

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоінженерії

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій МАРТИНЮК

« ____ » _____ 2024 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра за освітньо-професійною програмою

«Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Смужкова логоперіодична антена із копланарним живленням
для діапазону частот 0.7-6 ГГц»**

Виконав :

студент IV курсу, групи РІ-01

Лавренчук Юрій Олександрович

Керівник:

доцент, PhD, Сушко Олександр Юрійович



Рецензент:

ст.викл Омеляненко Михайло Юрійович

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіоінженерії

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій МАРТИНЮК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Лавренчук Юрій Олександрович

1. Тема проєкту «Смужкова логоперіодична антена із копланарним живленням для діапазону частот 0.7-6 ГГц»,

керівник проєкту доцент, PhD, Сушко Олександр Юрійович, затверджені наказом по університету від «29» травня 2024 р.

№ 2178-с

2. Термін подання студентом проєкту 18 червня 2024 року

3. Вихідні дані до проєкту: Принципи побудови логоперіодичних антен, загальні вимоги до них.

4. Зміст пояснювальної записки: аналіз ринку, огляд аналогів ринку, методи електродинамічного моделювання, розробка смужкової логоперіодичної антени із копланарним живленням для діапазону частот 0.7-6 ГГц, експериментальний зразок, перелік джерел посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (Схема електрична принципова)

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання квітня 2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд та аналіз технічної літератури	до 07.04.2024 р.	
2	Аналіз можливих варіантів виконання	до 10.04.2024 р.	
3	Розрахунок та проєктування 3D моделі	до 18.04.2024 р.	
4	Оптимізація моделі	до 05.05.2024 р.	
5	Дослідження експериментального зразка	до 01.06.2024 р.	
6	Написання пояснювальної записки	до 14.06.2024 р.	
7	Підготовка презентації	до 16.06.2024 р.	

Студент

Лавренчук Юрій Олександрович

Керівник

Сушко Олександр Юрійович

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Смужкова логоперіодична антена із копланар
ним живленням для діапазону частот 0.7-6 ГГц»**

Київ – 2024 року

АНОТАЦІЯ

Дипломний проект складається з пояснювальної записки обсягом 43 сторінок, включає 32 рисунків, 1 креслення, 14 бібліографічних посилань.

Ключові слова: логоперіодична антена, другована плата, копланарне живлення, радіорозвідка.

Метою даного дипломного проекту є розроблення смужкової логоперіодичної антени з копланарним живленням для діапазону частот 0.7-6 ГГц яка в подальшому буде використовуватись для радіорозвідки.

У проекті проведено аналіз існуючих антен з сегменту товарів схожих за конструкцією або експлуатацією. Врахуючи їхні переваги та недоліки було розроблена та виготовлена антена із копланарним живленням.

Антену було виготовлено та досліджено експериментальної характеристики узгодження

ABSTRACT

The diploma project consists of an explanatory note of 43 pages, includes 32 drawings, 1 drawing, 14 bibliographic references.

Key words: logoperiodic antenna, secondary board, coplanar power supply, radio reconnaissance.

The goal of this diploma project is to develop a speech therapy strip antenna with coplanar power for the frequency range of 0.7-6 GHz, which will be used for radio reconnaissance in the future.

The project analyzed existing antennas from the segment of products similar in design or operation. Considering their advantages and disadvantages, a coplanar powered antenna was designed and manufactured.

The antenna was manufactured and its matching characteristics were investigated experimentally

ЗМІСТ

Вступ.....	10
1 АНАЛІЗ РИНКУ	12
1.1 Огляд аналогів ринку.....	12
1.1.1 Антена Yagi WavLink U6-SMA	12
1.1.2 Логперіодична антена KC R100B 8GHz.....	15
1.1.3 Логперіодична антена SAS-519-7	17
1.2 Аналіз технічного завдання	20
1.2.1 Умови експлуатації.....	20
1.2.2 Аналіз вимог до конструкції.....	20
2 Методи електродинамічного моделювання.....	21
2.1 Метод моментів	22
2.2 Метод скінченних елементів.....	23
2.3 Метод фізичної оптики.....	23
2.4 Метод геометричної оптики.....	23
2.5 Метод однорідної теорії дифракції	24
2.6 Метод скінченних інтегралів FIT	25
2.7 Метод лінії передач.....	25
2.8 Використання CST MWS	25
3 Розробка смужкової логперіодичної антени із копланарним живленням для діапазону частот 0.7-6 ГГц.....	27
3.1 Метод для моделювання.....	27

Підп. і дата	Підп. і дата
	Взам. инв. №
Підп. і дата	Инв. № дубл.
	Инв. № подл

					PI01.464659.001 ПЗ			
Зм	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Смужкова логперіодична антена із копланарним живленням для діапазону частот 0.7-6 ГГц	Літ	Арк.	Аркушів
Розроб.	Лавренчук Ю.О.						2	
Перев.	Сушко О.Ю.					PI-01 РТФ		
Т. контр.								
Н. контр.	Сушко О.Ю.							
Затв								

3.2	Методи оптимізації які використовувалися	27
3.2.1	Trust Region Framework	28
3.2.2	Nelder Mead Simplex Algorithm	28
3.2.3	Еволюційна стратегія адаптації коваріаційної матриці (Covariance Matrix Adaptation Evolutionary Strategy).....	28
3.3	Налаштування середовища проектування.....	28
3.4	Проектування структури	29
3.5	Вплив різних геометричних параметрів на характеристики антени.....	32
3.6	Розробка в Altium Designer	39
4	експериментальний зразок	41
5	ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ АНТЕНИ.....	46
5.1	Використання в телекомунікаційних системах	46
5.2	Застосування в системах радіомоніторингу	46
5.3	Перспективи у військових технологіях	46
5.4	Безпілотні літальні апарати (БПЛА)	47
	Висновок	48
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	49
	ДОДАТОК А. . ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	51
	ДОДАТОК Б. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА	52

Побл. и дата	
Взам. инв. №	
Инв. № дубл.	
Побл. и дата	
Инв. № подл.	

					PI01.464659.001 ПЗ			
Зм	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Смужкова логоперіодична антена із копланарним живленням для діапазону частот 0.7-6 ГГц	Літ	Арк.	Аркушіє
Розроб.	ЛаверенчукЮ.О						9	
Перев.	Сушко О.Ю.					PI-01 РТФ		
Т. контр.								
Н. контр.	Сушко О.Ю.							
Затв								

ВСТУП

У сучасному світі, де інформаційні технології розвиваються надзвичайно швидкими темпами, ефективна передача даних займає ключове місце у технічному прогресі. Антени, як основні компоненти телекомунікаційних систем, відіграють важливу роль у забезпеченні надійної та швидкої передачі інформації. Особливий інтерес викликають смужкові логоперіодичні антени, які завдяки своїй широкосмуговості та високим характеристикам стають незамінними в багатьох сферах, від радіомовлення до військових комунікацій.

Представлено новий простий підхід до проектування одношарових друкованих логоперіодичних дипольних ґрат (PLPDA), які живляться від копланарного хвилеводу з провідником (СВСПВ). Антена PLPDA має переваги широкої смуги пропускання, низького профілю та стабільної діаграми спрямованості, яка живиться через симетричну лінію. Балансна лінія, розроблена з урахуванням геометричних особливостей СВСПВ, забезпечує симетруючий перетворювач із значно широкою смугою пропускання, низьким профілем, низькими втратами (в залежності від діелектричної підкладки).

Логоперіодична антена (LPDA) є антеною з осьовим випромінювання і має переваги фіксованого пікового випромінювання та стабільного підсилення та діаграми спрямованості в межах робочої смуги, що є важливим для використання в сучасних системах бездротового зв'язку.

Для досягнення низького профілю була запропонована друкована логоперіодична антена (PLPDA) на основі технології друкованої інтегральної плати (PCB). Практичні характеристики антени PLPDA визначаються живленням. На ранньому етапі використання антена PLPDA проектувалася на двошаровій друкованій платі, але це збільшує вартість виготовлення та погіршує її характеристики. Вартість виготовлення була знижена за рахунок використання одношарової друкованої плати, тому були запропоновані одношарові антени PLPDA з коаксіальним кабелем як мережею живлення. Однак паяння коаксіальних кабелів призводить до значних помилок виготовлення та перекосів, особливо на частотах міліметрових хвиль. Запропоновано

Попл. и дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Попл. и дата
Инв. № подл.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

PI01.464659.001 ПЗ

Арк.

3

1 АНАЛІЗ РИНКУ

1.1 Огляд аналогів ринку

1.1.1 Антена Yagi WavLink U6-SMA

Антена Yagi WavLink U6-

SMA показана на рисунку 1.1 [7] широкопasmовою 0,8-

6 ГГц 5-8 дБі WavLink U6-SMA для RF радіосканерів та спектроаналізаторів FPV дозволить покращити якість сигналу або збільшити дальність його передачі. Антени даного типу знайшли широке застосування під час використання з RF радіосканерами та аналізаторами спектру FPV. Особливістю моделі є коефіцієнт підсилення 5-8 дБі сигналу, популярний роз'єм підключення типу SMA, висока якість виготовлення, заводське виробництво та простота використання.

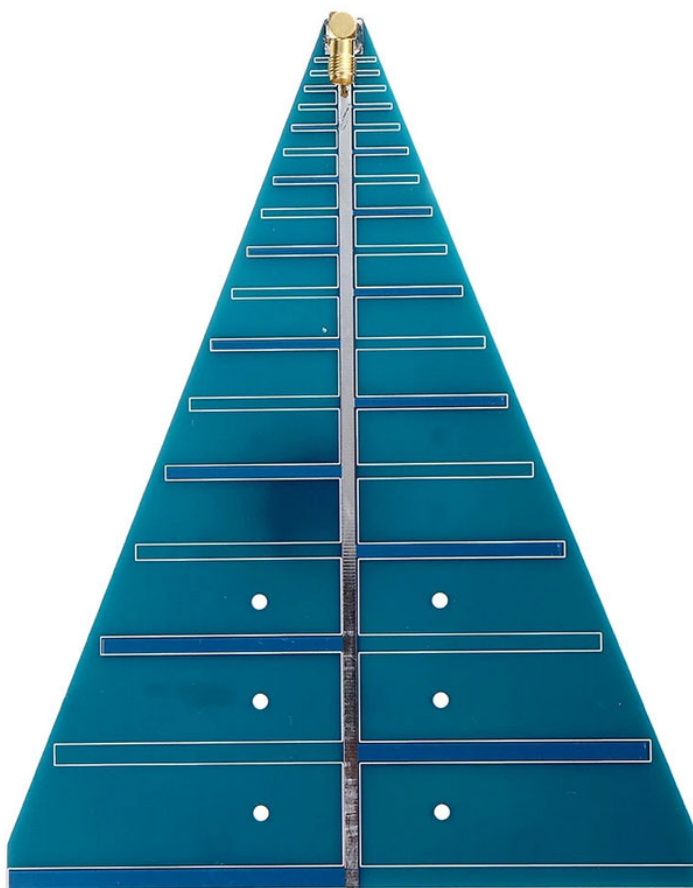


Рисунок 1.1 — Антена ЛПА WavLink U6-SMA

Попл. и дата	
Взам. инв. №	
Инв. № дубл.	
Попл. и дата	
Инв. № подл.	

