцем є негативним зображенням SRR (принцип Бабіне), а осьове електричне поле, яке змінюється в часі, є важливим для збудження кілець, які створюють ефективне негативне середовище  $\epsilon$  та запобігають поширенню сигналу в резонансі. Масив, побудований на метаматеріальній підкладці, демонструє значне зменшення розміру, менший взаємний зв'язок і значне покращення пропускної здатності каналу. Проте ефективність нижча в метаматеріальній підкладці через втрати міді в елементарних комірках, і спостерігається погіршення смуги пропускання в метаматеріальній підкладці через збільшення діелектричної проникності в підкладці. Структури SRR і 1-D EBG діяли як відбивач і хвильова пастка. Дві антени з відстанню 0,19 $\lambda_0$  демонструють взаємний зв'язок менше ніж  $-30$  дБ від 2,43 до 2,54 ГГц.

Дві дипольні антени з перехресним друкованим малюнком розміщені перпендикулярно на площині заземлення та збуджуються двома однаковими мікросмужковими балунами. Щоб розширити смугу пропускання імпедансу, CSRR вигравірувані на патчі в симетричному положенні. CSRR діють як смугові фільтри з негативною діелектричною проникністю, отже, вони можуть руйнувати моди вищого порядку. Мікросмужковий балун і резонатори CSRR, відбиті на накладці, утворюють лінію передачі на основі CSRR. Виміряна ізоляція порту краща за 25 дБ у діапазоні частот від 1 до 2 ГГц.

Представлено двоелементний масив патчів, що працює на частоті 2,4 ГГц, з кільцевими резонаторами з розділеним кільцем з відкритим пазом (Open Slot

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Split Ring Resonators – OSSRR), відбитими на площині заземлення. Під час магнітного резонансу OSSRR має вертикальні електричні поля над площиною заземлення, які поведуться як лівосторонній матеріал із негативною проникністю ( $\mu < 0$ ) і руйнують домінуючу поверхневу хвилю від досягнення сусідніх елементів. При включенні двох OSSRR досягається ізоляція  $-37$  дБ. Досліджено двома зондами, що працюють на частоті  $5,2$  ГГц, з двома конструкціями, що містять один ряд і два ряди складених розділених кільцевих резонаторів (Folded Split Ring Resonators – FSRR) на заземленій площині, і показано на рисунку 1.5. Резонансна продуктивність FSRR зумовлена індукованою електрорушійною силою, яка створює струм, що протікає всередині металевих кілець і проміжків, створюючи збалансований індуктивно-ємнісний ефект.



а)

б)

Рисунок 1.5 – а) Геометрія антени;

б) Змодельовані та виміряні S-параметри

З огляду методів ізоляції для друкованої МІМО-антени видно, що краща ізоляція досягається за допомогою мереж розв'язки, пошкоджених структур землі та метаматеріалів порівняно з методами нейтралізації та паразитними методами. На додаток до високої ізоляції, зменшення розміру антени також досягається за допомогою метаматеріалів.

## 1.7 Висновки до першого розділу

Багато дослідників зробили внесок у покращення пропускну здатності каналу, частоти бітових помилок, різноманітності та посилення багатoeлементних антен для систем МІМО. Однак у дослідників ще є багато можливостей для роботи над різними методами зменшення взаємного зв'язку.

У цьому оглядовому розділі обговорюється деяка передісторія бездротової технології та різні методи проектування ізоляції. Поряд із розглянутими вище способами існують інші способи зменшення зчеплення. Точки живлення, з'єднані лінією, використовуються для скасування зв'язку в портах<sup>49</sup>. Поляризаційне рознесення (не обов'язково  $90^\circ$ ) може бути досягнуто шляхом нахилу променів антени під різними кутами відносно один одного<sup>50</sup>. Прорізи, введені в заземлену площину, також покращують ізоляцію. Взаємний зв'язок погіршує продуктивність системи з точки зору різноманітності шаблонів, і, отже, зменшення взаємного зв'язку є великою та цікавою сферою досліджень, яка має пряме застосування для бездротового зв'язку наступного покоління, тобто 5G і далі. Антенні системи МІМО знаходять застосування в портативних пристроях, автомобільних додатках, портативних пристроях, персональному цифровому помічнику тощо.

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

## 2 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ВИПРОМІНЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ БЕЗДРотовИХ МЕРЕЖАХ

Мобільний зв'язок, бездротовий зв'язок, бездротові локальні мережі (WLAN) і технології стільникового зв'язку є одними з промислових ринків, що розвиваються найбільш швидко. Завдяки цьому технологія портативних антен розвивається разом із мобільними технологіями. Тому важливо мати правильну антену для пристрою. Правильна антена покращить передачу та прийом, зменшить споживання енергії та покращить доступність пристрою зв'язку.

Антени, які використовувалися для ранніх портативних бездротових портативних пристроїв, були так звані кутовими антенами. Такі антени користуються великою популярністю, головним чином тому, що вони прості та зручні. Вони мали діаграму спрямованості в площині заземлення з вертикальним утриманням і посиленням, що відповідало специфікаціям виробу.

Але з розвитком мобільних телефонів, пристроїв, портативних комп'ютерів, навігаторів, тобто портативної електроніки, з'являються нові бездротові програми, які вимагають роботи в кількох діапазонах частот. Дводіапазонні та тридіапазонні телефони стали популярними завдяки численним діапазонам частот, які використовуються для бездротових додатків.

У зв'язку з цим зросла потреба в маленькій і якісно спроектованій антені. Він повинен бути розміщений на друкованій платі приладу і займати на ній мінімум місця, а також приймати в необхідному діапазоні частот з коефіцієнтом відбиття не більше 0,5.

Усі антени, вбудовані в корпус пристрою, мають ряд не без істотних проблем, які не впливають на продуктивність звичайних гвинтових антен, які повинні бути вирішені всіма розробниками антен і пристроїв. Перш за все, це

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

необхідність моделювання для різних пристроїв з різними розмірами і параметрами роботи і випромінювання. Вплив спрямованості пристрою на вбудовану антену може заважати його роботі, окрім того, що зазвичай телефонні пристрої під час розмови тримають на долоні, закриваючи всю задню частину корпусу мобільного пристрою. руку.

Іншою проблемою є використання спеціальних діелектричних матеріалів для можливості регулювання коефіцієнта стиснення, коли при тісному контакті провідника з діелектриком довжина хвилі може змінюватися при різних значеннях діелектричної проникності – і цей ефект використовується для зменшення фізичної проникності. розміри резонатора. Така методика може призвести до можливості утворення паразитних джерел (у гвинтових антенах ця проблема принципово не є критичною, оскільки розташування випромінюючої частини знаходиться у вільному просторі). Однак багато вбудованих антен мають проблеми з індуктивністю та ємністю випромінювального пристрою, тому узгодження з вихідним сигналом підсилювача має великі втрати потужності.

Також дуже складним завданням є вирішення проблеми ефективності антени в декількох діапазонах частот. Не вдаючись у подробиці, варто відзначити, що в сучасному світі розвитку технології вбудованих антен необхідно використовувати кілька антен для різних діапазонів, якщо мобільний пристрій потребує підтримки параметрів з певними показниками для кількох діапазонів.

Є ще одна проблема для вбудованих антен – це спрямованість. З одного боку, це позитивно впливає на прийом/передачу сигналу – максимум випромінювання завжди спрямований в сторону від голови. Але якщо подивитися з іншого боку, якщо у нас погане покриття і нерівний зв'язок з базовими станціями в усіх напрямках (таких місць у містах досить багато), то це часто призводить до обриву. Незважаючи на все вищесказане, вбудовані антени

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

мають одну велику перевагу – вони користуються популярністю у покупців, оскільки зручні у використанні.

Четверта проблема конструкції антени - її розмір, щоб користувачеві було комфортно користуватися пристроєм. Він повинен бути невеликим і низькопрофільним. Малі антени зазвичай мають вузьку смугу пропускання опору, що перешкоджає їх широкому використанню, тому важливо вивчити основні обмеження, пов'язані зі зменшенням розміру.

Такою антеною стала PIFA – антена (Planar Invented F-antenna). Вибір цієї антени пояснюється тим, що IFA має відносно широку робочу смугу частот (до 10% від центральної частоти), відносно високий ККД (коефіцієнт випромінюваної вхідної потужності), що досягає 65%, багатодіапазонну підтримку, невеликі габарити, можливість роботи з вертикальною і горизонтальною поляризацією.

Всеспрямованість антени PIFA в посиленні забезпечує достатню продуктивність для будівель з урахуванням оновлюючих значень вихідної потужності і чутливості приймачів короткохвильових радіопристроїв. Зазвичай поляризація антени більш еліптична, ніж лінійна, що дуже рідко досягає значення 20 дБ. Виходячи з цього, антена може приймати поляризовані електромагнітні хвилі в будь-якому діапазоні (по вертикалі і горизонталі), які зазвичай є в приміщеннях, і тут домінує деполіризація, і вибір прийнятної поляризації неможливий. В даний час багато бездротових систем мають вертикальну поляризацію. Хоча було доведено, що при використанні антен з горизонтальною поляризацією, як на приймачі, так і на передавачі, результати передачі потужності на 10 дБ перевищують середні порівняно з потужністю, отриманою вертикально поляризованою антеною на обох кінцях. Вхідний опір PIFA можна регулювати відповідно до значень опору навантаження без використання додаткових схем.

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Значною позитивною відмінністю PIFA є зменшення величини поглинання потужності електромагнітних хвиль (SAR), зменшення випромінювання на людину та підвищення продуктивності PIFA антени, де антена показує задовільну або високу продуктивність у всіх площинах поляризації (горизонтальна і вертикальна). Крім того, такі функції можуть бути корисні в певних бездротових мережах зв'язку, за умови, що розташування антени не є фіксованим і прийом/передача даних можлива з будь-якої сторони середовища. У цьому випадку існує необхідний параметр сумарного поля, тобто це сума векторів усіх площин поляризації (вертикальних і горизонтальних).

Розмір пластини заземлення також впливає на смугу пропускання, що є важливим фактором. Зменшуючи або збільшуючи ці розміри, можна змінювати смугу пропускання антени PIFA. Приклад: зменшення геометричних розмірів заземлення може розширити смугу пропускання розглянутої антени. Для зменшення резонансу конструкції (і збільшення пропускнуої здатності) можна зробити (сформувані) прорізи на площині; також при використанні відступів підкладки антени від основи для зменшення резонансу і збільшення смуги пропускання; використання резонаторів (резонанс поблизу основної резонансної частоти); вибір розміщення та відстані між пристроями (вхід ІФА та розгалуження); збудження декількох режимів, призначених для ближнього або далекого зв'язку, в залежності від показників; використання елементів для збільшення пропускнуої здатності.

## 2.1 Огляд характеристик інвертованої F-антени

Інвертована F-антена є популярною антеною для використовується в мобільних пристроях через свій невеликий розмір. Інвертована F-антена (Inverted-F antenna – IFA) – це тип антени, який використовується в бездротовому

					КВРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

зв'язку, в основному на частотах УВЧ та мікрохвиль. Вона складається з однополюсної антени, яка проходить паралельно площині заземлення та заземлена з одного кінця. Антена подається з проміжної точки на відстані від заземленого кінця. Конструкція має дві переваги перед простим монополем: антена коротша та компактніша, що дозволяє вмістити її в корпусі мобільного пристрою, і її опір може бути узгоджений розробником із колом живлення, що дозволяє їй ефективно випромінювати потужність без необхідності сторонніх узгоджувальних компонентів.

Інвертована (перевернута) F-антена була вперше задумана в 1950-х роках як антена зі зігнутим дротом. Проте найпоширенішим її використанням є планарна перевернута F-антена (planar inverted-F antenna – PIFA) у мобільних бездротових пристроях через її властивості економії місця. PIFA можна друкувати за допомогою мікросмужкового формату, широко використовуваної технології, яка дозволяє виготовляти друковані радіочастотні компоненти як частину тієї самої друкованої плати, яка використовується для встановлення інших компонентів.



Рисунок 2.1 – Інвертована F-антена в базовій станції DECT (технологія, яка використовується для бездротових телефонів і подібних пристроїв)

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

PIFA є різновидом патч-антени. Існує багато варіантів цього та інших форм перевернутого F, які реалізують ширококутові або багатодіапазонні антени. Методи включають зв'язані резонатори та додавання щілин. PIFA можна друкувати за допомогою мікросмужкового формату, широко використовуваної технології, яка дозволяє виготовляти друковані радіочастотні компоненти як частину тієї самої друкованої плати, яка використовується для встановлення інших компонентів.

PIFA є різновидом патч-антени. Існує багато варіантів цього та інших форм перевернутого F, які реалізують ширококутові або багатодіапазонні антени. Методи включають зв'язані резонатори та додавання щілин.

## 2.2 Еволюція антен

Перевернута F-антена є розвитком широко використовуваної чвертьхвильової монопольної антени, яка складається з провідного стрижня, встановленого перпендикулярно над провідною площиною заземлення, що подається на її основу. Дротова антена F-типу була винайдена в 1940-х роках. У цій антені живлення підключено до проміжної точки по довжині антени замість основи, а основа антени підключена до заземленої площини. Перевага цього полягає в тому, що вхідний опір антени залежить від відстані точки живлення від заземленого кінця. Частина антени між точкою живлення та площиною заземлення по суті поводить себе як шлейф короткого замикання. Таким чином, розробник може узгодити антену з опором лінії живлення, встановивши положення точки живлення вздовж елемента антени.

					КВРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

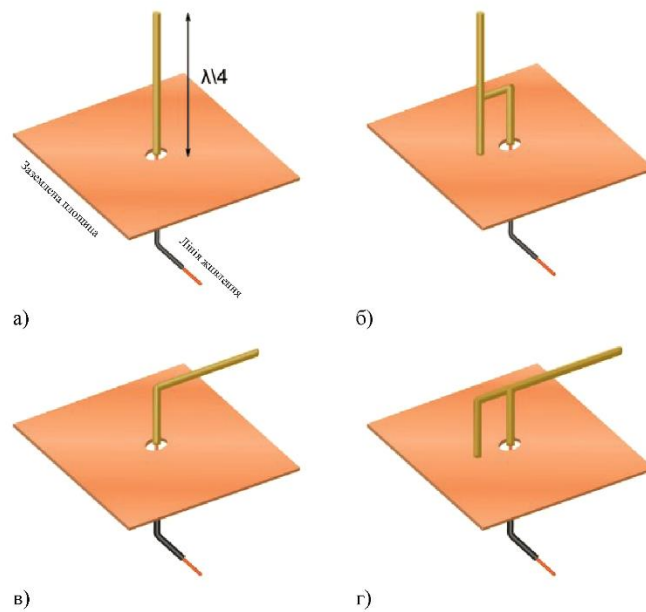


Рисунок 2.2 – Тип антен: а) монополь, б) монополь

із проміжним живленням, в) інвертована L-антена, г) інвертована F-антена

Перевернута L-антена – це монополюсна антена, зігнута так, що вона проходить паралельно площині землі. Її перевагою є компактність і коротша довжина, ніж монополь  $1/4 \lambda$ , але недоліком є дуже низький імпеданс, як правило, лише кілька Ом, якщо подається на базу, тоді як база, що подається на монополь  $1/4 \lambda$ , має імпеданс 36,5 Ом. Перевернута F-антена поєднує в собі переваги обох цих антен; він має компактність перевернутого L і здатність узгоджувати імпеданс ланцюга живлення (часто 50 Ом на друкованій схемі), як F-тип. Перевернута F-антена була вперше запропонована в 1958 році групою в Гарварді під керівництвом Ронольда В. П. Кінга. Антена Кінга мала дротову форму і призначалася для використання в ракетах для телеметрії.

### 2.3 Планарна реалізація інвертованої F-антена

Планарна обернена F-антена (PIFA) використовується для бездротових схем, реалізованих у мікросмужковій формі. Мікросмужковий формат є

					КВРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

форматом вибору для сучасної радіочастотної електроніки. Вона може бути використана для реалізації необхідних РЧ-компонентів з розподіленими елементами, таких як фільтри, і в той же час є економічним, оскільки використовуються ті ж методи масового виробництва, що й для друкованих плат.

Друкована перевернута F-антена може бути реалізована у класичній перевернутій F-формі, як правило, з одного боку друкованої плати, де заземлюючу площину було видалено з-під антени. Однак інший підхід – це модифікована патч-антена, короткозамкнута патч-антена. У цьому підході один край накладки або якась проміжна точка заземлюється за допомогою заземлюючих контактів або отворів до площини заземлення. Це працює за тим же принципом, що й перевернуте F; дивлячись збоку, можна побачити форму F, просто елемент антени дуже широкий у горизонтальній площині. Коротко замкнена патч-антена має більшу смугу пропускання, ніж тонка лінійна антена через більшу площу випромінювання. Подібно до типу тонкої лінії, закорочена антена може бути надрукована на тій самій друкованій платі, що й решта схем. Однак вони зазвичай друкуються на власній платі або на діелектрику, закріпленому на головній платі. Це робиться для того, щоб антена, яка може бути підвішена та фактично перебувати в повітряному діелектрику, знаходилася на більшій відстані від площини заземлення, ніж це було б інакше, або використовуваний діелектрик є більш придатним матеріалом для радіочастотних характеристик.

Термін PIFA багато авторів (наприклад, Санчес-Ернандес) зарезервували для короткозамкнутої антени, де антенний елемент є широким із заземленою площиною під ним. Тонколінійні антени перевернутого F із площиною заземлення вбік, як A і B на схемі, називаються просто IFA, навіть якщо вони мають плоский формат. Автор може навіть назвати IFA такого типу друкованою

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перевернутою F-антенною, але залишити PIFA для короткозамкнутого типу (наприклад, Hall і Wang).

Загальна конфігурація для короткозамкнутої патч-антени полягає в тому, щоб розмістити замикаючий штифт якомога ближче до одного кута, а живильний штифт відносно близько до замикаючого штиря. У цій конфігурації резонансна частота приблизно визначається як

$$f_0 = \frac{c}{4(w+b)\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (2.1)$$

де  $f_0$  – резонансна частота;

$w, b$  – ширина і ширина плями,

$c$  – швидкість світла,

$\epsilon_r$  – діелектрична проникність підкладки.

Ця формула справедлива, лише якщо на антену не впливають сусідні діелектрики, наприклад корпус пристрою.

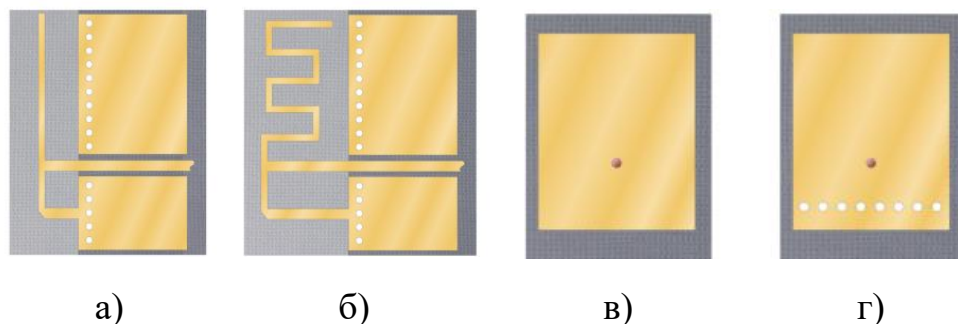


Рисунок 2.3 – Типи антен: а) друкована перевернута F-антена; б) меандрова друкована перевернута F-антена; в) патч-антена; г) плоска перевернута F-антена (PIFA)

Ще один варіант, який можна зустріти, це меандрова перевернута F-антена (MIFA). Якщо недостатньо місця на платі, щоб витягнути антену на всю необхідну довжину, антену можна вигнути, щоб зменшити її висоту, зберігаючи її проектну електричну довжину. Це можна порівняти із закручуванням спіралі антени, як у гумової антени.

Інвертована F-антена має вузьку смугу пропускання. Більш широкою смуги можна досягти подовженням антени, що підвищує її стійкість до випромінювання. Інше рішення - розмістити дві антени поруч. Це працює, тому що зв'язані резонатори мають смугу пропускання ширшу, ніж смуга пропускання кожного резонатора окремо. Більшість методів виробництва багатодіапазонних антен також ефективні для розширення смуги пропускання.

#### 2.4 Практичне застосування інвертованої антени

Антену мобільного пристрою повинна бути маленькою і достатньо легкою, щоб поміститися в простір, передбачений для неї в конструкції смартфона. Пленарні F-подібні антени є хорошим вибором для пристроїв мобільного зв'язку, оскільки вони відповідають вимогам щодо малих розмірів, потужності та ефективності. Ці антени підтримують багатодіапазонний частотний режим для підключення стільникових пристроїв, WiFi і Bluetooth, що робить їх основним кандидатом для таких систем як IoT-сумісних об'єктів і пристроїв. Таке використання антени дозволить дистанційно використовувати та контролювати інші пристрої для дому (світильники, гаражні ворота тощо), роботи та виробництва.

Антену PIFA слід розглядати як комбінацію інвентарної F і короткозамкненої прямокутної антени SC-MSA (рис. 2.4). I IFA, і SC-MSA мають

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29



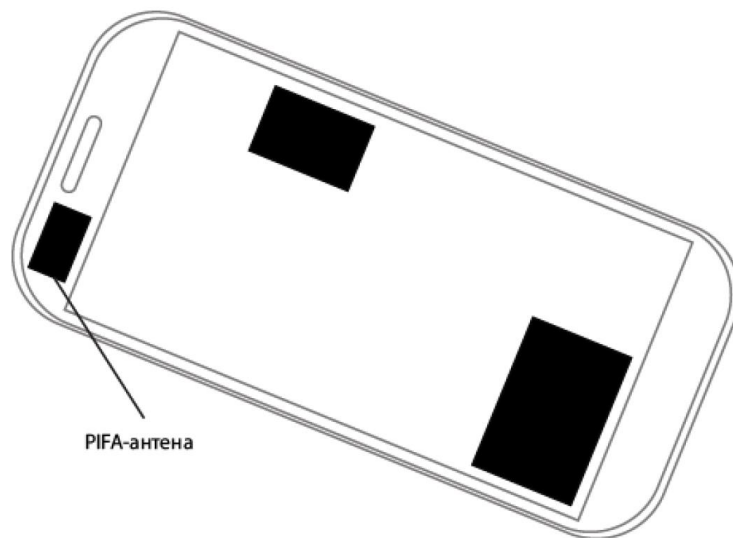


Рисунок 2.5 – Приклад розміщення антени на мобільному

## 2.5 Висновки до другого розділу

Отже, в даному теоретичному розділі було проведено огляд сучасного стану випромінюючих пристроїв для бездротових мережах. Правильна антена покращить передачу та прийом, знизить енергоспоживання та підвищить доступність пристрою зв'язку. Було обрано апарат за допомогою якого ці антени можуть бути аналізовані.

					КВРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

### 3 КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРОДУКТИВНІСТЬ АНТЕНИ

#### 3.1 Математичне моделювання антени

Пленарна інвертована F-антена (PIFA) використовується для бездротової схеми, реалізованої в мікросмужкових лініях. Формат антени мікродіапазону є форматом вибору для сучасної електронної радіотехніки. Його можна використовувати для реалізації важливих компонентів розподілених елементів, таких як фільтри, при цьому він економічний, оскільки використовуються ті ж методи масового виробництва, що й для друкованих плат.

Друкована перевернута F-антена може бути реалізована у класичній перевернутій F-формі, як правило, на одній стороні плати, в якій екран (земля) розташований під антеною. Однак іншим підходом є модифікована патч-антена, тобто коротка патч-антена. При такому підході один край латки або якась проміжна точка ґрунтується шпильками або підвішується до основної площини. Це працює за тим же принципом, що й перевернута F-антена.

З огляду на бік, можна вибрати форму F (рис. 3.1), навіть якщо елемент антени ширший біля горизонтальної ділянки.

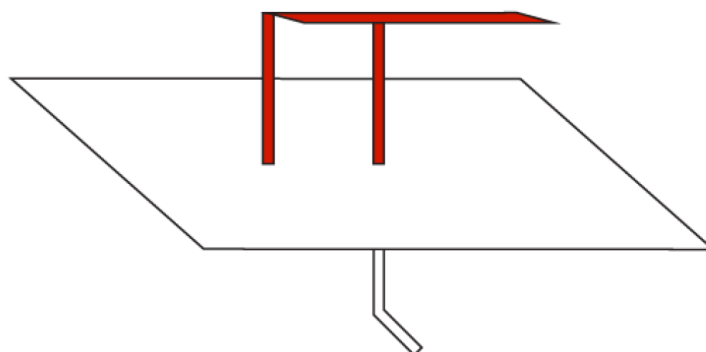


Рисунок 3.1 – Пленарна інвертована F-антена

Укорочена патч-антена має більш широку смугу, тип тонкої лінії за рахунок більшої площі випромінювання. Подібно до типу тонкої лінії, коротка патч-антена може бути надрукована на тій самій друкованій платі, що й інша схема. Однак зазвичай вони друкуються на власній платі або діелектрику, який закріплюється на основній платі. Це робиться для того, щоб антена могла бути підвішеною, ефективно розташовуватися в повітряному діелектрику і мати більшу відстань від площини заземлення.

Зменшення розміру антени зазвичай погіршує характеристики антени. Тому важливо вивчити фундаментальні обмеження та параметричні компроміси, пов'язані зі зменшенням розміру.

Антена складається з тонкої плоскої металевої пластини ("пяточка"), розташованої на невеликій  $(0,01...0,1)\lambda$  відстані паралельно плоскому металевому екрану. Проміжок між накладкою та екраном можна заповнити шаром діелектрика ( $\epsilon = 2,5...10$ ,  $\text{tg}\delta = 10^{-3}...10^{-2}$ ), а саму антену можна виготовити за технологією друкованої плати ( мікросмужкова або друкована патч-антена). Як правило, накладка має прямокутну форму, а відстань між випромінюючими сторонами прямокутника (довжина не випромінюючої сторони) близька до половини робочої довжини хвилі (з урахуванням  $\epsilon$ ).

Антена живиться від штиря, що проходить через екран (наприклад, є продовженням сигнального провідника коаксіальної лінії) і зміщений від центру прямокутника в бік однієї з його випромінюючих сторін, або від мікросмужкової лінії, сигнальний провідник якого розташований в площині патча і підходить до однієї з його випромінюючих сторін. В обох випадках збудливі провідники електрично з'єднані з патчем. Відомий також електродинамічний спосіб збудження накладки через щілину в екрані. Поляризація випромінюваної електромагнітної хвилі в напрямку нормалі до плями близька до лінійної, відомі технічні рішення дозволяють формувати хвилю з круговою поляризацією. Патч-

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

антени найпростішої конструкції вузькосмугові (<5%), але спеціальні технічні рішення дозволяють розширити робочу смугу частот до 50% і більше або побудувати багатодіапазонні антени.

На рисунку 3.2 зображена схема F подібної антени.

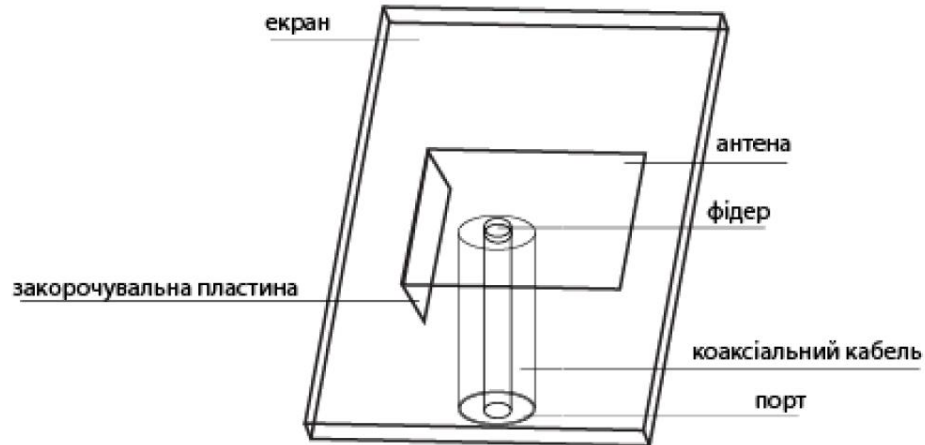


Рисунок 3.2 – Схема антени

На ньому показано такі елементи, як:

- екран – основа всієї схеми, що грає роль заземлення;
- укорочувальна пластина, що з'єднує антену і екран;
- антена;
- фідер – джерело живлення антени;
- коаксіальний кабель;
- порт – місце підключення всієї антени до інших пристроїв (основна плата пристрою).

У методі просторової мережі еквівалентна схема будується за такими трьома принципами. По-перше, передбачається, що інтервал між дискретними точками є одновимірною лінією. По-друге, кожна точка розглядається як вузол, де діє закон безперервності електричного або магнітного струмів. Нарешті, умови середовища виражаються як зосереджені елементи. Щоб реалізувати

мережу відповідно до цих принципів, усі електромагнітні змінні відповідають змінним схеми в кожному вузлі.

Для ідеалізованого випадку заземлення нескінченної протяжності антени може бути змодельована методом зображення. Однак для антени, встановленої на кінцевій площині заземлення, зовнішній край площини заземлення розсіює падає випромінювання у всіх напрямках і, отже, струми на площині заземлення та антени відрізняються від струмів для нескінченної площі заземлення. На зовнішньому краю площини заземлення струму на верхній і нижній поверхні заземлюють площинні рівні за величиною, але протилежні за напрямком, після чого сумарний струм повинен бути нульовим на краю. Дифракція зовнішнього краю стає все більш і більш значною, оскільки розмір площини землі зменшується через збільшення величини струмів на поверхнях поверхні землі на зовнішньому краю. Фронтальна дифракція може змінити вхідний імпеданс більш ніж на 100 відсотків і посилення спрямованості на площині заземлення більш ніж на 6 дБ порівняно зі значеннями для нескінченного заземлення.