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

PI01.464659.001 ПЗ

Арк.

5

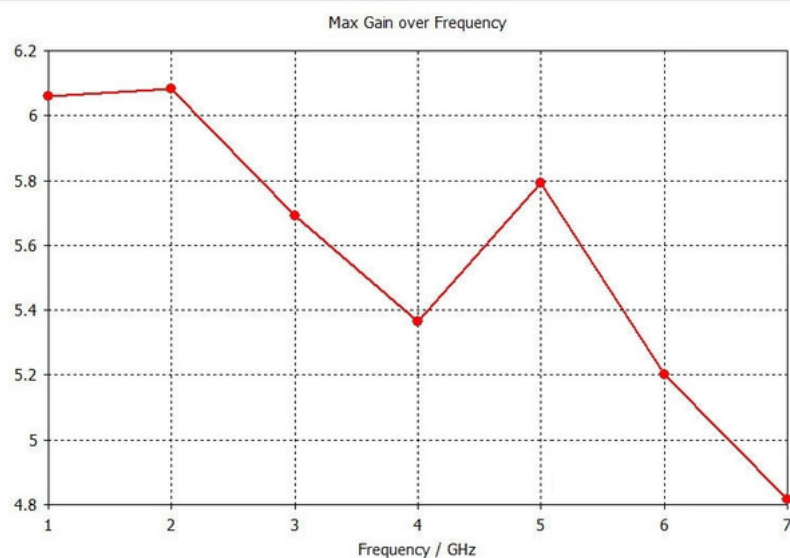
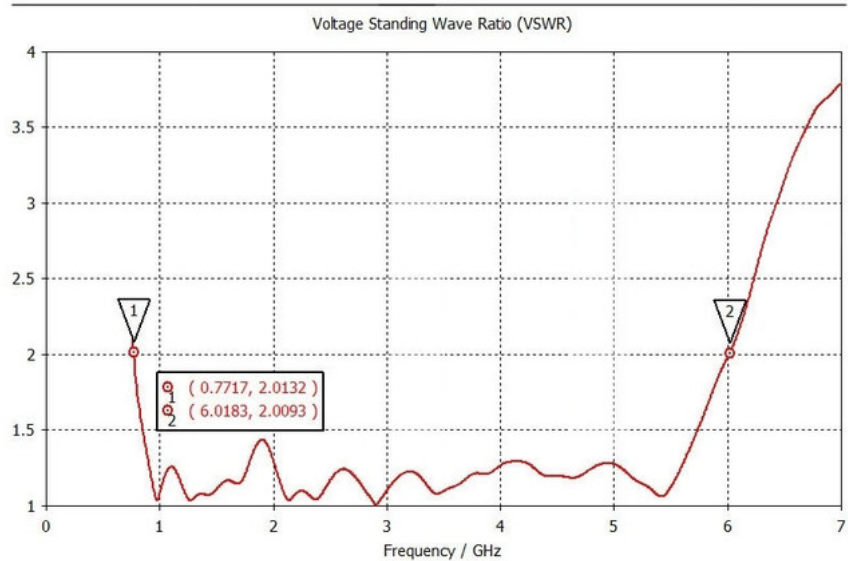
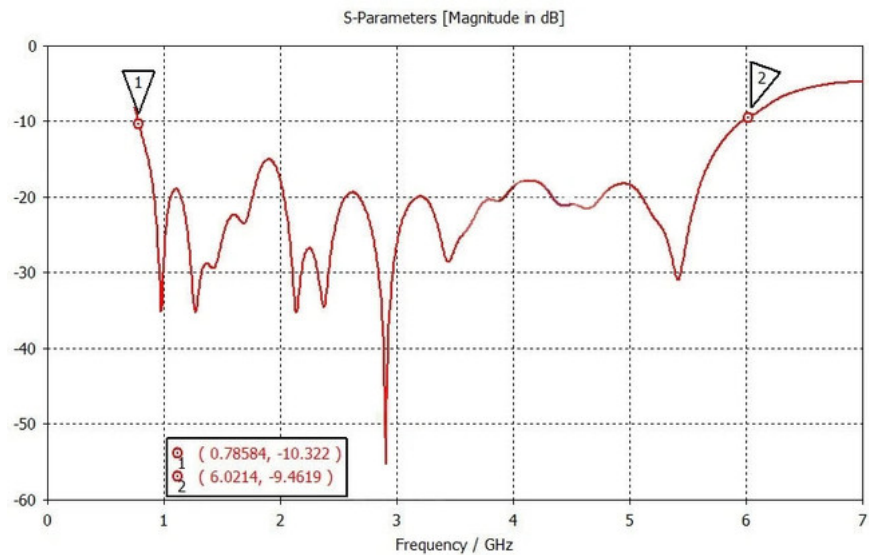


Рисунок 1.2 —

Параметри отримані в результаті моделювання антени ЛПА WavLink U6-SMA

Підп. і дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Підп. і дата
Инв. № подп

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
-----	------	----------	--------	-----

PI01.464659.001 ПЗ

Арк.

6

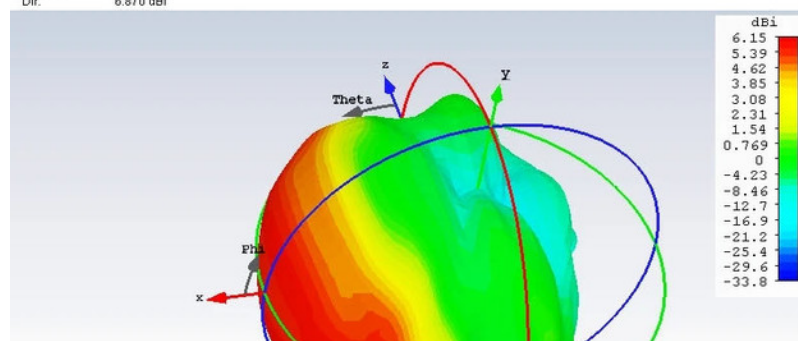
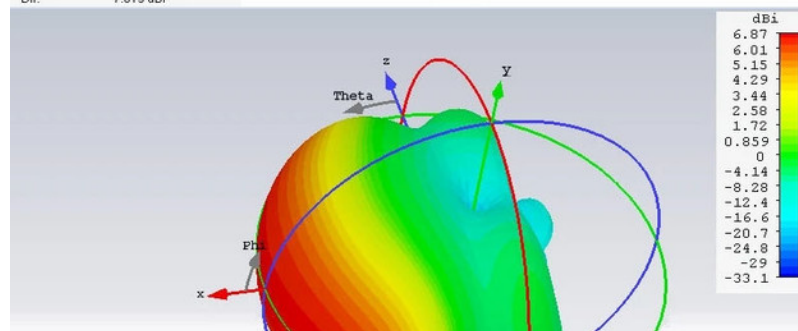
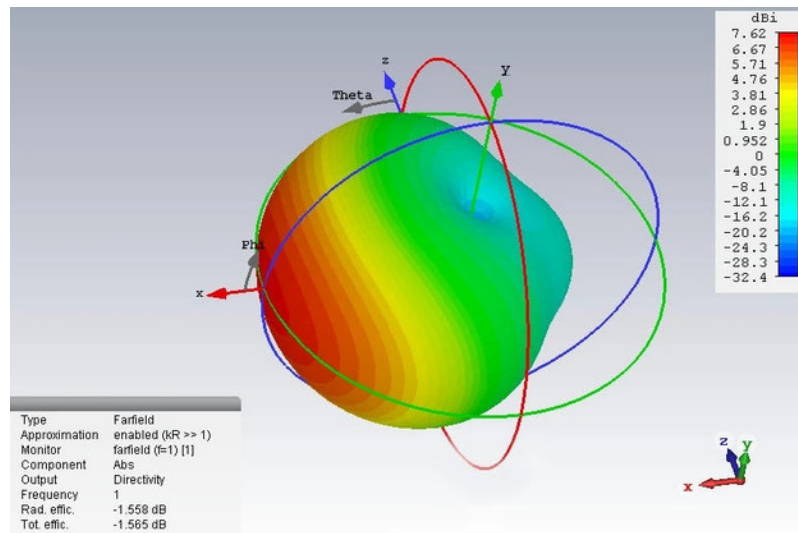


Рисунок 1.3 — Діаграми спрямованості отримані в результаті моделювання антени Yagi WavLink U6-SMA

Характеристики

- Тип: спрямована антена
- Частотний діапазон: 800 – 6000 МГц

Підп. і дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Підп. і дата
Инв. № подл

Зм.	Изм.	№ докум.	Підпис	Дат

- Коефіцієнт підсилення: 5 – 8 dBi (залежить від частоти)
- Потужність: менше 5 Вт
- Ширина діаграми спрямованості: 28 °
- Тип роз'єму: SMA
- Робоча температура: -20°C ~ +60°C
- Розмір: 189 x 148 мм
- Ціна: 630 ₴

Ця антена є класичним прикладом логперіодичної антени, яка забезпечує ефективну роботу у широкому діапазоні частот. Вона ідеально підходить для використання в системах, де потрібна стабільна передача сигналу на великі відстані. Конструкція антени забезпечує низькі втрати сигналу та високу ефективність передачі, що є ключовими факторами для радіорозвідки та спектрального аналізу.

1.1.2 Логперіодична антена KC R100B 8GHz



Рисунок 1.3 — Логперіодична антена KC R100B 8GHz

Антена типу R100B показана на рисунку 1.3 [8] — це друкована LDPA, яка відома як базова антена для вимірювача напруженості поля, аналізатора спектру та розвідувального приймача. Зазвичай він використовується для оцінки напруженості поля, виявлення джерела сигналу та радіопеленгації

Попл. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Попл. и дата	Инв. № подл.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

PI01.464659.001 ПЗ

Арк.

8

тощо. Завдяки широкому частотному діапазону, портативності та міцній конструкції вона підходить для портативного використання як у приміщенні, так і на вулиці.