Антенна PIFA підтримує високий струм на нижніх поверхнях плерарних елементів і в горизонтальній площині порівняно з полем над площиною елемента. У цьому відношенні PIFA має хороші характеристики для використання під впливом зовнішніх факторів, які впливатимуть на його характеристики (наприклад, руки мобільного оператора/тіло). Площі розподілу струму антени відрізняються для різних геометричних розмірів використовуваних пластин. Розподіл струму збільшується ближче до короткого виступу і зменшується далі. Земне випромінювання також може призвести до помилкових випромінювань або додаткової енергії розриву, що, у свою чергу, може призвести до спотворень в магістралі або небажаних втрат потужності. Також можна контролювати вплив поверхневої хвилі, використовуючи заборонену зону фотонної структури (або просто проміжки в діелектрику).

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

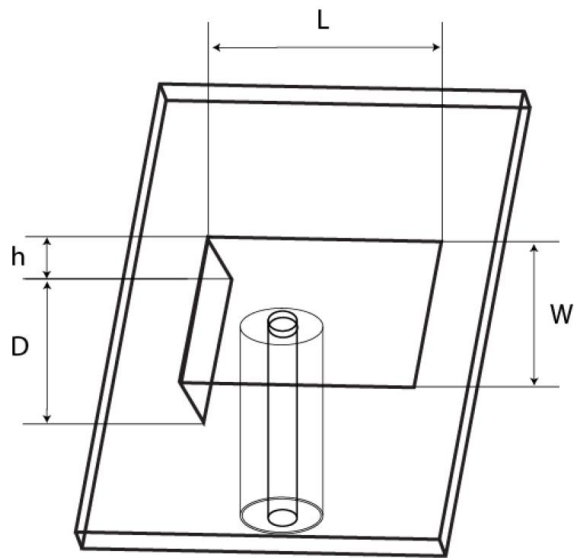


Рисунок 3.3 – PIFA антена з позначенням сторін

де:  $D$  – ширина укорочуючої плити;  $h$  – висота укорочуючої плити;

$L$  – ширина антени;  $W$  – довжина антени

Як вже зазначалося, керамічна антена являє собою тривимірну конструкцію, на поверхню кожної сторони якої нанесені металеві провідники певної форми. Ця конструкція може мати одну або кілька точок збудження. У цих точках до антени подається напруга збудження, в результаті чого виникає структура випромінювання. Крім точок збудження, на друкованій антені можуть бути точки заземлення (підключення до заземлюючої поверхні). Струми, задані в цій складній конструкції, формують діаграму спрямованості та реалізують інші характеристики антени, необхідні для встановлення зв'язку з персональним комп'ютером або іншим пристроєм. Оскільки в результаті електродинамічного розрахунку можна визначити розподіл струмів в системі, їх аналіз може бути основою для модернізації антени. У процесі проектування антени необхідно, перш за все, отримати вхідний опір, близький до 50 Ом, так як в цьому випадку можна буде узгодити антену з вхідним підсилювачем і підсилювачем потужності тракту передачі з меншими втратами.

						КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			36

Для моделювання антени PIFA була обрана програма HFSS, яка використовує метод кінцевих елементів (Finite Element Method – FEM) для вирішення рівнянь електродинаміки, включаючи адаптивне генерування та розподіл клітин. Рішення для електромагнітного поля, знайдені з рівнянь Максвелла, дозволяють точно визначити всі характеристики мікрохвильового пристрою, враховуючи виникнення і перетворення одного типу хвилі в інший, втрати в матеріалах і випромінюванні і т. д. HFSS забезпечує можливості моделювання для антен, дільників потужності, комутаційних схем, хвильових елементів, мікрохвильових фільтрів і тривимірних розривів, які зводяться до креслення структури, точної специфікації матеріалу, ідентифікації порту та необхідних характеристик. В результаті розрахунку знаходять поля всередині і зовні структур, а також багатовимірні S-параметри.

HFSS містить розв'язувач, який, як доведено, забезпечує точні та точні результати проектування з використанням HFSS, забезпечуючи високу гарантію того, що виміряна продуктивність буде такою ж, як і моделювання.

Однак для отримання цих достовірних результатів необхідно правильно вибрати параметри розрахунку. Це стосується не тільки правильного малювання всіх форм і точного призначення матеріалів аналізованої конструкції, але і того, якими машинними ресурсами володіє дизайнер, і наскільки точно він може розділити простір на елементи декомпозиції, а також як швидко машина може вирішити завдання за допомогою Метод ущільнення сітки важливий для успіху, наскільки виправдано і правильно обрано кількість аналізованих режимів у складних елементах пристрою.

### 3.2 Конструкція базової антени MIMO

По-перше, розглянемо основний фізичний принцип методу розв'язки на основі завантаження феритової плівки. Схема базової антени MIMO без

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

урахування будь-якої техніки розв’язки показана на рисунку 3.4, використання двох інвертованих F-антен для забезпечення цільової робочої частоти LTE діапазону 42 (3,4–3,6 ГГц) для смартфонів 5G. Найближча відстань від краю до краю становить лише 1,4 мм (близько  $0,017\lambda$  при 3,60 ГГц). Два монополя «спина до спини» розташовані на довгому краю верхнього шару підкладки FR4 товщиною 1 мм (діелектрична проникність становить  $\epsilon=4,4$ , а дотична втрата становить 0,02), з площею 24 мм x 5 мм, які симетричні вздовж центру довгого краю. Металевий шлейф нанесений на нижній шар підкладки з розмірами 168 мм x 66 мм.

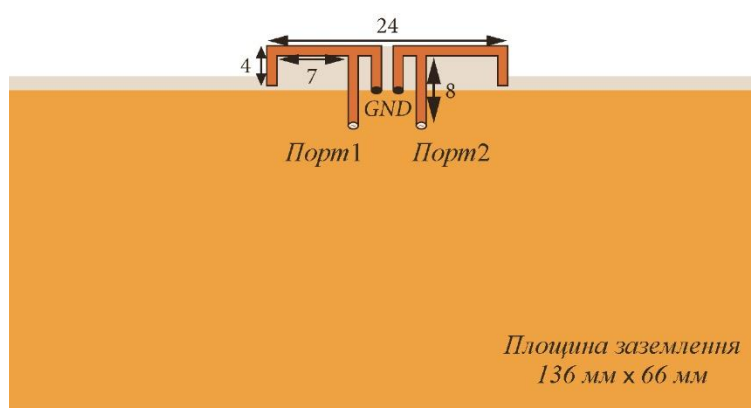


Рисунок 3.4 – Геометрія запропонованої базової антени (мм)

### 3.3 Параметри запропонованої антени MIMO

Завдяки оптимізації за допомогою програмного забезпечення ANSOFT HFSS було визначено змодельовану діаграму S-параметрів базової антени, як показано на рисунку 3.5, де Порт 1 встановлено як джерело збудження, а Порт 2 встановлено на відповідне навантаження 50  $\Omega$ . Можна побачити, що резонансна частота становить близько 3,6 ГГц, а максимальна глибина зворотних втрат ( $S_{11}$ ) становить 37 дБ, повністю охоплюючи діапазон LTE 42 (3,40–3,60 ГГц), із смугою пропускання –6 дБ. Однак ізоляція ( $S_{21}$ ) для базової антени вища за

-10 дБ у діапазоні 42 LTE, демонструючи сильний взаємозв'язок між двома монопольними елементами. Цей зв'язок між двома випромінювальними елементами під час нормальної роботи є результатом ефекту взаємної інтерференції, коли відстань між антеною становить менше  $0,28\lambda$ . Відстань між елементами  $0,28\lambda$  є критичною відстанню для перекриття та неперекриття форм ефективної площі елемента та ефекту парадоксу підсилення елемента [35].

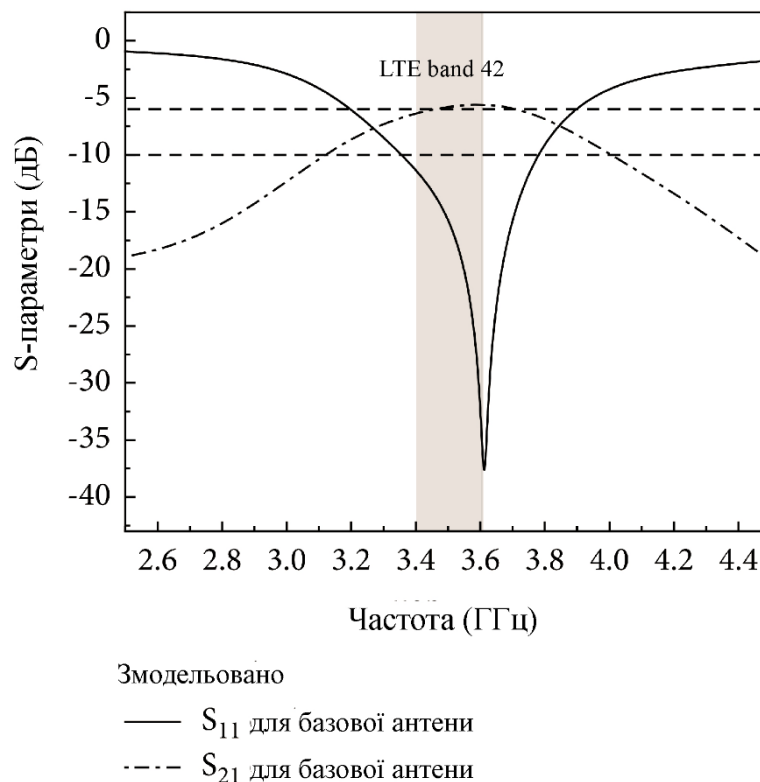


Рисунок 3.5 – Змодельовані S-параметри запропонованої базової антени

Щоб зрозуміти вплив навантаження феритової плівки, змодельований розподіл поверхневого струму запропонованої антени на 3,6 ГГц – без і з навантаженням феритової плівки – показано на рисунку 3.6. Ці розподіли струму отримані за умови, що порт 1 збуджений, а порт 2 підключений до відповідного навантаження, і висококонцентрований розподіл струму можна спостерігати на збудженій інвертованій F-антені за будь-яких умов.

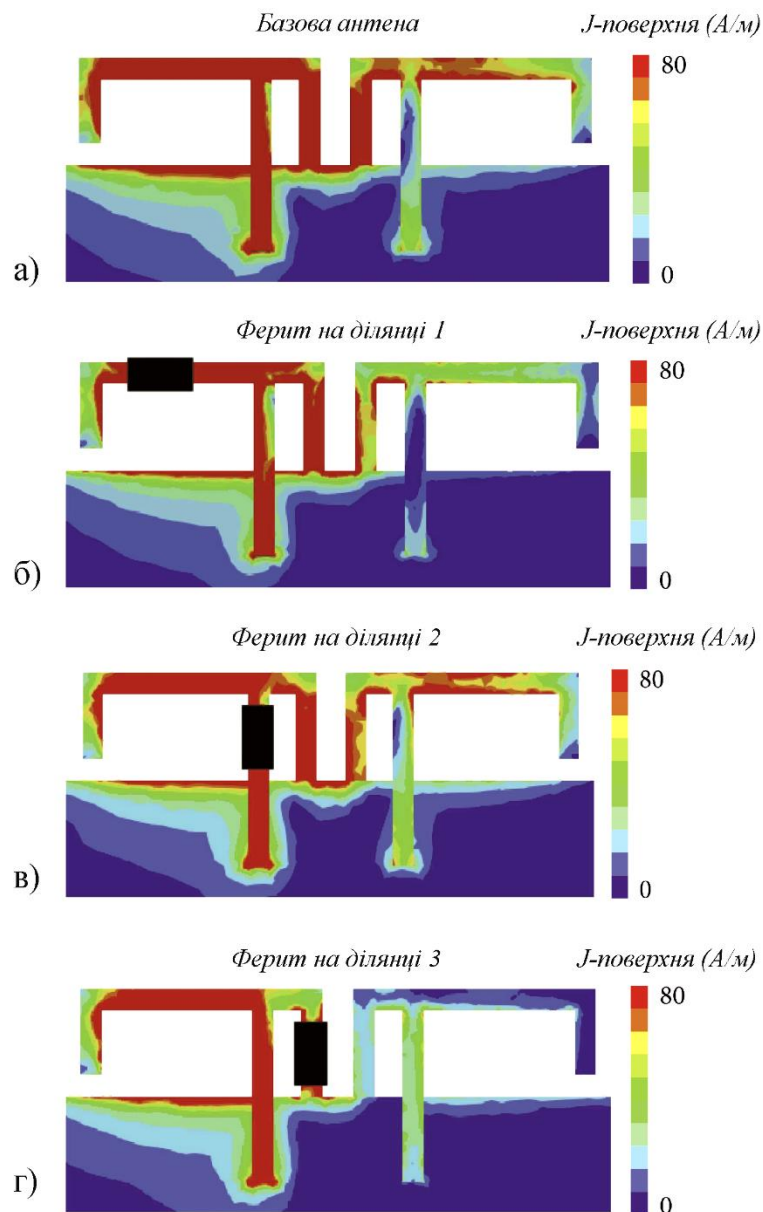


Рисунок 3.6 – Розподіл поверхневого струму запропонованої антени (а) без фериту, (б) з феритом на ділянці 1, (в) з феритом на ділянці 2 і (г) з феритом на ділянці 3

На базовій антені без навантаження з феритової плівки сильний індукований струм у навантаженій інвертованій F-антені можна чітко спостерігати на рисунку 3.3,а, що свідчить про сильний взаємозв'язок у цій двоелементній антені МІМО. Щоб перевірити вплив навантаження феритової плівки на явище роз'єднання, було вибрано три зони сильного випромінювання

на збуджене навантаження інвертованої F-антени на феритову плівку товщиною 0,6 мм, як показано на рисунках 3.6 (б, в, з).

Параметри феритового матеріалу, що використовуються в моделюванні, встановлюються наступним чином: відносна проникність  $\mu_r = 100$ , відносна діелектрична проникність  $\epsilon_r = 13$ , а намагніченість насичення  $M_S = 2500$  Гс (Гаус). За допомогою навантаження феритової плівки на різні ділянки індуковані струми на навантаженій інвертованій F-антені можуть бути придушені, що призведе до низького взаємного зв'язку. Серед областей навантаження найбільш значне зменшення розподілу струму на навантажену інвертовану F-антену, коли навантаження феритової плівки знаходиться на ділянці 3, яка демонструє найменший взаємозв'язок. Тому порівняємо вплив зон навантаження феритової плівки на S-параметри, щоб додатково продемонструвати ефективність розв'язки.

На практиці всі елементи в антені МІМО повинні бути збуджені для підвищення пропускної здатності каналу, тому навантажено феритову плівку на симетричну ділянку двоелементної МІМО-антени, а системи подвійної антени, завантажені різними площами феритової плівки, які були оптимізовані на рисунку 3.6, визначені як Антена 1, Антена 2 і Антена 3 і представлено на рисунку 3.7.

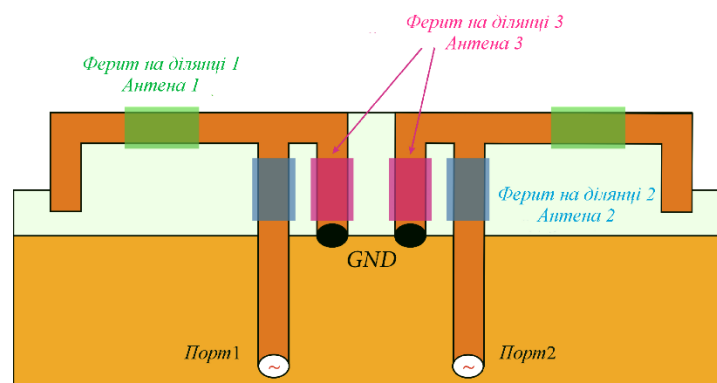


Рисунок 3.7 – Двовимірна схема запропонованої антени з феритово-плівковим навантаженням

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

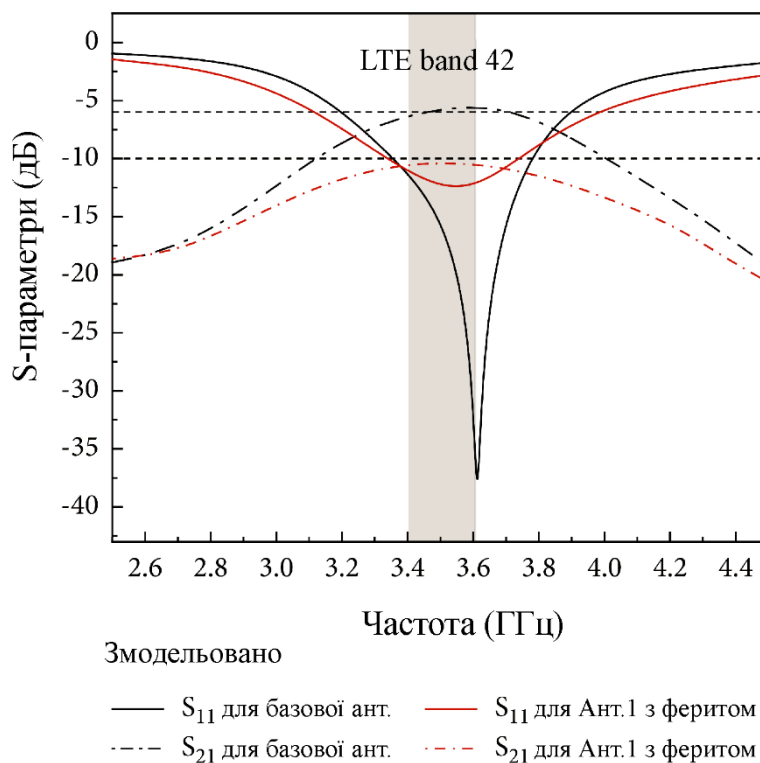


Рисунок 3.8 – Змодельовані S-параметри Антени 1

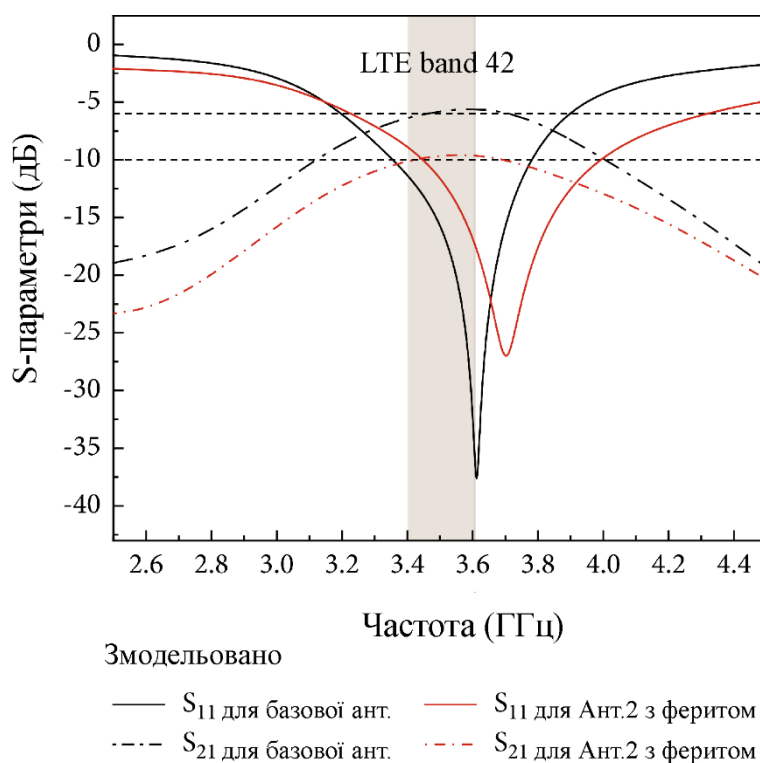


Рисунок 3.9 – Змодельовані S-параметри Антени 2

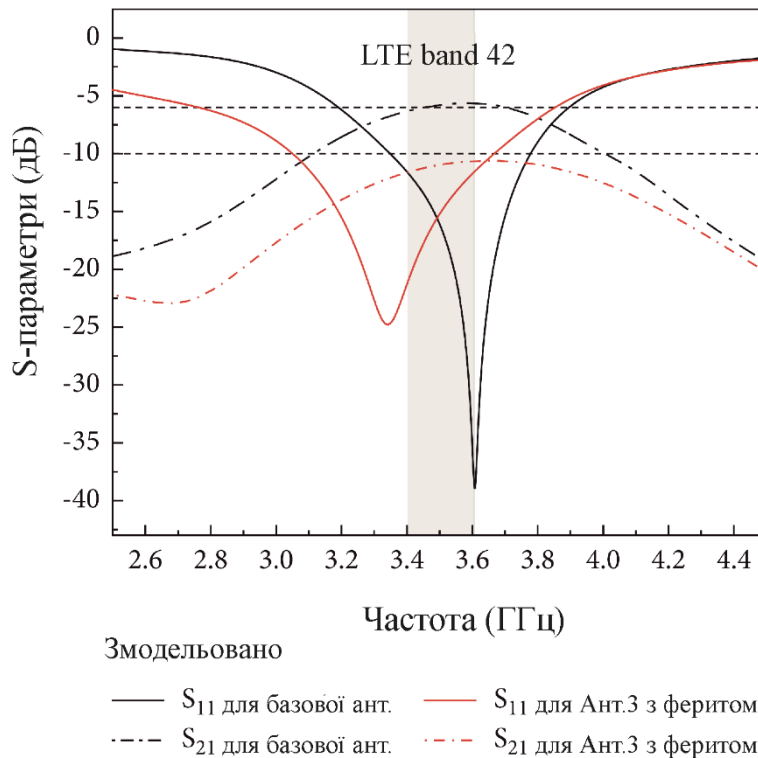


Рисунок 3.10 – Змодельовані S-параметри Антени 3

При навантаженні феритової плівки взаємний зв'язок значно зменшується по всій смузі частот. Однак навантаження феритової плівки на різні ділянки мало різні S-параметри, як показано на рисунках 3.8–3.10. Для навантаження феритової плівки на ділянці 1, показаного на рисунку 3.8, ізоляція Антени 1 між портом 1 і портом 2 краща, ніж 10,4 дБ на 3,4–3,6 ГГц, але коефіцієнт відбиття зменшується з 37,6 дБ до 12,37 дБ по всьому робочому діапазону. Коли ділянка 2 завантажується феритовою плівкою, як показано на рисунку 3.9, пікова ізоляція Антени 2 вища, ніж -10 дБ в робочій смузі, що вказує на сильніший взаємний зв'язок, ніж у Антени 1. Коефіцієнт відбиття різко не змінюється, але можна побачити збільшення резонансної частоти на 100 МГц – від 3,60 ГГц до 3,70 ГГц – із збільшенням навантаження на феритову плівку. Нарешті, як показано на рисунку 3.10, феритова плівка Антена 3 охоплює ділянку 3, а змодельовані S-параметри в цьому випадку демонструють хороші характеристики ізоляції – краще ніж 10,61 дБ у діапазоні LTE 42 – що означає слабшу взаємну зчеплення,

ніж у Антени 1. Коефіцієнт відбиття не демонструє помітного погіршення у всьому робочому діапазоні. Крім того, резонансна частота зменшується з 3,60 ГГц до 3,34 ГГц зі збільшенням навантаження феритової плівки, демонструючи іншу тенденцію, ніж Антена 2. Діючий механізм, що лежить в основі впливу різних місць навантаження феритової плівки на IFA, буде додатково обговорено шляхом створення відповідних фізичних моделей.

### 3.4 Висновки до третього розділу

У даному розділі розглянуто фундаментальний фізичний принцип методу розв'язки, заснованого на навантаженні феритової плівки. Основна схема антени МІМО представлена без урахування будь-якої техніки розв'язки, з використанням двох перевернутих F-антен для забезпечення цільової робочої частоти діапазону LTE 42 (3,4–3,6 ГГц) для смартфонів 5G. Зазначено, що найближча відстань від краю до краю становить лише 1,4 мм (приблизно  $0,017\lambda$  на 3,60 ГГц).

Для перевірки впливу навантаження феритової плівки на явище розв'язки були обрані три зони сильного випромінювання для навантаження, що збуджується, інвертованої F-антени на феритової плівці товщиною 0,6 мм.

					КВРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

#### 4 АНАЛІЗ РОЗВ'ЯЗКИ НАВАНТАЖЕННЯ ФЕРИТОВОЇ ПЛІВКИ

Створено модель еквівалентної схеми випромінювання запропонованих антен для визначення впливу навантаження феритової плівки на коефіцієнти відбиття антени. Варіації змодельованого імпедансу з різними площами завантаження феритової плівки досліджено та показано на рисунку 4.1 та рисунку 4.2. Відповідно до теорії імпедансу в аналізі схем [36], узгоджувальний імпеданс антени можна виразити як комплексне число:

$$Z = R + jX, \quad (4.1)$$

де  $R$  – еквівалентний опір антени, а  $X$  – еквівалентний реактивний опір антени. Коли  $X > 0$ , реактивний опір є індуктивним, а в іншому випадку він є ємнісним. У таблиці 4.1 наведено  $Z$ -параметри антен з феритовою плівкою на різних ділянках на їх резонансних частотах.

Таблиця 4.1 – Зведені  $Z$ -параметри для антен з феритовою плівкою на різних ділянках на резонансних частотах

	Базова антена	Антенa 1	Антенa 2	Антенa 3
Частота	3.60 ГГц	3.53 ГГц	3.70 ГГц	3.32 ГГц
$Z_{11}$	$43.52 + 24.69j$	$71.24 + 11.98j$	$61.83 + 8.60j$	$50.9 - 3.92j$
$Z_{21}$	$25 + 44.92j$	$21.51 + 43.18j$	$29.40 + 21.75j$	$-6.19 + 25.18j$

Імпеданс базової антени без завантаження феритової плівки на частоті 3,60 ГГц становить  $Z_{11} = 43,52 + 24,69j$ . Навантажуючи феритову плівку на різні ділянки, можна спостерігати різні зміни власного опору цих антен на

резонансних частотах. Із завантаженням феритової плівки на ділянці 1 реальна частина імпедансу для Антени 1 збільшується з 43,52  $\Omega$  до 71,24  $\Omega$ , а його уявна частина змінюється з 24,69 до 11,98. Це означає, що навантаження феритової плівки на ділянку 1 в першу чергу збільшує еквівалентний опір антени та змінює індуктивну характеристику. Коли феритова плівка навантажується на ділянці 2, дійсна частина імпедансу для Антени 2 змінюється з 43,52  $\Omega$  до 61,83  $\Omega$ , а його уявна частина падає з 24,69 до 8,60. Збільшення еквівалентного опору і зменшення реактивного опору можна спостерігати в Антені 2, що вказує на знижену індуктивну характеристику для феритової плівки на ділянці 2. З іншого боку, коли феритова плівка навантажується на ділянку 3, дійсна частина опору антени зростає з 43,52  $\Omega$  до 50,90  $\Omega$ , а його уявна частина зменшується з 24,69 до -3,92. Знову ж таки, еквівалентний опір збільшується в цьому випадку, але різна зміна реактивного опору може призвести до збільшення ємнісної характеристики Антени 3.

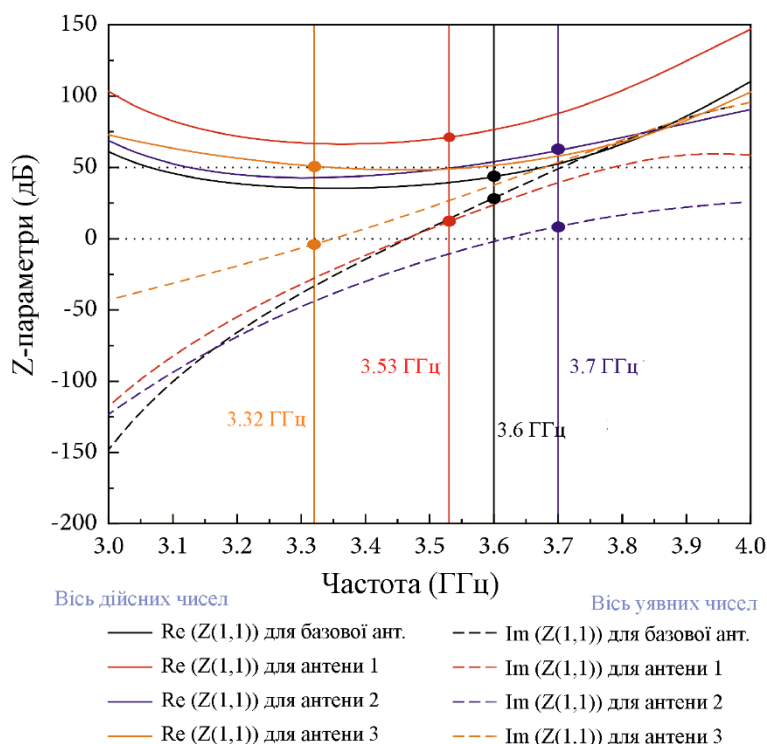


Рисунок 4.1 – Імпеданс  $Z_{11}$  для запропонованої антени з різними ділянками навантаження феритової плівки



модель, також визначити гілку в ділянці 2 і гілку в ділянці 3 як індуктивну та ємнісну для їхніх змін імпедансу, як показано на рисунку 4.1. Коли  $R_f$  і  $C_f$  паралельно з  $L_1$ , індуктивність Антени 2 буде зменшуватися з невеликим збільшенням опору. Крім того, з  $R_f$  і  $C_f$  паралельно з  $C_1$ , ємність Антени 3 буде збільшуватися з незначним збільшенням опору. Ці тенденції добре узгоджуються з особливостями тренду зміни імпедансу при навантаженні феритової плівки. Резонансну частоту мікросмушкової антени можна виразити наступним чином [5]:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}, \quad (4.2)$$

де  $L$  і  $C$  – еквівалентна індуктивність і еквівалентна ємність.