400MHz 5GHz 10GHz

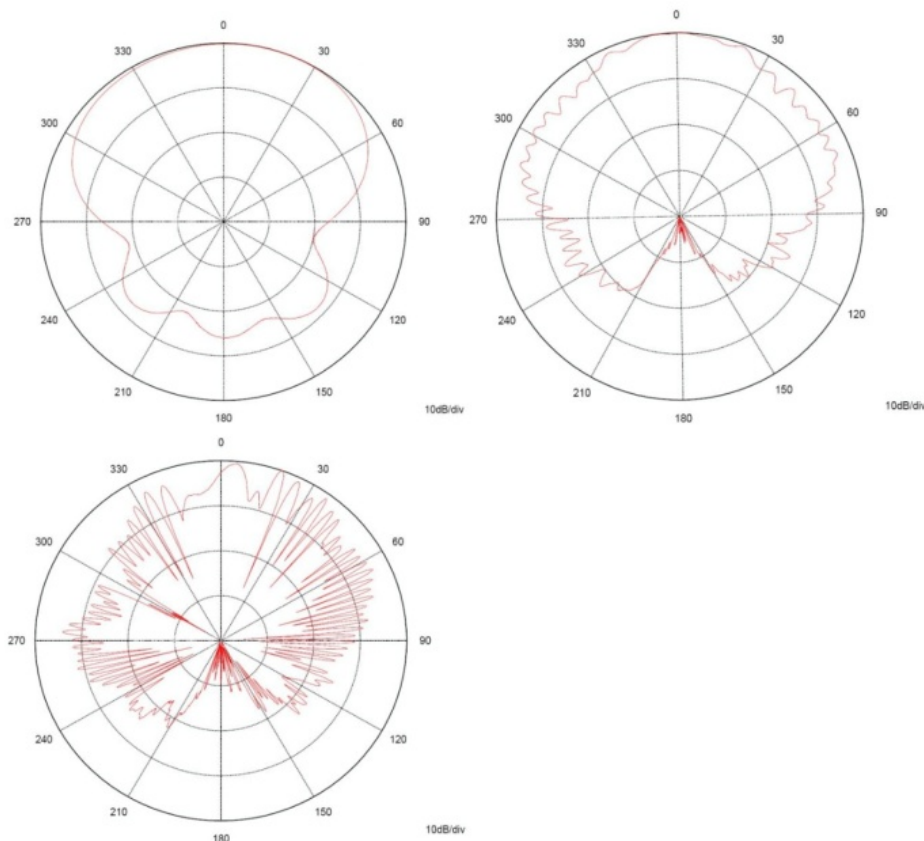


Рисунок 1.4 —

Діаграми спрямованості отримані в результаті моделювання антени КС R100 В 8GHz

Характеристики

- Діапазон частот: 380 МГц...8 ГГц
- Номінальне посилення: 5 дБі
- Зворотні втрати: >10 дБ
- КСХН: < 2
- Розмір: 560 x 240 x 25 мм
- Ціна: 16 890 ₴

Ця модель антени особливо ефективна для використання в умо-

Підп. і дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Підп. і дата
Инв. № подп

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
-----	------	----------	--------	-----

PI01.464659.001 ПЗ

Арк.

9

вах високої зашумленості, де потрібна висока точність спрямування сигналу. Висока якість виготовлення забезпечує її довговічність та стійкість до зовнішніх впливів.

1.1.3 Логоперіодична антена SAS-519-7

Логоперіодична антена SAS-519-7 показана на рисунку 1.5 [9] компанії А.Н. Systems є надзвичайно легкою, компактною та виготовляється для забезпечення максимального посилення та низького КСХН. Тестування всеред иніекранованого корпусу чи на відкритому повітрі ця антена демонструватиме оптимальні робочі характеристики, які зазначені виробником на частотному діапазоні від 650 МГц до 7000 МГц.



Рисунок 1.5 — Логоперіодична антена SAS-519-7

Ине. № подп	Подп. и дата
Ине. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
-----	------	----------	--------	-----

PI01.464659.001 ПЗ

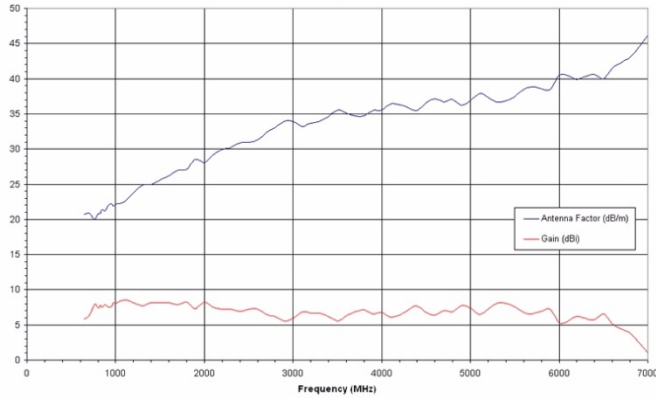
Арк.

10



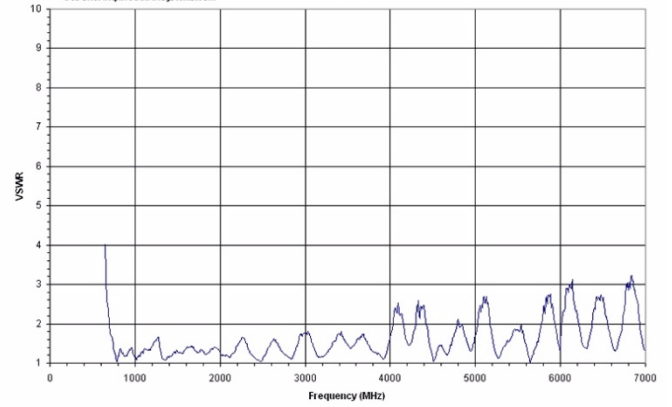
A.H. Systems Inc.
9710 Cozycroft Ave. Chatsworth, CA 91311
Phone (818) 998-0223 Fax (818) 998-6892
E-mail: sales@AHSystems.com
Web site: http://www.AHSystems.com

Antenna Data
3 Meter Horizontal Polarity
Model: SAS-519-7



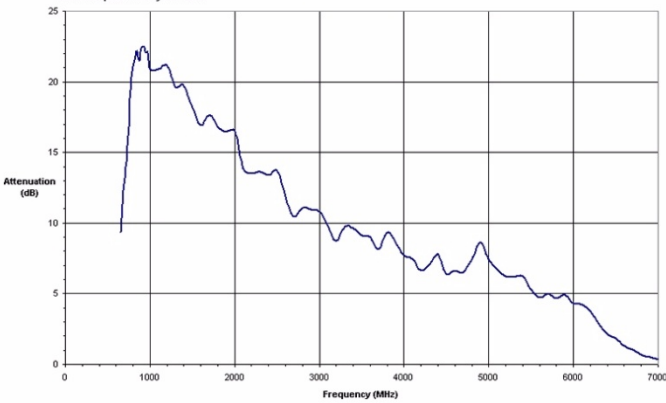
A.H. Systems Inc.
9710 Cozycroft Ave. Chatsworth, CA 91311
Phone (818) 998-0223 Fax (818) 998-6892
E-mail: sales@AHSystems.com
Web site: http://www.AHSystems.com

VSWR
Model: SAS-519-7



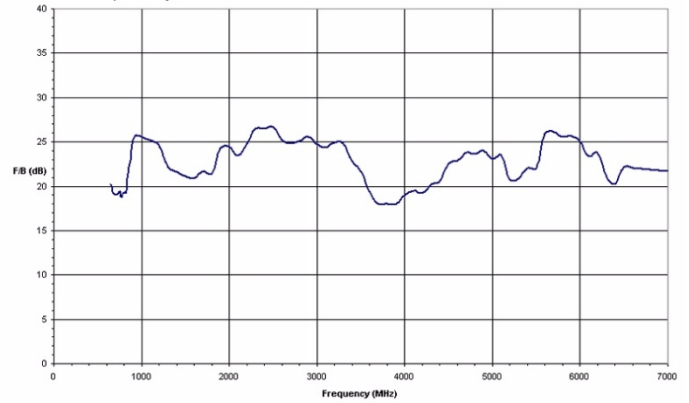
A.H. Systems Inc.
9710 Cozycroft Ave. Chatsworth, CA 91311
Phone (818) 998-0223 Fax (818) 998-6892
E-mail: sales@AHSystems.com
Web site: http://www.AHSystems.com

Cross Polarization
Model: SAS-519-7



A.H. Systems Inc.
9710 Cozycroft Ave. Chatsworth, CA 91311
Phone (818) 998-0223 Fax (818) 998-6892
E-mail: sales@AHSystems.com
Web site: http://www.AHSystems.com

Front to Back Ratio
Model: SAS-519-7



A.H. Systems Inc.
9710 Cozycroft Ave. Chatsworth, CA 91311
Phone (818) 998-0223 Fax (818) 998-6892
E-mail: sales@AHSystems.com
Web site: http://www.AHSystems.com

Half Power Beamwidth
Model: SAS-519-7

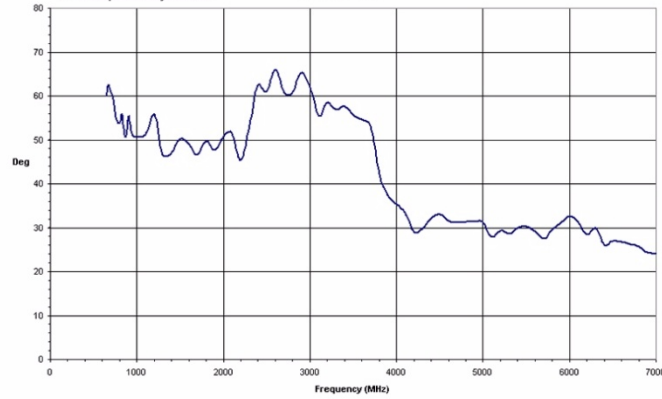


Рисунок 1.6 —

Параметри отримані в результаті моделювання антени Логоперіодична антена SAS-519-7

Підп. і дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Підп. і дата
Инв. № подл.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
-----	------	----------	--------	-----

PI01.464659.001 ПЗ

Арк.
181



A.H. Systems Inc.
 9710 Cozycroft Ave. Chatsworth, CA 91311
 Phone (818) 998-0223 Fax (818) 998-6892
 E-mail: sales@A.H.Systems.com
 Web site: http://www.AHSystems.com