Використовуючи рівняння, вихідну резонансну частоту можна зрушити, змінюючи реактивні характеристики антени. Для Антени 1 еквівалентний опір значно відрізняється від відповідного імпедансу  $50 \Omega$ , що призводить до гіршого коефіцієнта відбиття та зсуву резонансної частоти вниз через вплив на еквівалентний реактивний опір. Для Антени 2 і Антени 3 імпеданс узгодження становить близько  $50 \Omega$ , але еквівалентні реактивні опори демонструють очевидні зміни. В результаті, криві коефіцієнта відбиття можна спостерігати в Антені 2 і Антені 3, тоді як зменшення індуктивності призведе до переходу резонансної частоти до високочастотного діапазону в Антені 2 і збільшення ємності призведе до того, що резонансна частота Антени 3 переміститься в нижчий діапазон частот. Ця модель може пояснити зміну коефіцієнта відбиття, спричинену навантаженням феритових плівок на різні ділянки базової антени, як показано на рисунку 3.4.

					КВРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

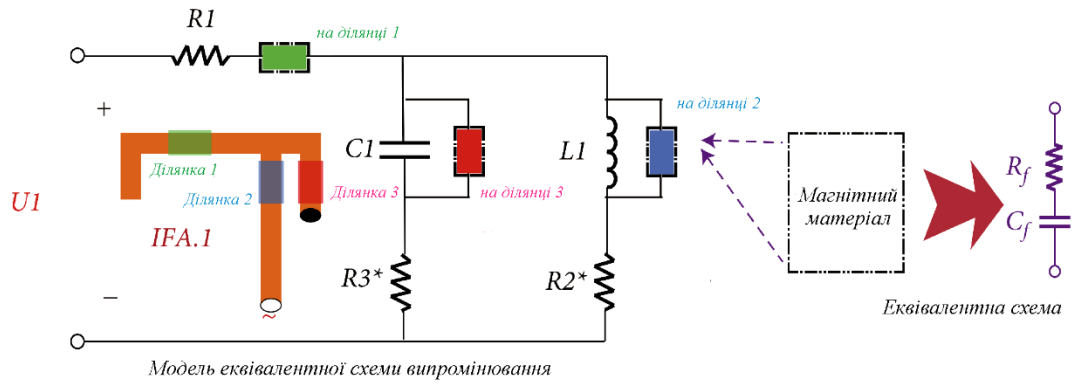


Рисунок 4.3 – Спрощена модель еквівалентної схеми випромінювання запропонованої антени із завантаженням феритової плівки

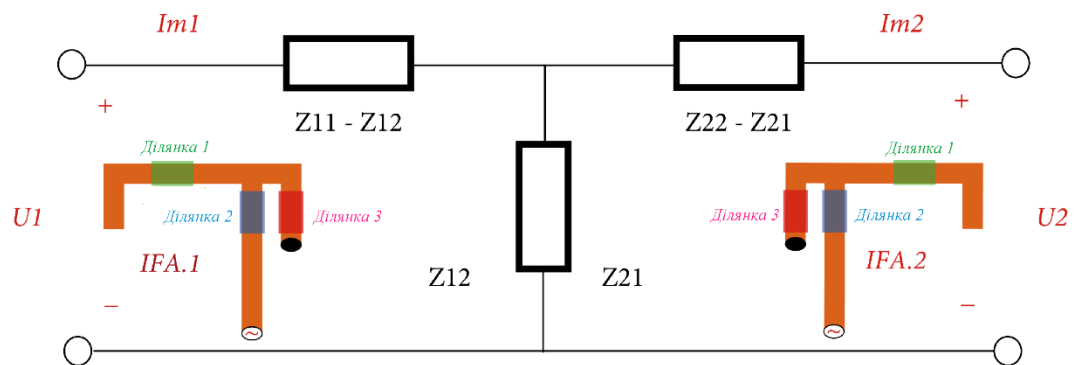


Рисунок 4.4 – Спрощена модель еквівалентної схеми двоелементної антени

Зв'язок між двоелементними антенами може бути еквівалентним двопортовій мережі, як показано на рисунку 4.4. Опір випромінювання симетричного елемента можна виразити наступним чином:

$$\begin{aligned}
 Z_{\Sigma 1} &= \frac{U_1}{I_{m1}} \\
 &= Z_{11} + \frac{I_{m2}}{I_{m1}} Z_{12},
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{\Sigma 2} &= \frac{U_2}{I_{m2}} \\
 &= Z_{22} + \frac{I_{m2}}{I_{m1}} Z_{21},
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

де  $Z_{11}$ ,  $Z_{12}$  та  $Z_{\Sigma 1}$  та  $Z_{22}$ ,  $Z_{21}$  та  $Z_{\Sigma 2}$  – власний опір, взаємний опір, і імпеданс випромінювання інвертованої F-антени 1 і інвертованої F-антени 2, приписаний їх відповідним струмам пучності, відповідно. За цією формулою, чим менший взаємний опір антени, тим менший вплив буде діяти на інші антени. Як показано в таблиці 4.1, взаємний опір базової антени без завантаження феритової плівки на частоті 3,60 ГГц становить  $Z_{21} = 25 + 44.92j$ . При навантаженні феритової плівки на різні ділянки взаємні імпеданси трьох антен на їх резонансних частотах зміняться на  $21.51 + 43.18j$ ,  $29.40 + 21.75j$ , а також  $-6.19 + 25.18j$ , відповідно. Очевидно, що взаємний імпеданс Антени 3 має найменше значення, вказуючи на те, що найкраща ізоляція між двома перевернутими F-антенами буде досягнута шляхом навантаження феритової плівки на ділянці 3.

Щоб запропонувати глибше розуміння ефективності розв'язки, було змодельовано розподіл поверхневих струмів запропонованої двоелементної антени з різними площами навантаження феритової плівки; результати для яких порівнюються на рисунку 4.5. Для базової антени без завантаження феритової плівки сильний індукований струм в інвертованій F-антені 2 можна чітко спостерігати на рисунку 4.5,а.

З іншого боку, при навантаженні феритової плівки на різні ділянки, як визначено для Антени 1, Антени 2 і Антени 3 вище, можна спостерігати значне зниження щільності струму в інвертованій F-антені 2. Ці спостереження означають, що значну ізоляцію між двома елементами можна отримати за допомогою завантаження феритової плівки.

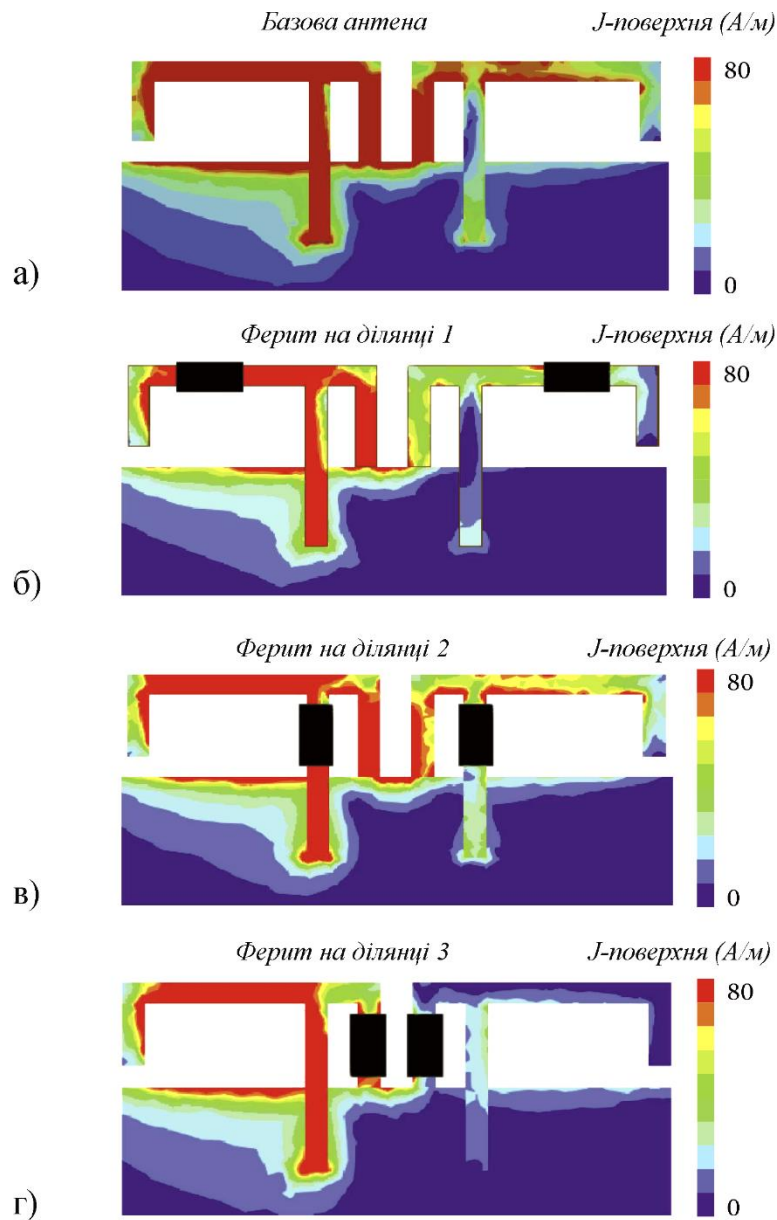


Рисунок 4.5 – Розподіл струму на поверхні:

а) базової антени, б) Антена 1, в) Антена 2 та г) Антена 3

#### 4.1 Тривимірне моделювання діаграми спрямованості

Змодельовані тривимірні діаграми спрямованості двоелементної антени з різними площами завантаження феритової плівки показані на рисунках 4.6-4.9, коли порт 1 і порт 2 подають одночасно. Можна побачити, що феритове покриття суттєво не змінює вихідний напрямок підсилення, але зменшує значення

підсилення в усіх напрямках. Антена 1 із завантаженням феритової плівки на ділянці 1 демонструє очевидне погіршення характеристик діаграми спрямованості порівняно з характеристиками базової антени; однак при навантаженні феритових плівок на ділянку 2 і ділянку 3 спостерігаються лише незначні зменшення діаграми спрямованості. Це узгоджується з тим фактом, що високі магнітні втрати фериту призведуть до низького підсилення антени.

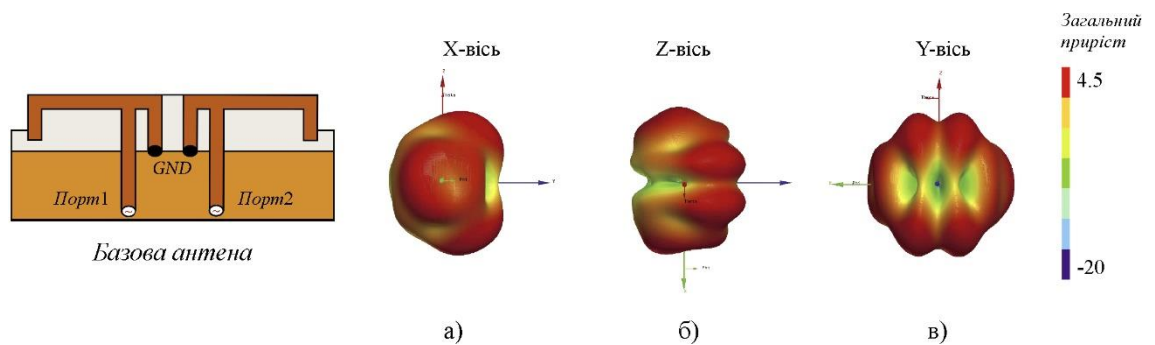


Рисунок 4.6 – Змодельовані 3D діаграми спрямованості, коли порт 1 і порт 2 подаються на (а) вісь  $x$ , (б) вісь  $y$  та (в) вісь  $z$  для базової антени на частоті 3,60 ГГц

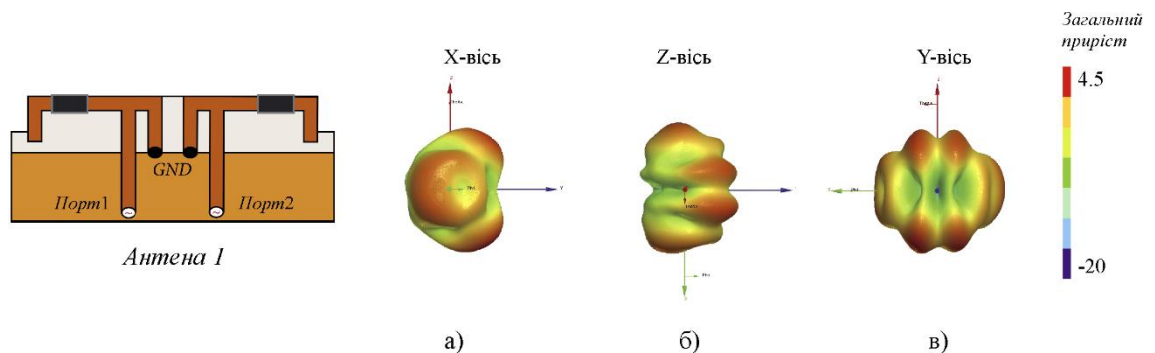


Рисунок 4.7 – Змодельовані 3D діаграми спрямованості, коли порт 1 і порт 2 подаються на (а) вісь  $x$ , (б) вісь  $y$  та (в) вісь  $z$  для Антени 1 на частоті 3,55 ГГц

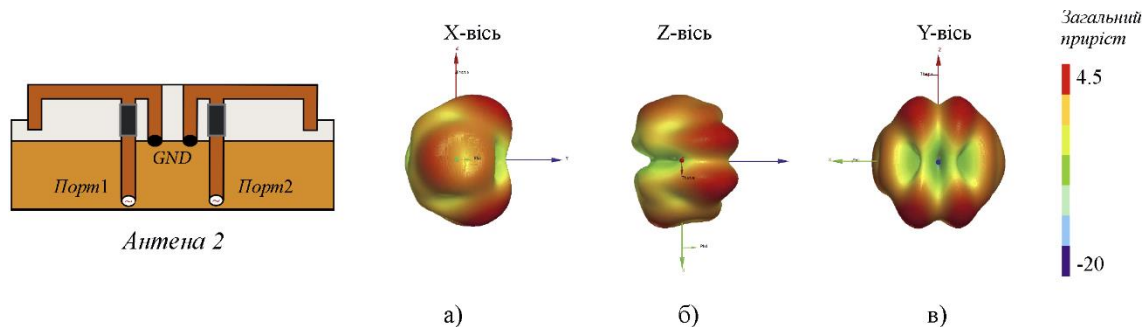


Рисунок 4.8 – Змодельовані 3D діаграми спрямованості, коли порт 1 і порт 2 подаються на (а) вісь  $x$ , (б) вісь  $y$  та (в) вісь  $z$  для Антени 2 на частоті 3,70 ГГц

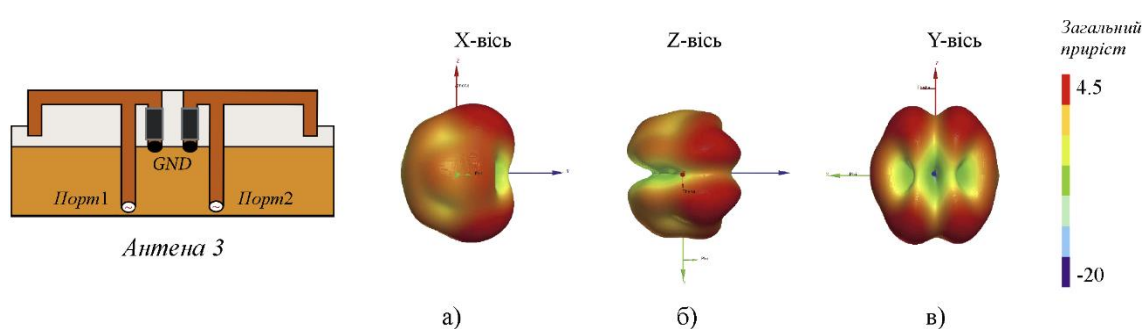


Рисунок 4.9 – Змодельовані 3D діаграми спрямованості, коли порт 1 і порт 2 подаються на (а) вісь  $x$ , (б) вісь  $y$  та (в) вісь  $z$  для Антени 3 на частоті 3,34 ГГц

#### 4.2 Моделювання S-параметрів для антен із різними площами навантаження

Вплив різної товщини феритової плівки на S-параметри трьох антен із різними площами навантаження також моделюються, і результати показані на рисунку 4.10. Завдяки збільшенню товщини феритової плівки пікові ізоляції всіх антен можна зменшити до рівня нижче  $-10$  дБ у межах бажаного робочого діапазону, що демонструє хороший ефект розв'язки. Однак різні площі завантаження феритової плівки та різна товщина феритової плівки матимуть різний вплив на характеристики зворотних втрат. При навантаженні феритової

плівки на ділянці 1 резонансна глибина  $S_{11}$  різко зміниться зі збільшенням товщини феритової плівки, але з невеликим зсувом резонансної частоти. З іншого боку, з феритовою плівкою на ділянці 2 і ділянці 3 великі зсуви резонансної частоти  $S_{11}$  можна спостерігати за збільшенням товщини феритової плівки, в якому вгору для Антени 2 і вниз для Антени 3. На рисунку 4.8 показано змодельовану загальну ефективність і підсилення трьох антен за фіксованою товщиною плівки як  $H = 0,72$  мм. Навантаження феритової плівки певною мірою пожертвує ефективністю та підсиленням антени, але це можна контролювати, вибравши правильну товщину плівки та область завантаження, оскільки Антена 3 демонструє загальну ефективність до 50% і підсилення до 0,5 дБ.

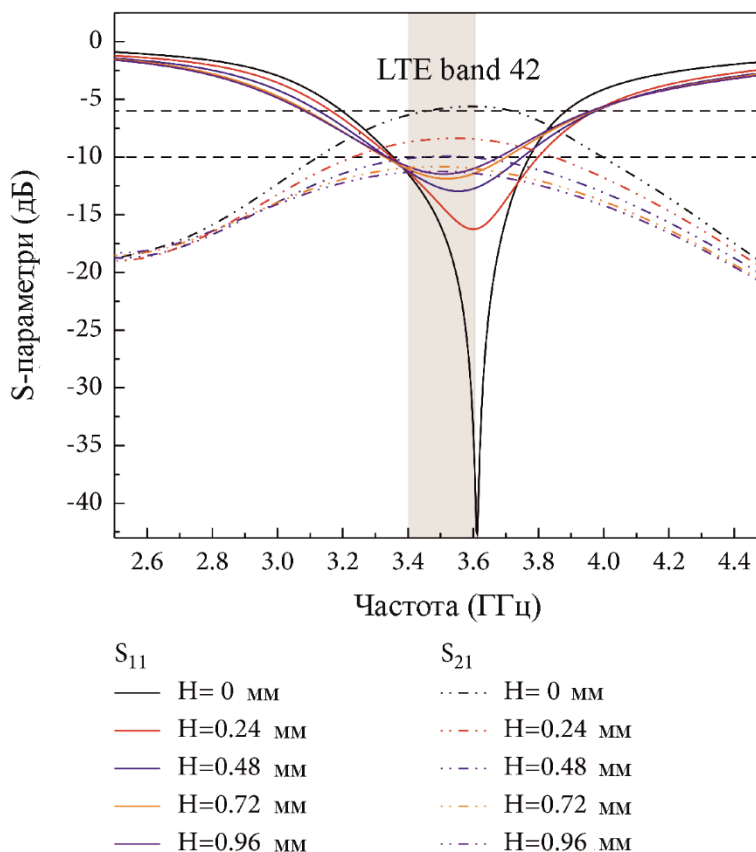


Рисунок 4.10 – Змодельовані S-параметри з різними товщинами феритової плівки для Антени 1

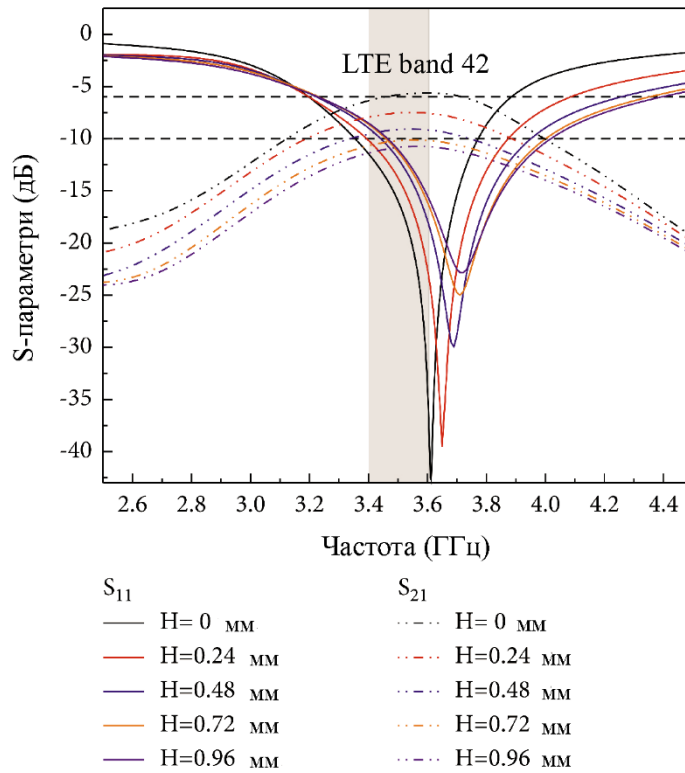


Рисунок 4.11 – Змодельовані S-параметри з різними товщинами феритової плівки для Антени 2

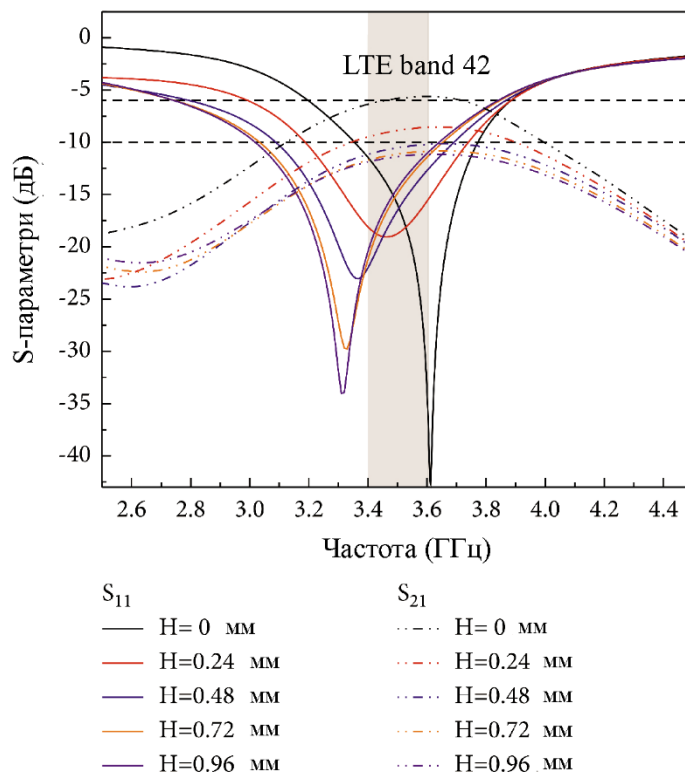


Рисунок 4.12 – Змодельовані S-параметри з різними товщинами феритової плівки для Антени 3

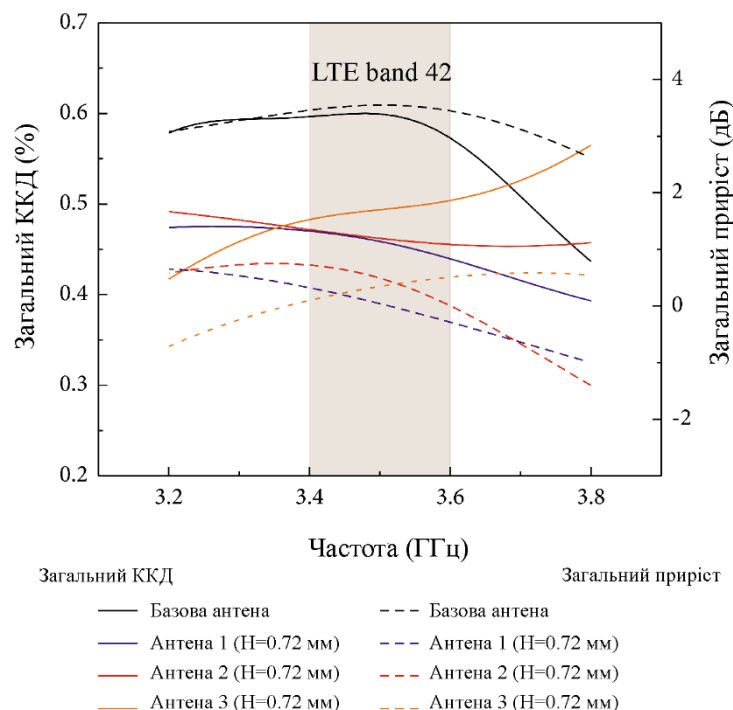


Рисунок 4.13 – Змодельована загальна ефективність і підсилення антени без і з навантаженням феритової плівки товщиною 0,72 мм

Розглядаючи змодельований S-параметр і результати загальної ефективності, обрано Антену 3 і завантажено її феритовою плівкою товщиною 0,72 мм як оптимальний приклад для перевірки характеристик випромінювання запропонованої антени з феритовою плівкою. В експерименті перевірено S-параметр і загальну ефективність і підсилення антени як із завантаженням феритової плівки, так і без нього. Змодельовані та виміряні S-параметри пари монополів без і з компонентом розв'язки порівнюються на рисунку 4.14. Коли базова антена не завантажена феритовою плівкою, взаємний зв'язок  $S_{21}$  між двома монопольними елементами становить більше  $-10$  дБ у діапазоні частот 3,4–3,6 ГГц; у випадку, коли антена мала феритово-плівкове навантаження, відповідно взаємозв'язок значно зменшується і становить менше ніж  $-10$  дБ у всьому діапазоні LTE 42. Крім того, ширину смуги частот  $-6$  дБ базової антени можна розширити за допомогою навантаження феритової плівки з частотою

3,19–3,90 ГГц до 2,74–3,8 ГГц у моделюванні, а також вимірної смуги пропускання з частотою 3,20–3,88 ГГц до 2,83–3,65 ГГц. Вимірні загальні ККД і підсилення запропонованої антени при розвантаженні та завантаженні феритової плівки також представлені на рисунку 4.15 на частоті 3,4 ГГц. Можна побачити, що ККД і підсилення антени трохи зменшуються після того, як їх покриває феритова плівка, а загальна ефективність у цільовому діапазоні 5G LTE Band 42 (3,4 ГГц–3,6 ГГц) становить понад 45%, а також підсилення 1,7 дБ. З іншого боку, вимірні діаграми спрямованості антени із завантаженням феритової плівки в Е-площині та Н-площині, показані на рисунку 4.15, не мають ніяких змін у порівнянні з базовою антеною.

Крім того, в таблиці 4.2 представлено порівняння кілька важливих параметрів, які відображають продуктивність систем МІМО з попередніми роботами.

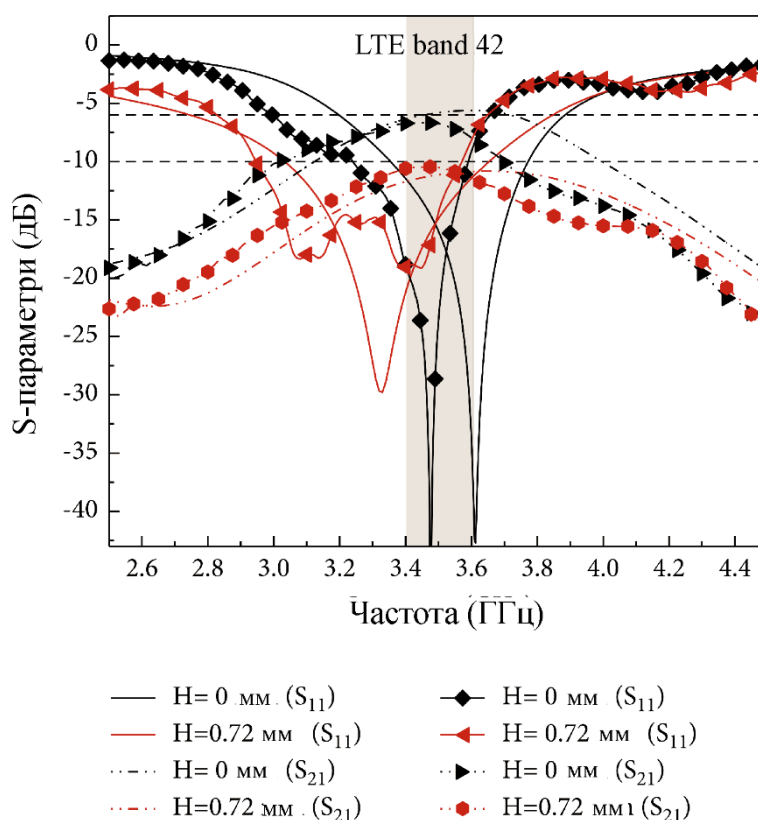


Рисунок 4.14 – Змодельовані та вимірні S-параметри

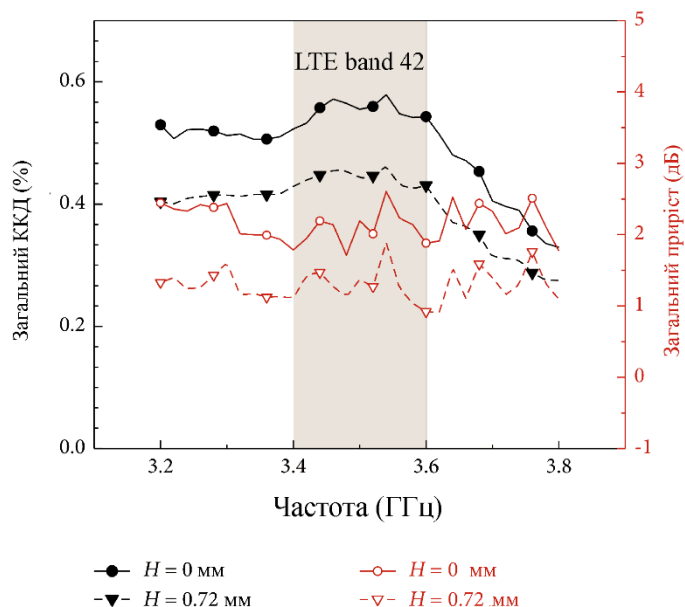


Рисунок 4.15 – Виміряні загальні ККД і підсилення для Антени 3 без і з навантаженням феритової плівки товщиною 0,72 мм