Beamwidth Pattern
 Horizontal Polarization
 Model: SAS-519-7

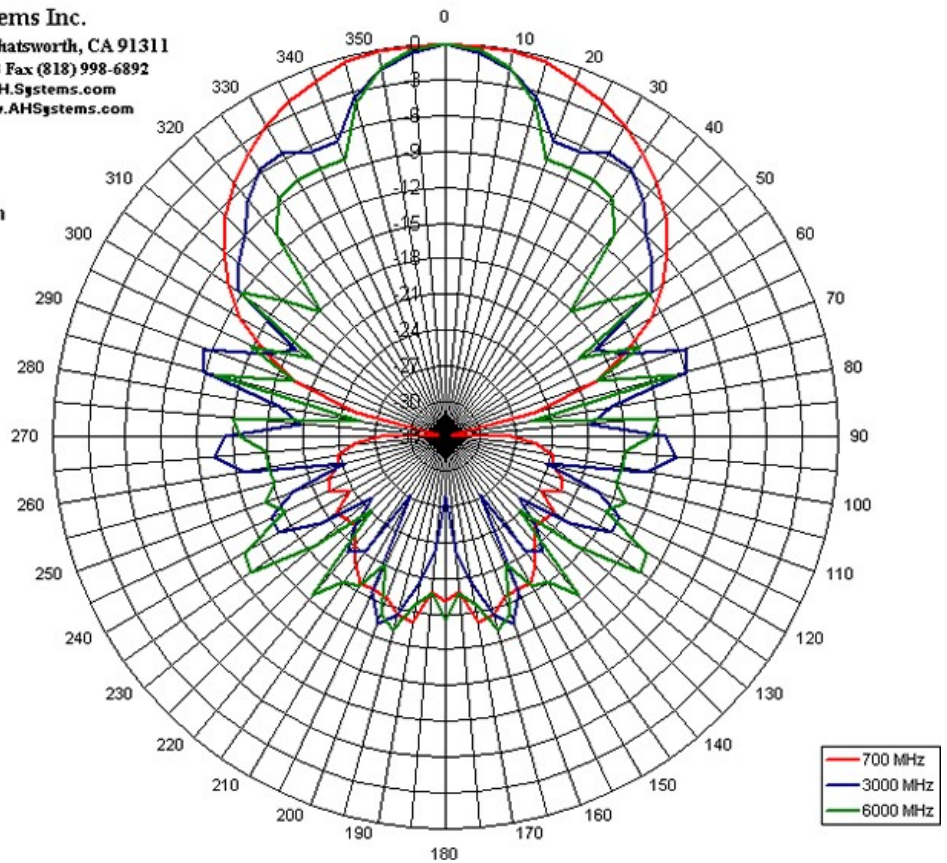


Рисунок 1.7 —

Діаграми спрямованості отримані в результаті моделювання Логоперіодична антена SAS-519-7

Характеристики

- Діапазон частот: 650 МГц - 7000 МГц
- Фактор антени: від 20 до 46 дБ/м
- Підсилення: від 1 до 8 дБі
- Максимальна потужність: 700 Вт
- Максимальне випромінюване поле: 200 В/м
- Імпеданс: 50 Ом
- КСХН: 1,63:1
- Фізичні розміри:
- Довжина: 29,4 см
- Ширина: 20,8 см

Ця антена відрізняється низьким профілем та легкою вагою, що робить її зручною для встановлення та використання в різних умовах.

Попл. и дата

Взам. инв. №

Инв. № дубл.

Попл. и дата

Инв. № подл

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

PI01.464659.001 ПЗ

Арк.

192

Її конструкція забезпечує високу стійкість до механічних впливів, що є важливим для експлуатації в польових умовах.

1.2 Аналіз технічного завдання

1.2.1 Умови експлуатації

- Граничні робочі температури, °С: -20...+60.
- Відносна вологість: 60 % при +20 °С, 80 % при +25 °С

1.2.2 Аналіз вимог до конструкції

Конструкція антени повинна бути компактною для забезпечення зручності використання в мобільних умовах. Вона повинна бути стійкою до механічних впливів для експлуатації в польових умовах

Характеристики

- S11 <-10 дБ
- Ширина діаграми спрямованості за рівнем -3 дБ: 60градусів
- Коефіцієнт підсилення: від 3 дВі
- КСХН: <2
- Призначення: Може бути використана в якості приймальної антени в системах радіорозвідки та радіомоніторингу. Також в системах передачі інформації, але для потужностей не більше декількох ват.

Инв. № подл	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	РІ01.464659.001 ПЗ	Арк.
											203

2 МЕТОДИ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Сучасні засоби моделювання дають змогу розв'язувати рівняння Максвелла і визначати властивості складних НВЧ-структур. Важливим етапом у процесі моделювання є вибір оптимального методу розрахунку властивостей електродинамічної системи. Багатосучасних програмних продуктів реалізують кілька методів для вирішення цього завдання.

Існують різні підходи до розв'язання задач електромагнітного поля, які можна звести до аналітичного чи чисельного розв'язання відповідних інтегральних чи диференціальних рівнянь у частотній або часовій області. Аналітичні розв'язки точні, але можуть бути отримані тільки для обмеженого кола простих структур. Чисельні розв'язки наближені, але можуть бути успішно застосовані для довільних структур. При цьому, незважаючи на те, що вони можуть давати результат лише із певною точністю, в більшості практичних задач цього цілком достатньо. На рисунку 2.1 наведено класифікацію методів розв'язку рівнянь Максвелла, що широко використовуються на практиці.

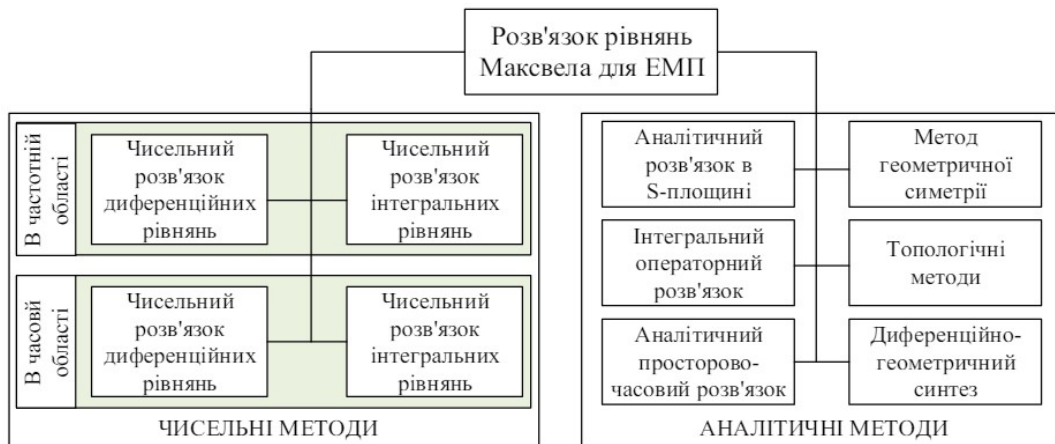


Рисунок 2.1 — Класифікація методів розв'язку рівнянь Максвелла

Одними з найпоширеніших методів чисельного аналізу, що застосовуються в системах імітаційного моделювання НВЧ пристроїв і антен є метод моментів, метод скінченних елементів, метод скінченних різниць у часовій області і метод ліній передач. Сутність застосування даних методів, стосовно прямої задачі електродинаміки, яка полягає у знаходженні розподілу полів і струмів при відомій геометрії електродинамічної структури і заданих параметрах середовища. За такої постановки задачі вихідними для моделювання

Подп. и дата
 Взам. инв. №
 Инв. № дубл.
 Подп. и дата
 Инв. № подл.

Зм	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
----	------	----------	--------	-----

електромагнітних полів є рівняння Максвелла з урахуванням відповідних граничних умов. Теоретично існує аналітичне розв'язання задач будь-якої складності, яке часто можна отримати за допомогою автоматизованих засобів. Однак для практичних завдань, пов'язаних із лабораторними дослідженнями НВЧ пристроїв і антен, точність таких розв'язків умовна, оскільки це лише мінімально достатня апроксимаційна процедура, що робить такий підхід недоцільним. З цієї причини в прикладній електродинаміці основна увага приділяється чисельним методам розв'язування. Алгоритми дискретних обчислень відносно прості й можуть забезпечити необхідну достовірність результатів. Серед широкого спектра методів математичного моделювання, які використовуються в сучасних програмних системах, можна виділити кілька основних методів, що лежать в основі чисельних розрахунків або безпосередньо використовуються в них.

2.1 Метод моментів

Метод моментів (МоМ — Method of Moments). При аналізі моделей за допомогою методу моментів загальний підхід до задач поширення та випромінювання електромагнітних хвиль полягає в зведенні отриманих інтегральних рівнянь до системи лінійних алгебраїчних рівнянь з M невідомими, які є коефіцієнтами певного розкладання для струму або поля за відомими функціями. Суть методу полягає в наступному: область, для якої шукається розв'язок, розбивається на скінчену кількість елементів, зі своїми (довільними) апроксимуючими функціями. Із цих функцій, з певними коефіцієнтами, утворюється система рівнянь для якої справедливими є виконання наступних умов: за межами елементів апроксимуюча функція рівна нулю; на границі двох елементів значення апроксимуючих функцій однакові. Процедура знаходження невідомих коефіцієнтів визначається геометрією структури, для якої проводиться розрахунок, а це вимагає додаткового аналізу вихідних умов, що відноситься до недоліків даного методу, при цьому, немає необхідності задання граничних умов, що відноситься до переваг методу.

Инв. № подл	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	РІ01.464659.001 ПЗ	Арк.

MLFMM (Multilevel Fast Multipole Method) – багаторівневий метод моментів, заснований на швидкому алгоритмі розрахунку.

2.2 Метод скінченних елементів

Метод скінченних елементів (FEM— Finite Element Method)) практично позбавлений цих недоліків вдалося уникнути завдяки тому, що під час формування розв'язку геометрія враховується відповідно до розміру області розбиття. Такий підхід дозволяє суттєво оптимізувати чисельні розрахунки, адаптуючи точність обчислень у різних частинах електродинамічної структури. Методовів свою ефективність під час розрахунків різних хвилеводних структур, застосування поглинаючих граничних умов і розрахунків антен та задач розсіювання.

Гібридні методи. Для розв'язання конкретних задач було розроблено та використано низку гібридних методів, заснованих на базових принципах методу моментів і методу скінченних елементів.