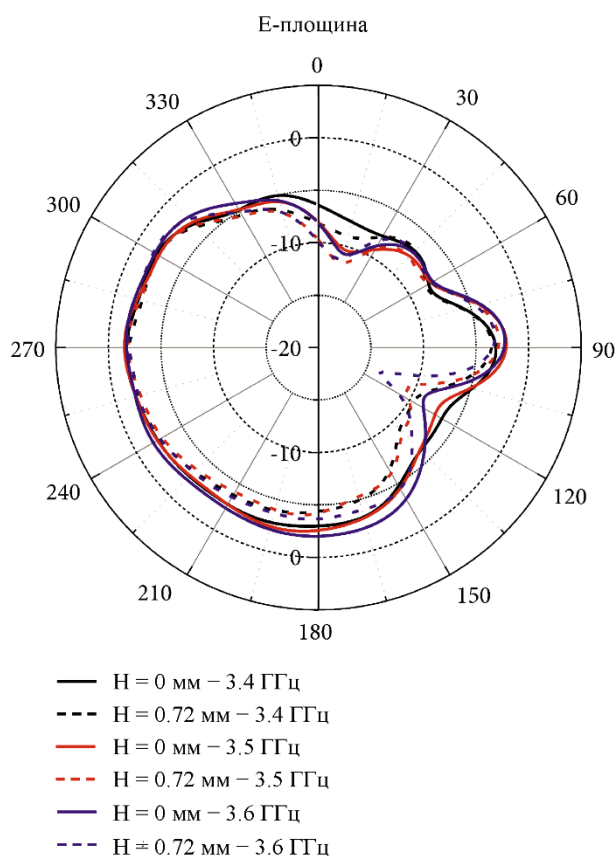


Рисунок 4.16 – Діаграма спрямованості на 3,4 ГГц, 3,5 ГГц і 3,6 ГГц Е-площини для Антени 3 без і з навантаженням феритової плівки товщиною 0,72 мм

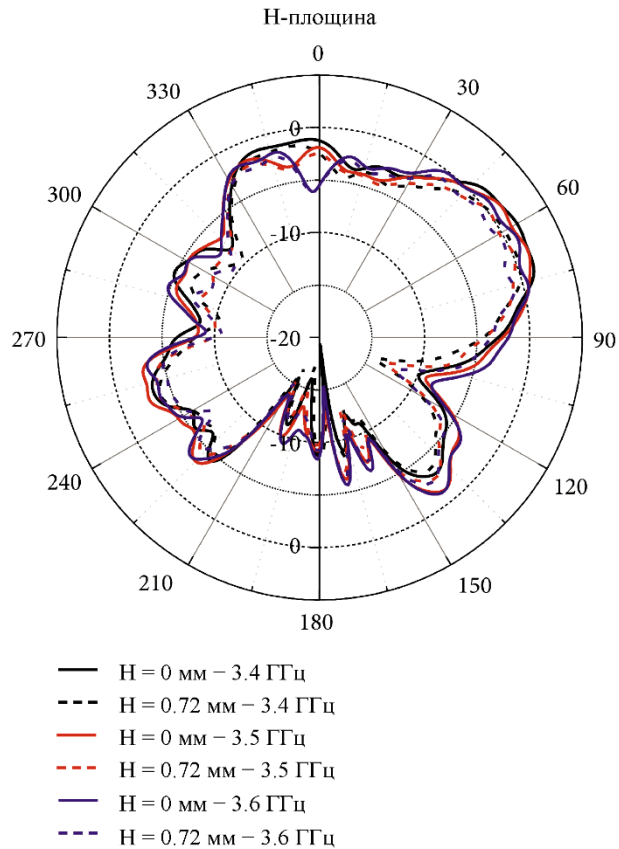


Рисунок 4.17 – Діаграма спрямованості на 3,4 ГГц, 3,5 ГГц і 3,6 ГГц  
 Н-площини для Антени 3 без і з навантаженням феритової плівки  
 товщиною 0,72 мм

Антени МІМО можна роз'єднати з більш високою ізоляцією та вищою ефективністю шляхом адекватного вибору методології проектування, наприклад метод травлення з конічними щілинами, паразитна структура, техніка самонейтралізації та додаткова гілка, але розміри елементів і відстані значно більші; з іншого боку, антени можуть бути розроблені з меншими розмірами, але ізоляція завжди становить близько 10 dB, і вони демонструють обмежену ефективність і смугу пропускання; в іншому випадку методи роз'єднання з використанням метаматеріалу та фериту можуть ефективно пригнічувати взаємний зв'язок і збільшувати робочу смугу частот, зберігаючи постійні фізичні розміри. Необхідно знайти компроміс між параметрами продуктивності,

розміром елемента та складністю конструкції, щоб керувати застосуванням різних методів роз'єднання в системах МІМО.

Таблиця 4.2 – Порівняння запропонованої антени з існуючими антенами

Розмір елемента ( $L \times W \times H$ мм <sup>3</sup> )	Метод	Пропускна здатність	Ізоляція (дБ)	Відстань між елем. (мм)	ККД
16 × 5 × 1	Розв'язка-шлейф	8.9% (3.33–3.65 ГГц)	13	1	65–80%
11 × 43.5 × 1	Конічно-шліцевий метод травлення	40.8% (1.7–2.7 ГГц)	40	8.5	—
28 × 1 × 29	Паразитарна структура	5% (2.33–2.45 ГГц)	25	28	72–83%
6.7 × 15.5 × 3.08	Техніка самонейтралізації	4.1% (4.8–5.0 ГГц)	23	3.2	78–80%
27.3 × 27.3 × 3.175	Слабке поле	5.7% (3.4–3.6 ГГц)	12.0	6.5	—
35 × 45 × 1.6	Метаматеріал	8.8% (9.12–9.96 ГГц)	10	20	—
20 × 32 × 1.6	Додаткове відділення	14.3% (3.3–3.8 ГГц)	14	2	68–80%
9.6 × 3 × 0.8	Згруповані компоненти	3.9% (3.42–3.59 ГГц)	13.5	1	32–51%
Запропонована антена					
11.3 × 4 × 1	Феритове навантаження	9.1% (3.35–3.67 ГГц)	10.43	1.4	43–45.5%

### 4.3 Висновки до червертого розділу

Тут можна зробити висновок, що, порівнюючи з іншими типовими методами роз'єднання, розв'язка навантаження феритової плівки може бути використана в антенному елементі МІМО меншого розміру з меншою відстанню між елементами і висока ізоляція, демонструючи кращі робочі характеристики з розширеною пропускнуою здатністю; його ефективність може досягати 45,5%. Це порівняння ще більше підтверджує, що з'єднані антени з феритовою плівковою розв'язкою можна застосовувати в області 5G МІМО.

## ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі представлено метод пом'якшення взаємозв'язку між антенами MIMO за допомогою завантаження феритової плівки. Вибірково покриваючи ферит на випромінювальних поверхнях антени, індуковане поле може бути придушене взаємодією електромагнітного поля з феритовою плівкою, що призводить до процесу роз'єднання в антені MIMO. Антена MIMO з двома інвертованими елементами F-антени, що працює в діапазоні LTE 42 (3,4–3,6 ГГц), була розроблена та змодельована для використання цієї стратегії.

Завдяки процесу оптимізації з використанням моделювання та досліджень антена MIMO з феритовою плівкою на заземлюючій гілці інвертованого елемента F-антени може бути належним чином відокремлений за допомогою високої ізоляції та демонструє найкращу робочу продуктивність із розширеною пропускною здатністю; його ефективність може досягати 45%. Також була створена фізична модель для інтерпретації механізму дії навантаження феритової плівки на процес розв'язки інвертованих F-антен. Цей метод розв'язки, який передбачає просте навантаження феритової плівки на невелику площу випромінювання антени, може підвищити застосовність і гнучкість антен MIMO, дозволяючи їм змінювати свої робочі характеристики залежно від умов каналу. Це дослідження пропонує альтернативний метод розробки мобільних платформ MIMO на основі багатьох антен і має як практичне, так і теоретичне значення.

					КвРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Aghoutane B. Investigation of equivalent circuit model for a 5G microstrip patch antenna / B. Aghoutane, M. El. Ghzaoui, H. El. Faylali, S. Das // Journal of nano- and electronic physics. - 2021. - Vol. 13, no. 3. - С. 03036-1-03036-4.
2. Фейсал А. Надмасивні системи МІМО на терагерцевих діапазонах: перспективи та виклики // Фейсал, А.; Sarieddeen, Н.; Dahrouj, Н.; Аль-Наффурі, Т.Й.; Алуїні, М.С. / arXiv 2019, arXiv:1902.11090.
3. Сивик О. С. Аналіз напрямків розвитку майбутніх телекомунікаційних технологій // Зв'язок. - 2021. - № 3.
4. Одарченко Р. С. Обґрунтування основних вимог до систем безпеки стільникових мереж 5-го покоління // Безпека інформації. - 2015. - № 3.
5. Степанов С. В. Важливість упровадження 5G // Зв'язок. - 2019. - № 2.
6. Русек, Ф. Розширення МІМО: можливості та виклики з дуже великими масивами // Русек, Ф.; Перссон, Д.; Лау, Б.К.; Ларссон, Е.Г.; Марцетта, Т.Л.; Едфорс, О.; Туфвессон, Ф. Процес сигналу IEEE. Mag. 2013, 30, 40–60.
7. Ларссон, Е.Г. Масивний МІМО для бездротових систем нового покоління // Ларссон, Е.Г.; Туфвессон, Ф.; Едфорс, О.; Т.Л. Марцетта / IEEE Commun. Mag. 2014, 186–195.
8. Mordecai F. Raji, et al., Sci. Program. 2020, 3204695 (2020).
9. J. Belkadid, A. Benbassou, M. El Ghzaoui, International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP) 3 No 5, 267 (2013).
10. Y. Li, M. Zhang, W. Zhu, M. Cheng, C. Zhou, Y. Wu, China Commun. 17 No 1, 151 (2020).
11. M. El Ghzaoui, A. Hmamou, J. Foshi, J. Mestoui, J. Circ. Syst. Comp. 29 No 16, 2050257 (2020).
12. M. Nabil, M.M.A. Faisal, Wireless Pers. Commun. 116, 2761 (2021).

					КВРТР.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

13. Bilal Aghoutane, et al., J. Circuit, System. Comput. 30, No 5, 2150086 (2021).
14. H. Raihani, A. Benbassou, M. El Ghzaoui, J. Belkadid, 2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), 1 (2017).
15. B. Aghoutane, M. El Ghzaoui, H. El Faylali, SN Appl. Sci. 3, 233 (2021).
16. C.A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 4th Ed. (Wiley, Hoboken: NJ: 2016).
17. D.M. Pozar, Microwave Engineering, 2nd Ed. (Wiley & Sons, Inc.: New York, USA: 1998)
18. J. Huang, C. X. Wang, H. Chang, J. Sun, and X. Gao, “Multi-frequency multi-scenario millimeter wave MIMO channel measurements and modeling for B5G wireless communication systems,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 38, no. 9, pp. 2010–2025, 2020.
19. R. Chataut and R. Akl, “Massive MIMO systems for 5G and beyond networks-overview, recent trends, challenges, and future research direction,” sensors (Basel), vol. 20, no. 10, 2020.
20. M. Alibakhshikenari, B. S. Virdee, L. Azpilicueta et al., “A comprehensive survey of “metamaterial transmission-line based antennas: design, challenges, and applications”,” IEEE Access, vol. 8, pp. 144778–144808, 2020.
21. W. Zhou, L. Huang, B. Luo, R. Mai, Z. He, and A. P. Hu, “A general mutual coupling model of MIMO capacitive coupling interface with arbitrary number of ports,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 6, pp. 6163–6167, 2021.
22. Z. Zhang, Antenna Design for mobile Devices, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2017.
23. Y. Wang and Z. Du, “A wideband printed dual-antenna system with a novel neutralization line for mobile terminals,” IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 12, pp. 1428–1431, 2013.

24. M. Li, L. Jiang, and K. L. Yeung, "A general and systematic method to design neutralization lines for isolation enhancement in MIMO antenna arrays," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 6, pp. 6242–6253, 2020.

25. H. Piao, Y. Jin, Y. Xu, and L. Qu, "MIMO ground-radiation antennas using a novel closed-decoupling-loop for 5G applications," IEEE Access, vol. 8, pp. 142714–142724, 2020.

26. S. Xiao, M. C. Tang, Y. Y. Bai, and S. Gao, "Mutual coupling suppression in microstrip array using defected ground structure," IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 5, no. 12, 2011.

27. X. Tan, W. Wang, Y. Wu, Y. Liu, and A. A. Kishk, "Enhancing isolation in dual-band meander-line multiple antenna by employing split EBG structure," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 67, no. 4, pp. 2769–2774, 2019.

28. S. Tebache, A. Belouchrani, F. Ghanem, and A. Mansoul, "Novel reliable and practical decoupling mechanism for strongly coupled antenna arrays," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 67, no. 9, pp. 5892–5899, 2019.

29. M. Li and S. Cheung, "A novel calculation-based parasitic decoupling technique for increasing isolation in multiple-element MIMO antenna arrays," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 70, no. 1, pp. 446–458, 2021.

30. K. Ding, C. Gao, D. Qu, and Q. Yin, "Compact broadband MIMO antenna with parasitic strip," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 2349–2353, 2017.

31. F. Amin, R. Saleem, T. Shabbir, and S. U. Rehman, "A compact quad-element UWB-MIMO antenna system with parasitic decoupling mechanism," applied sciences, vol. 9, no. 11, 2019.

32. L. Sun, Y. Li, Z. Zhang, and H. Wang, "Self-decoupled MIMO antenna pair with shared radiator for 5G smartphones," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 68, no. 5, pp. 3423–3432, 2020.

33. C.-Z. Han, L. Xiao, Z. Chen, and T. Yuan, “Co-located self-neutralized handset antenna pairs with complementary radiation patterns for 5G MIMO applications,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 73151–73163, 2020.

34. H. Lin, Q. Chen, Y. Ji, X. Yang, J. Wang, and L. Ge, “Weak-field-based self-decoupling patch antennas,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 6, pp. 4208–4217, 2020.

35. X. Zhao, S. P. Yeo, and L. C. Ong, “Decoupling of inverted-F antennas with high-order modes of ground plane for 5G mobile MIMO platform,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 9, pp. 4485–4495, 2018.

36. C. Segura-Gomez, A. Palomares-Caballero, A. Alex-Amor, J. Valenzuela-Valdes, and P. Padilla, “Modular design for a stacked SIW antenna array at ka-band,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 158568–158578, 2020.