2.3 Метод фізичної оптики

РО (Physical Optics) Метод фізичної оптики використовується у випадку розрахунку електрично-великих площ або діелектричних структур. Це класичний метод наближеного розв'язку електродинамічних задач, який також називається методом Кірхгофа. В межах цього методу задача пошуку струмів на металевих поверхнях виключається, а струм приблизно обчислюється через магнітне поле падаючої на об'єкт хвилі. МоМ/РО гібридній метод Моментів/Фізичної оптики.

2.4 Метод геометричної оптики

Метод геометричної оптики (GO—Geometrical Optic) заснований на техніці розповсюдження променя, при якій моделі об'єктів розраховують ся на основі розповсюдження, заломлення і віддзеркалення оптичного про-

Ине. № дубл.	Ине. №	Подп. и дата
Ине. № подп	Подп. и дата	

Зм	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	PI01.464659.001 ПЗ	Арк
						236

меня. Гібридний метод Моментів/Геометричної оптики (MoM/GO).

2.5 Метод однорідної теорії дифракції

Метод однорідної теорії дифракції (UTD – Uniform Theory of Diffraction) є сучасним методом наближеного розв'язку задач розсіяння хвиль на великих об'єктах. Поверхня представляється набором плоских багатокутників, які мають спільні ребра. Поле, розсіяне багатокутником, ділиться на дві складові: геометро-оптична, утворена плоскою поверхнею і поле, що утворюється ребрами. МоМ/UTD – гібридний метод Моментів/однорідної теорії дифракції. Метод геометричної теорії дифракції

Метод геометричної теорії дифракції GTD (Geometrical Theory of Diffraction). Хвильове поле представляється в вигляді суми полів променевого типу, при цьому дифракційна задача зводиться до визначення амплітуд і фаз квазі-променевих полів із граничних умов. Генерація полів променевого типу відбувається на границях розділення середовищ и на границях «світло-тінь».

Розглянуті методи, в задачах аналізу поля випромінювання антен і розподілу енергії в НВЧ структурах не завжди є зручними, оскільки, у випадку частотного аналізу, розрахунки необхідно повторювати для кожної із частот в частотному діапазоні, для якого проводиться аналіз. Для розв'язку такого типу задач зручнішими є методи, що ґрунтуються на аналізі у часовій області. При їх застосуванні, можливо отримати характеристики пристрою відразу у всій смузі частот шляхом застосування перетворення Фур'є до часового відгуку системи. Одним із найбільш популярних методів аналізу у часовій області є метод скінченних різниць, що застосовується для розв'язку різноманітних задач електродинаміки.

Враховуючи, що аналіз проводиться у часовій області, шляхом застосування імпульсів різної форми, з використанням даного методу можна проводити дослідження пристроїв із різною робочою смугою частот. Частотні характеристики, при цьому, отримуються шляхом застосування дискретного перетворення Фур'є до часового відгуку системи.

Ине. № дубл.	Взам. ине. №	Подп. и дата					
Ине. № подл	Подп. и дата						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	PI01.464659.001 ПЗ		Арк.
							247

2.6 Метод скінченних інтегралів FIT

Метод скінченних FIT (Finite Intergration Technique) є одним із найпотужніших інструментів чисельного моделювання широкого спектру структур по трьох основних причинах: по-перше, цей метод може бути застосований у всьому частотному діапазоні, від постійного струму до високих частот. По-друге, даний метод легко застосовується до електрично складних конструкцій. По-третє, метод скінчених інтегралів підходить не тільки для будь-якого типу решіток, але й використовує різні способи дискретизації при моделюванні. Даний метод відрізняється своєю універсальністю, оскільки може бути реалізований як у часовий, так і в частотній області моделювання, а також не накладає обмежень на тип сітки дискретизації простору.

2.7 Метод лінії передач

Одним із розповсюджених методів часового аналізу НВЧ пристроїв і антен є метод лінії передач (MTL – Method of Telegraph Lines), який базується на аналогії між поширенням електромагнітних хвиль і поширенням електричних імпульсів у лініях передачі та дуже схожий за можливостями до методу скінченних різниць у часовій області. Даний метод потребує більше обчислювальних затрат, проте при розв'язанні задач, де має місце складна геометрія, дає кращі результати.

2.8 Використання CST MWS

CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS). Призначена для чисельного моделювання тривимірних високочастотних пристроїв (антен, фільтрів, відгалужувачів, планарних багат шарових структур).

Дана програма (рис. 2.2) дає змогу моделювати хвилеводи, хвилеводні і мікросмужкові направлені відгалужувачі потужності, ділянки і суматори потужності, хвилеводні, мікросмужкові і діелектричні фільтри, одно- і багат шарові мікросмужкові структури, лінії передачі, коаксіальні і багато-

Попл. и дата	
Взам. инв. №	
Инв. № дубл.	
Попл. и дата	
Инв. № подл.	

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

PI01.464659.001 ПЗ

Арк.

258

вивідні з'єднувачі, коаксіально-хвильоводні коаксіально-смушкові переходи, оптичні хвильоводи і комутатори, різні типи антен: рупорні, спіральні, планарні тощо.

Метод кінцевих різниць у часовій області (FDTD) дозволяє ефективно моделювати електромагнітні поля у складних структурах, враховуючи взаємодію хвиль з різними матеріалами та геометричними особливостями. Використання цього методу у CST MICROWAVE STUDIO забезпечує високу точність розрахунків і дає можливість досліджувати широкий спектр параметрів антенних систем.

Крім того, метод FDTD є дуже гнучким інструментом, який дозволяє проводити моделювання в широкому діапазоні частот, що особливо важливо для сучасних багаточастотних антенних систем. Це робить його незамінним у процесі проєктування антен для різних застосувань у телекомунікаційній, радіоінформаційній та інших галузях.

Отже, застосування методу скінченних різниць у часовій області в CST MICROWAVE STUDIO забезпечує високу точність і достовірність результатів моделювання.

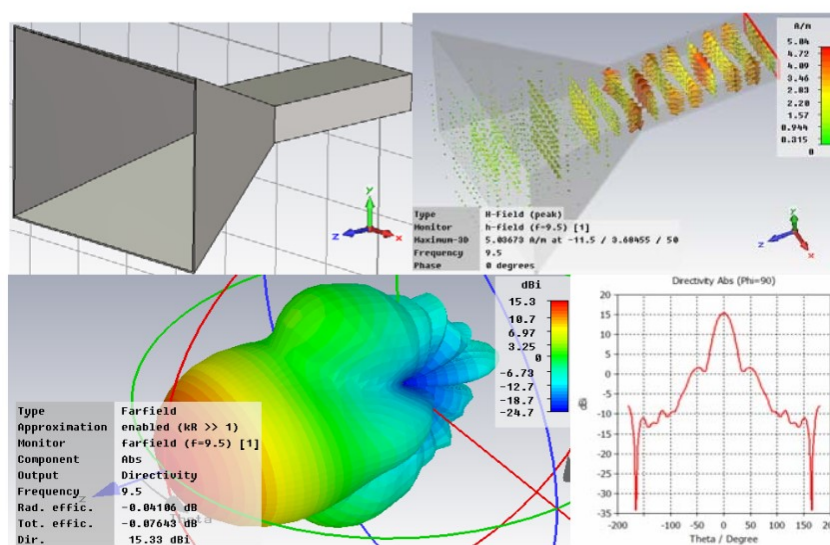


Рисунок 2.2 — Приклад моделювання антени в програмі CST MWS

Попл. и дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Попл. и дата
Инв. № подл

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
-----	------	----------	--------	-----

3.2.1 Trust Region Framework

Потужний локальний оптимізатор, який будує лінійну модель на основі первинних даних у «довірчій» області навколо початкової точки. Він використовує змодельоване рішення як нову відправну точку, доки не наблизиться до точної моделі даних.

Trust Region Framework може використовувати інформацію про чутливість S-параметрів, щоб зменшити кількість необхідних симуляцій і прискорити процес оптимізації.

3.2.2 Nelder Mead Simplex Algorithm

Цей метод є технікою глобальної оптимізації, яка використовує кілька точок, розподілених у просторі параметрів, щоб знайти оптимум. Симплексний алгоритм Нелдера Міда менше залежить від початкової точки, ніж більшість локальних оптимізаторів.

3.2.3 Еволюційна стратегія адаптації коваріаційної матриці (Covariance Matrix Adaptation Evolutionary Strategy)

Еволюційна стратегія адаптації коваріаційної матриці (CMA-ES) є найдосконалішим із глобальних оптимізаторів і має відносно швидку збіжність для глобального оптимізатора. За допомогою CMA-ES оптимізатор може «запам'ятовувати» попередні ітерації, що може допомогти покращити продуктивність алгоритму, уникаючи локальних оптимумів.

3.3 Налаштування середовища проектування

Для моделювання антени використовувався програмний комплекс, який дозволяє точно розрахувати електромагнітні параметри антенних систем та оптимізувати їх конструкцію. Комплекс дозволяє виконувати тривимірне моделювання електромагнітних полів, розраховувати параметри антенних систем та проводити оптимізацію конструкцій. Це програмне забезпечення забезпечує високу точність розрахунків та зручність у використанні.

Ине. № дубл.	Ине. № подп
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат
----	------	----------	-------	-----

XXX-XXX

Перед початком проектування антени необхідно налаштувати середовище. Це включає в себе визначення типу антени і частоту її роботи.

Також вибір типу підкладки, параметрів живлення та геометричних розмірів антени. Використовувалася підкладка з FR4 (рис. 3.2) товщиною 1.5 мм та з металізацією з олова товщиною 0.017 мм.

Процес оптимізації включав вибір відповідного типу матеріалу, визначення параметрів живлення та геометричних розмірів елементів антени. Вибір матеріалу підкладки був зумовлений його низькою вартістю.

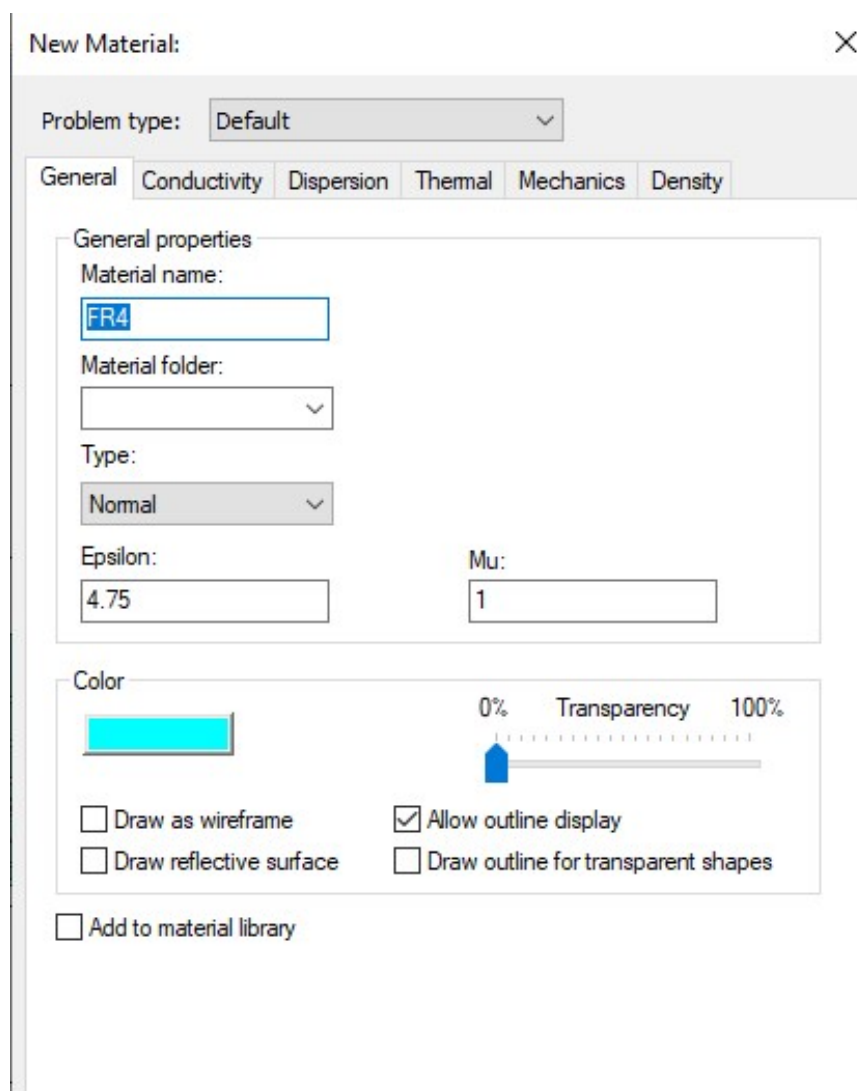


Рисунок 3.1 —

Налаштування матеріалу для діелектричної підкладки в CST MWS

3.4 Проектування структури

На першому етапі проектування необхідно створити тривимірну модель

Попл. и дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Попл. и дата
Инв. № подл.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
-----	------	----------	--------	-----

антени (рис. 3.3), враховуючи всі геометричні параметри та матеріали, з яких вона буде виготовлена. Особлива увага приділяється конструюванню копланарного живлення, що забезпечує зручність живлення та задовільне узгодження.

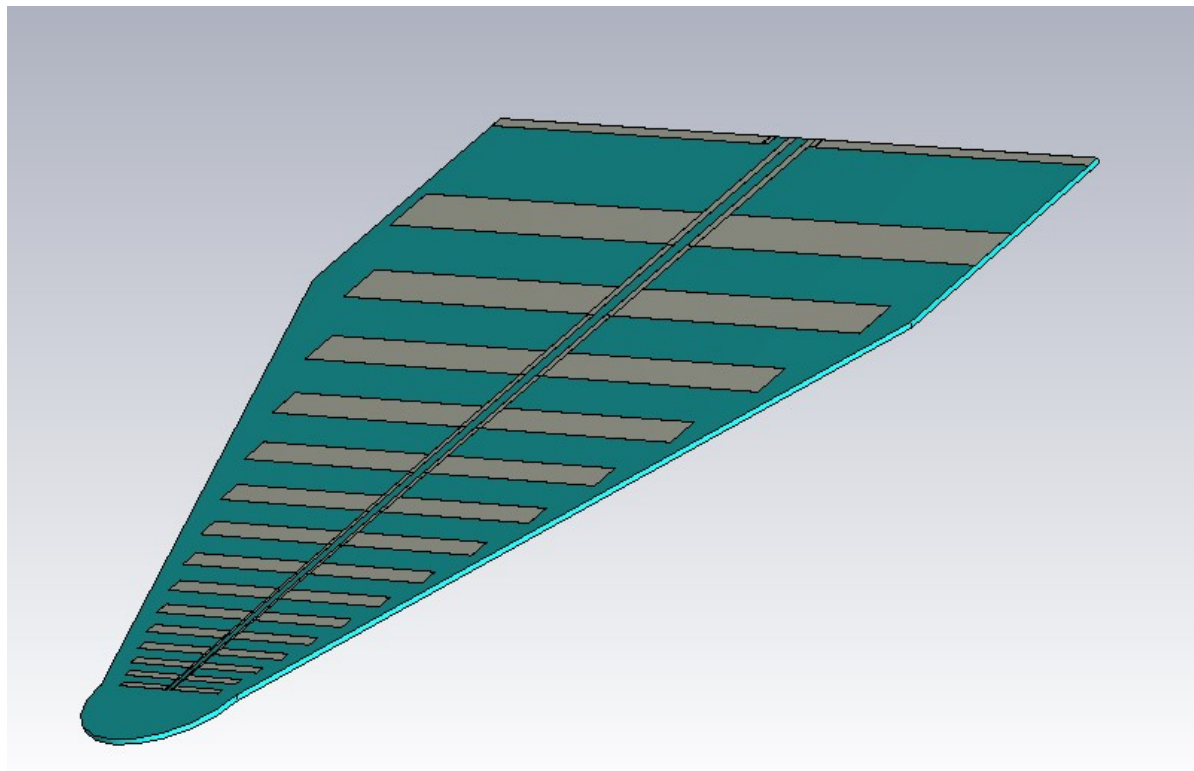


Рисунок 3.2 — 3D модель антени

Далі проводиться серія симуляцій для визначення основних характеристик антени, таких як коефіцієнт відбиття (S_{11}), коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (КСХН), діаграма спрямованості для частот 0.7, 1, 2, 4, 6, ГГц та підсилення показано на рисунку 3.4 та 3.5. На основі отриманих результатів проводиться оптимізація геометрії антени для досягнення найкращих параметрів, а саме мінімального відбиття від -10 дБ і коефіцієнт стоячої хвилі по навантаженню менше двох у заданому діапазоні частот.

Ине. № подп	Подп. и дата	Ине. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