37. M. Alibakhshikenari, F. Babaeian, B. S. Virdee et al., “A comprehensive survey on “various decoupling mechanisms with focus on metamaterial and metasurface principles applicable to SAR and MIMO antenna systems”,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 192965–193004, 2020.

38. M. Alibakhshikenari, M. Khalily, B. S. Virdee, C. H. See, R. A. Abd-Alhameed, and E. Limiti, “Mutual-coupling isolation using embedded metamaterial EM bandgap decoupling slab for densely packed array antennas,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 51827–51840, 2019.

39. E. K. I. Hamad and M. Z. M. Hamdalla, “Design of miniaturized and high isolation metamaterial-based mimo antenna for mobile terminals,” *JES. Journal of Engineering Sciences*, vol. 45, no. 6, pp. 763–772, 2017.

40. E. Andreou, T. Zervos, A. A. Alexandridis, and G. Fikioris, “Magnetodielectric materials in antenna design: exploring the potentials for reconfigurability,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 61, no. 1, pp. 29–40, 2019.

					КВРПТ.2020015.01.03 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

## ДОДАТКИ

# Додаток А

## Конструкція базової антени МІМО

КвРГР.2020015.01.03 Е8

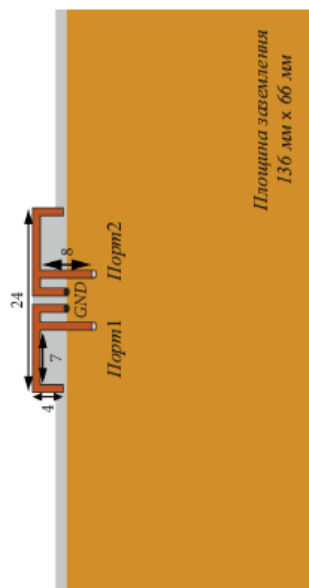


Рисунок А1 – Геометрія запропонованої базової антени

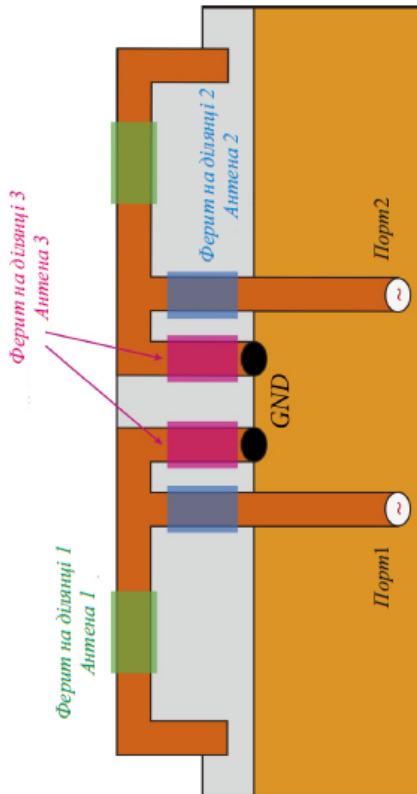


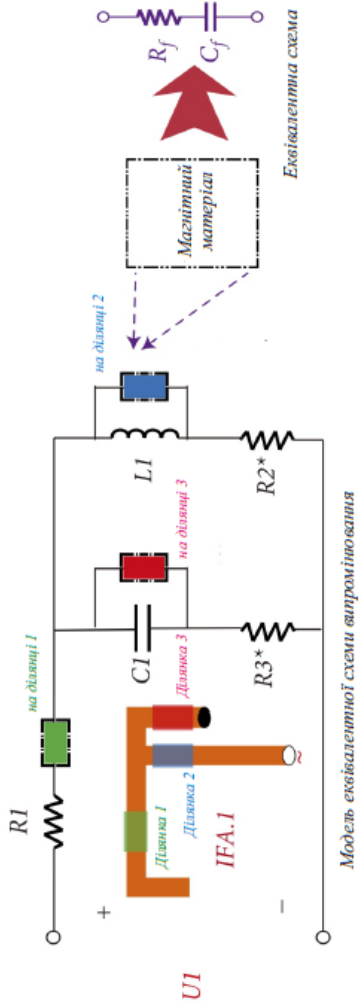
Рисунок А.2 – Двовимірна схема запропонованої антени з феритово-плівковим навантаженням

КвРГР.2020015.01.03 Е8		КвРГР.2020015.01.03 Е8	
Зм.	Лист	Лист	Листів
Розроб.	Мельничук І.І.	Конструкція базової антени МІМО	
Перевір.	Сельський А.А.	ХНУ, гр. ТР1с-20-1	
Н. колір.	Корецька Л.О.		
Затв.	Мартинюк В.В.		

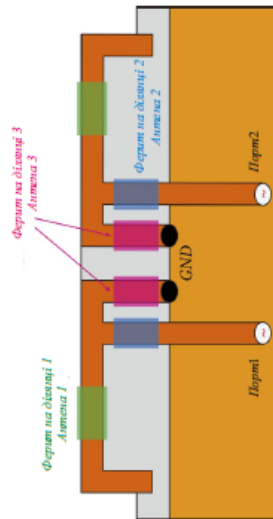
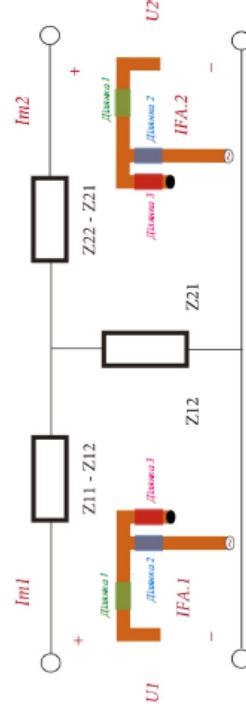
# Додаток Б

## Еквівалентна схема випромінювання антени із завантаженням феритової плівки

КвРТР.2020015.01.03 Е8



Спрощена модель еквівалентної схеми двоелементної антени

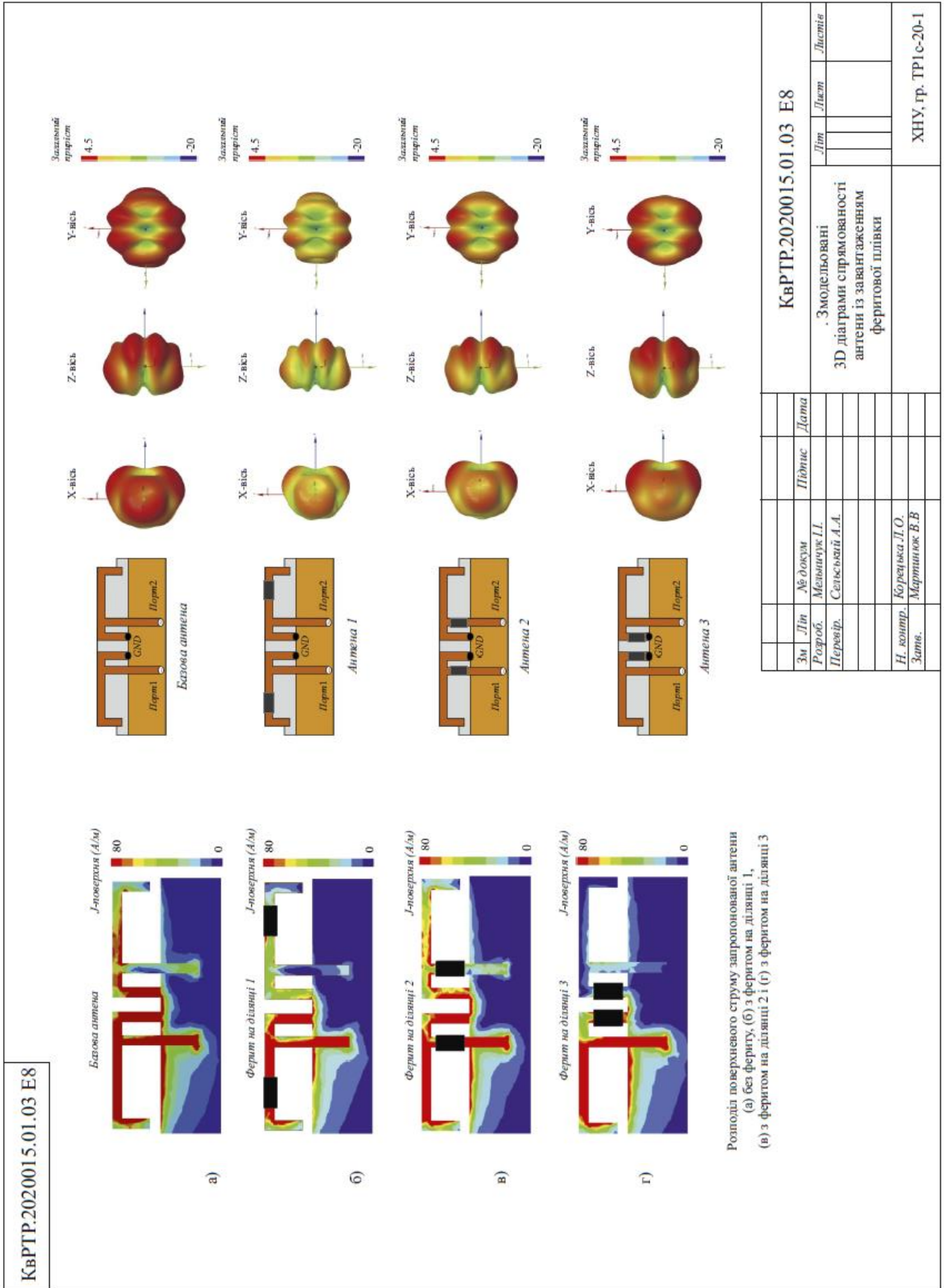


Двовимірний схема антени з феритово-плівковим навантаженням

Зм		Лист		Підпис		Дата		КвРТР.2020015.01.03 Е8	
Розроб.		Мельничук І.І.		Лист		Листів		Еквівалентна схема випромінювання антени із завантаженням феритової плівки	
Перевір.		Сельський А.А.		Лист		Листів		ХНУ, гр. ТР1с-20-1	
Н. констр.		Корчака Л.О.		Лист		Листів			
Затв.		Мартинюк В.В.		Лист		Листів			

# Додаток В

## Блок-схема прототипу фотоелектричної системи



Ім'я користувача:  
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:  
1015640274

Дата перевірки:  
19.06.2023 08:32:36 EEST

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:  
19.06.2023 08:39:19 EEST

ID користувача:  
100005862

Назва документа: Мельничук

Кількість сторінок: 62 Кількість слів: 10882 Кількість символів: 78448 Розмір файлу: 6.01 MB ID файлу: 1015286569

1254 слова позначені як "вилучені" та не враховуються у підрахунку слів

## 6.17% Схожість

Найбільша схожість: 4.19% з Інтернет-джерелом ([http://www.dut.edu.ua/uploads/p\\_1914\\_91453830.pdf](http://www.dut.edu.ua/uploads/p_1914_91453830.pdf))

6.17% Джерела з Інтернету

16

Сторінка 64

Не знайдено джерел з Бібліотеки

## 0% Цитат

Цитати

4

Сторінка 65

Не знайдено жодних посилань

## 0.02% Вилучень

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

Немає вилучених Інтернет-джерел

0.02% Вилученого тексту з Бібліотеки

6

Сторінка 65

## Модифікації

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

Замінені символи

21

# Anti-Plagiarism v-15.257

**Максимальне співпадіння з одним документом 0.0%**

**Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилки в документах: 13%**

ID: 116857 Назва: БКР Техніка покращення ізоляції в антенних решітках МІМО Додано в БД: 2023-06-19 Автора: Іван МЕЛЬНИЧУК Керівники: Андрій СЕЛЬСЬКИЙ Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	71226	514	277 (0%)	5 (1%)

## Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

## РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Мельничук Іван Іванович

Тема роботи: Техніка покращення ізоляції в антенних решітках МІМО

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 65

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Метою кваліфікаційної роботи є пом'якшення взаємозв'язку між антенами МІМО за допомогою завантаження феритової плівки. У даній кваліфікаційній роботі представлено метод пом'якшення взаємозв'язку між антенами МІМО за допомогою завантаження феритової плівки. Вибірково покриваючи ферит на випромінювальних поверхнях антени, індуковане поле може бути придушене взаємодією електромагнітного поля з феритовою плівкою, що призводить до процесу роз'єднання в антені МІМО. Антена МІМО з двома інвертованими елементами F-антени, що працює в діапазоні LTE 42 (3,4–3,6 ГГц), була розроблена та змодельована для використання цієї стратегії.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Кваліфікаційна робота відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: У відповідності до технічного завдання у даній кваліфікаційній роботі подано процес оптимізації з використанням моделювання та досліджень антена МІМО з феритовою плівкою на заземлюючій гілці інвертованого елемента F-антени може бути належним чином відокремлений за допомогою високої ізоляції та демонструє найкращу робочу продуктивність із розширеною пропускну здатністю; його ефективність може досягати 45%. Також була створена фізична модель для інтерпретації механізму дії навантаження феритової плівки на процес розв'язки інвертованих F-антен. Цей метод розв'язки, який передбачає просте навантаження феритової плівки на невелику площу випромінювання антени, може підвищити застосовність і гнучкість антен МІМО, дозволяючи їм змінювати свої робочі характеристики залежно від умов каналу. Це дослідження пропонує альтернативний метод розробки мобільних платформ МІМО на основі багатьох антен і має як практичне, так і теоретичне значення.

4. Позитивні сторони роботи: Результати виконаної роботи показали, що необхідно проводити подальші дослідження в даному напрямку та рухатися шляхом удосконалення широкосмугової МІМО-антени. Напрямок досить перспективний і попит на дані компоненти з кожним днем тільки зростатиме.

5. Негативні сторони роботи: У роботі бажано було б більш детально розглянути методи розв'язки інвертованих F-антен. Присутні невеликі граматичні помилки. Однак, ці недоліки не мають принципового значення, суттєво не впливають на кінцевий результат і не знижують загального враження від проведеної роботи.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає

7. Відгук про роботу в цілому: В цілому кваліфікаційно робота виконано на високому технічному рівні, вона має безперечну актуальність в області сучасних технологій телекомунікацій

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка кваліфікаційної роботи: Кваліфікаційна робота відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки добре (3,25/D), а її автору Мельничук І.І., присвоєння кваліфікації бакалавра зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка»

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

«19» червня 2023р.



підпис

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

Мельничука І.І.

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курсу, групи ТР1с-20-1

### ЗАЯВА

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

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

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

29 травня 2023 р.  
дата

  
підпис

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ  
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА  
РОБОТОТЕХНІКИ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

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

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

Назва: Техніка покращення ізоляції в антенних решітках МІМО

Автор: Мельничук Іван Іванович

Освітня програма: Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології

Науковий керівник: к.ф.м.н., доцент Сельський Андрій Анатолійович

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

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

Підтвердження:

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

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

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



3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.  
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 7,2% і адресується до 27 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

19.06.23р.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

Валерій МАРТИНЮК

Денис МАКАРИШКІН

Андрій СЕЛЬСЬКИЙ