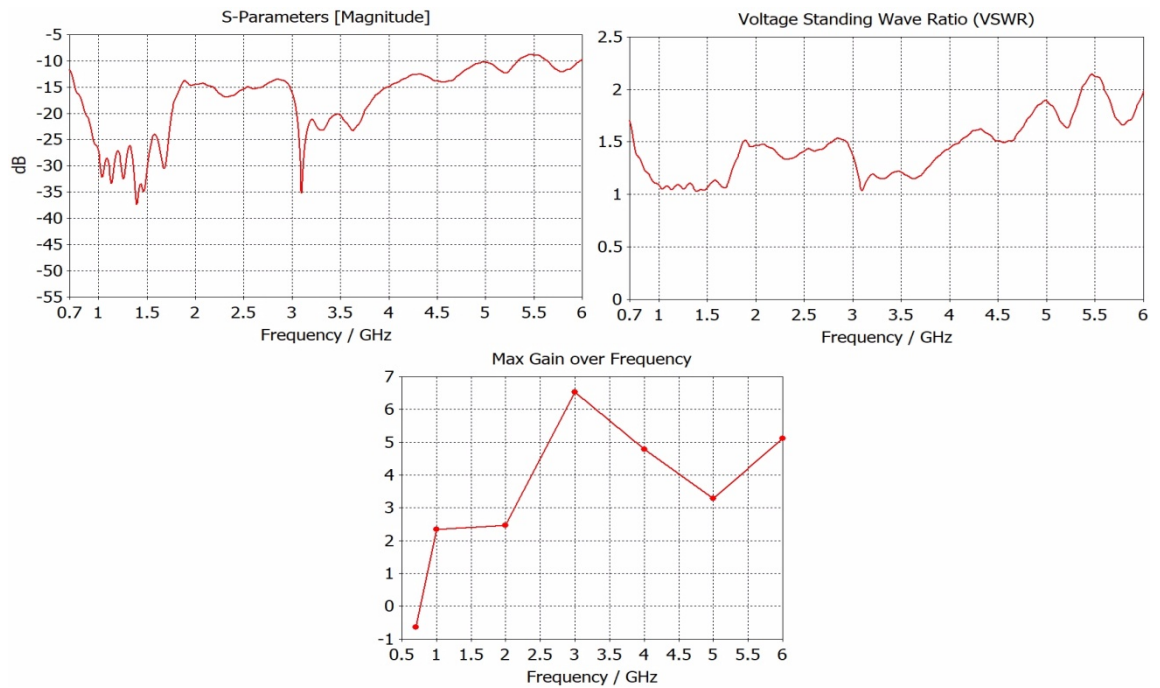


Рисунок 3.3 — Параметри отримані в результаті моделювання антени

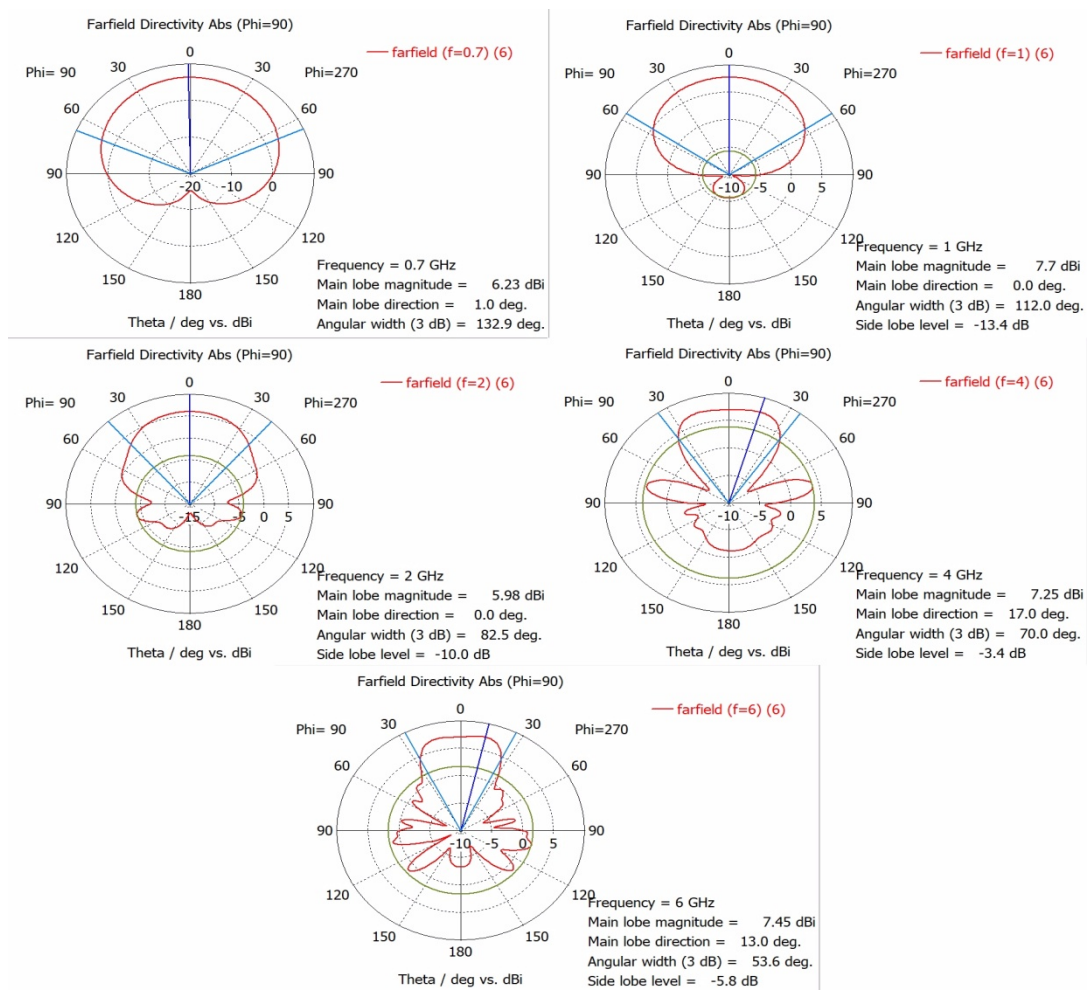


Рисунок 3.4 —

Діаграми спрямованості отримані в результаті моделювання антени

Полп. и дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Полп. и дата
Инв. № подл

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
-----	------	----------	--------	-----

PI01.464659.001 ПЗ

Арк.
24

Результати моделювання підтвердили високу ефективність розробленої антени у заданому діапазоні частот. Параметри, отримані в результаті моделювання, показують, що антена має низький коефіцієнт відбиття (S_{11}), що свідчить про хорошу узгодженість антени з підключеними пристроями, та високу спрямованість, що забезпечує ефективне випромінювання в заданому напрямку.

Діаграми спрямованості антени були проаналізовані для різних частот у робочому діапазоні. Результати показали, що антена має спрямованість 60 градусів і більше за рівнем -3 дБ. Аналіз діаграм спрямованості дозволив визначити оптимальні кути нахилу і орієнтацію антени для її роботи.

Завдяки використанню методу FDTD вдається досягти високої точності моделювання, що в подальшому підтвердиться експериментальними даними. Це дозволяє скоротити кількість необхідних фізичних прототипів та знизити витрати на розробку антенної системи.

3.5 Вплив різних геометричних параметрів на характеристики антени

Для якісного дослідження характеристики антени і для дослідження можливих змін розмірів для більш кращих характеристик, змодельовано декілька антен з подібною структурою, але різними розмірами а саме: дослідження впливу довжини вібраторів в два рази зменшено, в два рази збільшено (рис. 3.5 та 3.6), досліджено ширина вібраторів в два рази збільшена та в два рази зменшена (рис. 3.7 та 3.8) і досліджено відстань між вібраторами два рази збільшена та в два рази зменшена (рис 3.9 та 3.10), змінена структура з сходинкоподібною на прямолінійну (рис 3.11 та 3.12).

Для початку досліджемо довжину вібратора і за формулою аналогічно зміниться довжина інших вібратора через коефіцієнт τ .

Попл. и дата	
Взам. инв. №	
Инв. № дубл.	
Попл. и дата	
Инв. № подл	

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

PI01.464659.001 ПЗ

Арк.

25

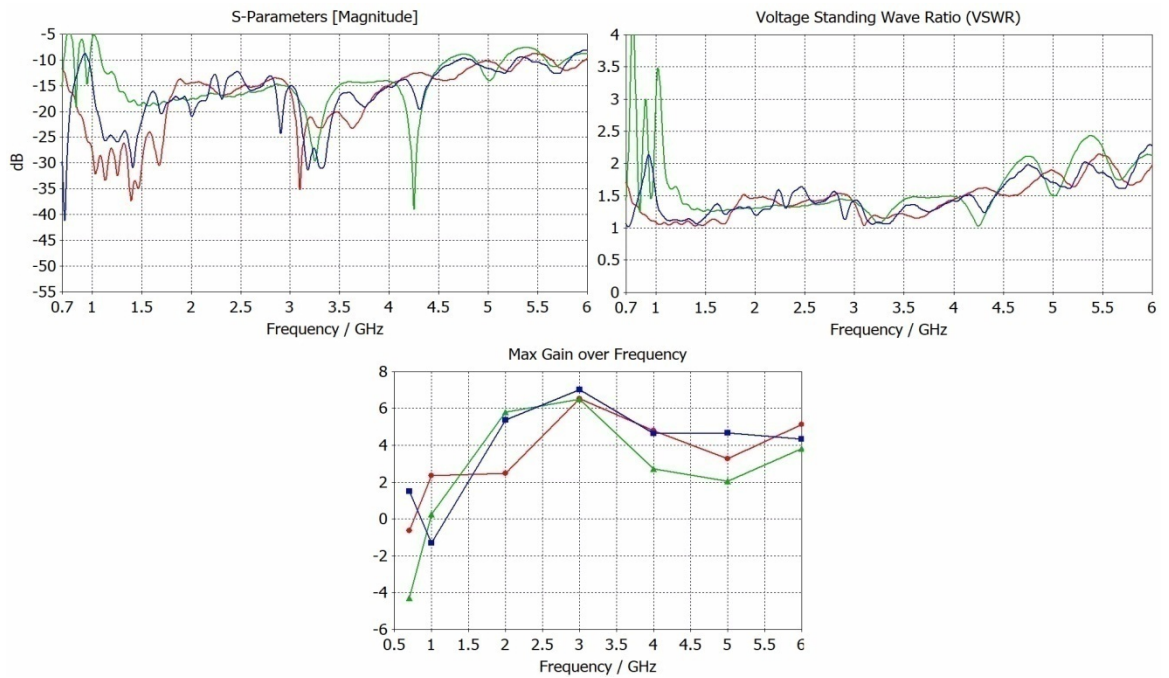


Рисунок 3.5 —

Параметри отримані в результатах моделювання антени (червоний колір), зменшений в два рази початковий вібратор до 100 мм (зелений колір), збільшений в два рази до 400 мм (синій колір)

Результат показує, що при довжині першого вібратора 200 мм ми маємо поганий результат по КСХН, а саме більше двох на частоті до 1,1 ГГц. Також спостерігається аналогічна проблема з параметром S11, оскільки відбиття менше -10 дБ на частоті до 1,1 ГГц, а розмір вібратора 400 мм не задовольняє нас по компактності антени.

Підп.	Підп. і дата
Взам. инв. №	
Инв. № дубл.	
Підп. і дата	
Инв. № подп	

Зм	Арк	№ докум.	Підпис	Дат
----	-----	----------	--------	-----

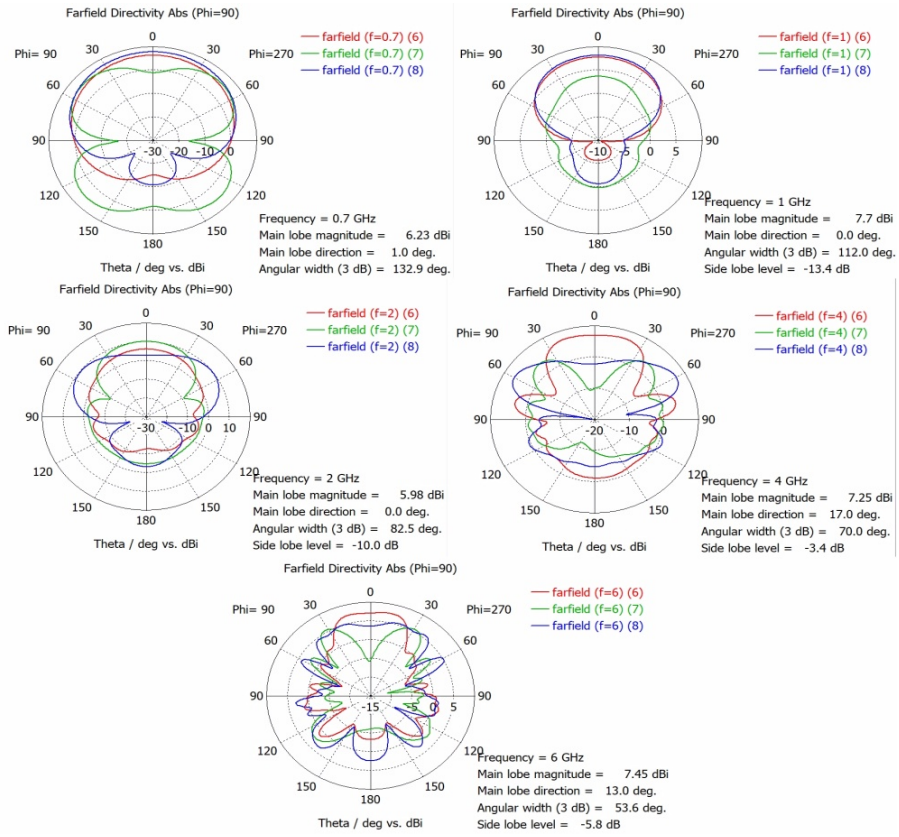


Рисунок 3.6 —

Діаграми спрямованості отримані в результаті антени (червоний колір), зменшений в два рази початковий вібратор до 100 мм (зелений колір), збільшений в два рази до 400 мм (синій колір)

Також бачимо проблему при зміні повинні першого оператора по діаграмм спрямованості починаючи з 2 ГГц діаграма спрямова становить менше 60° за рівнем -3 дБ.

Наступне дослідження вплив ширини вібраторів.

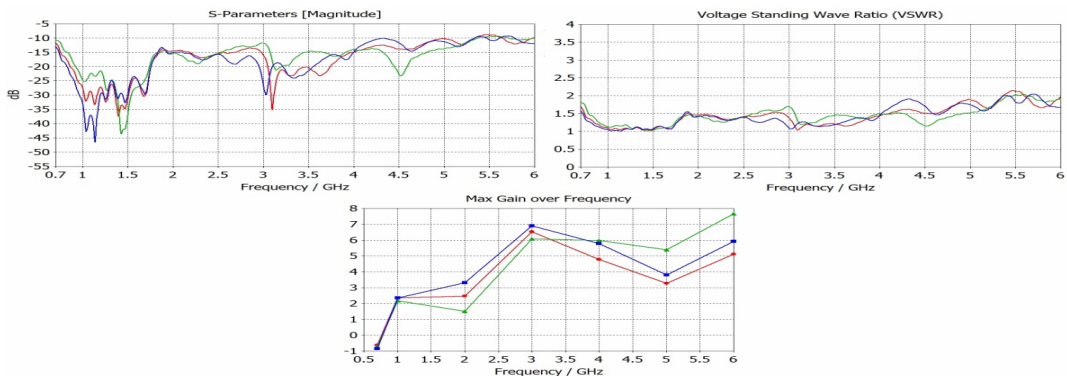


Рисунок 3.7—

Параметри отримані в результаті моделювання антени (червоний колір), збільшений в два рази початковий вібратор до 30 мм (зелений колір), зменшений в два рази до 7,5 мм (синій колір)

Подп. и дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Подп. и дата
Инв. № подл

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
-----	------	----------	--------	-----

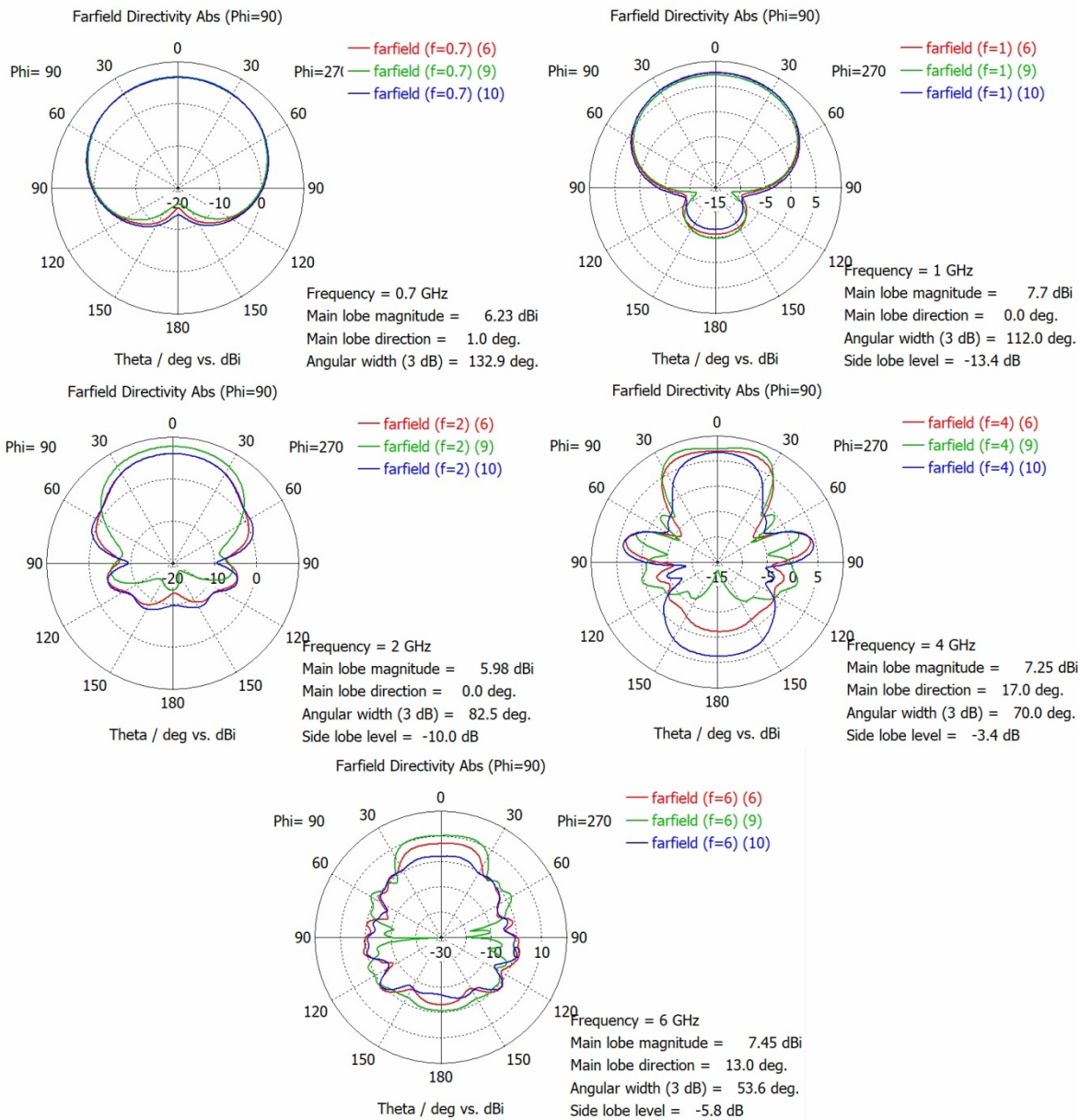


Рисунок 3.8 —

Діаграми спрямованості отримані в результаті моделювання антени (червоний колір), збільшений в два рази початковий вібратор до 30 мм (зелений колір), зменшений в два рази до 7,5 мм (синій колір)

Аналогічно бачимо проблему при зміні ширини першого вібратора при зменшенні в два рази бачимо гірші параметри по коефіцієнту стоячої хвилі по напрузі, а саме на 4,3 ГГц вона дуже наближена до двох ніж на при ширині першого вібратора в 15 мм вона тримається на рівні 1,5, но більша проблема по діаграмі спрямованості, що при збільшенні, що при зменшенні ширини першої вібратора діаграма спрямованості починаючи з 4 ГГц становить менше 60° за рівнем -3 дБ.

Підп. і дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Підп. і дата
Инв. № подл

Зм	Арк	№ докум.	Підпис.	Дат
----	-----	----------	---------	-----

Дослідження вплив відстані між вібраторами

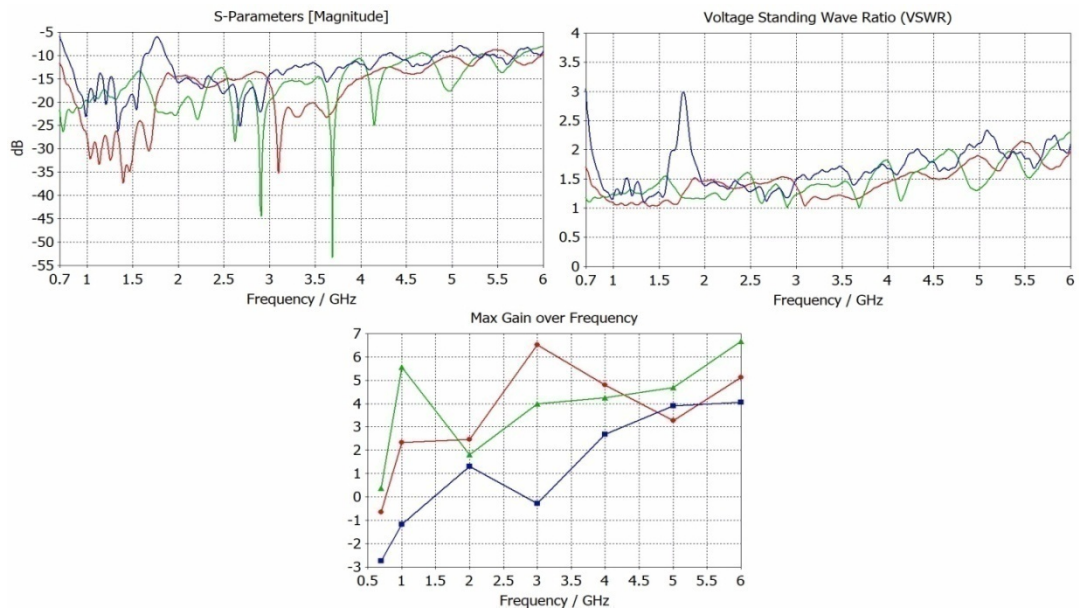


Рисунок 3.9 —

Параметри отримані в результаті моделювання антени (червоний колір), збільшений в два рази початкової відстані до 80 мм (зелений колір), зменшений в два рази до 20 мм (синій колір)

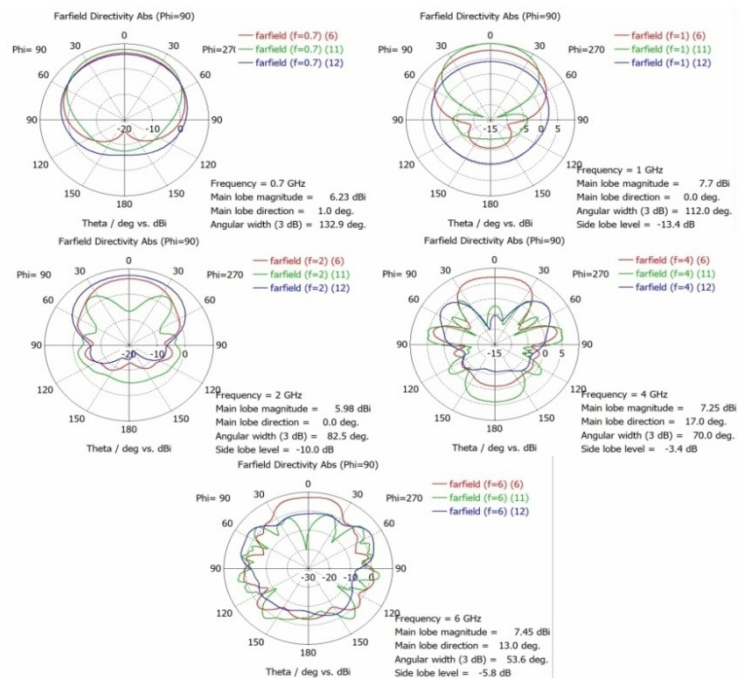


Рисунок 3.10 —

Діаграми спрямованості отримані в результаті моделювання дипломної антени (червоний колір), збільшений в два рази початкової відстані до 80 мм (зелений колір), зменшений в два рази до 20 мм (синій колір)

Подп. и дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Подп. и дата
Инв. № подл

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
-----	------	----------	--------	-----

Також при зміні відстані між вібраторами в два рази ми бачимо, що в нас починаючи з 2 Гц діаграма спрямовленості становиться менше 60° за рівнем -3 дБ і стає менш направленною, а при збільшенні в два рази КСХН на частоті 1,7 Гц різко зростає до трьох що погано і також починаючи з частоти 4 ГГц діаграма спрямованості стає менше 60° за рівнем -3 дБ.

Зміна геометрії антени з сходиноподібної до прямої.

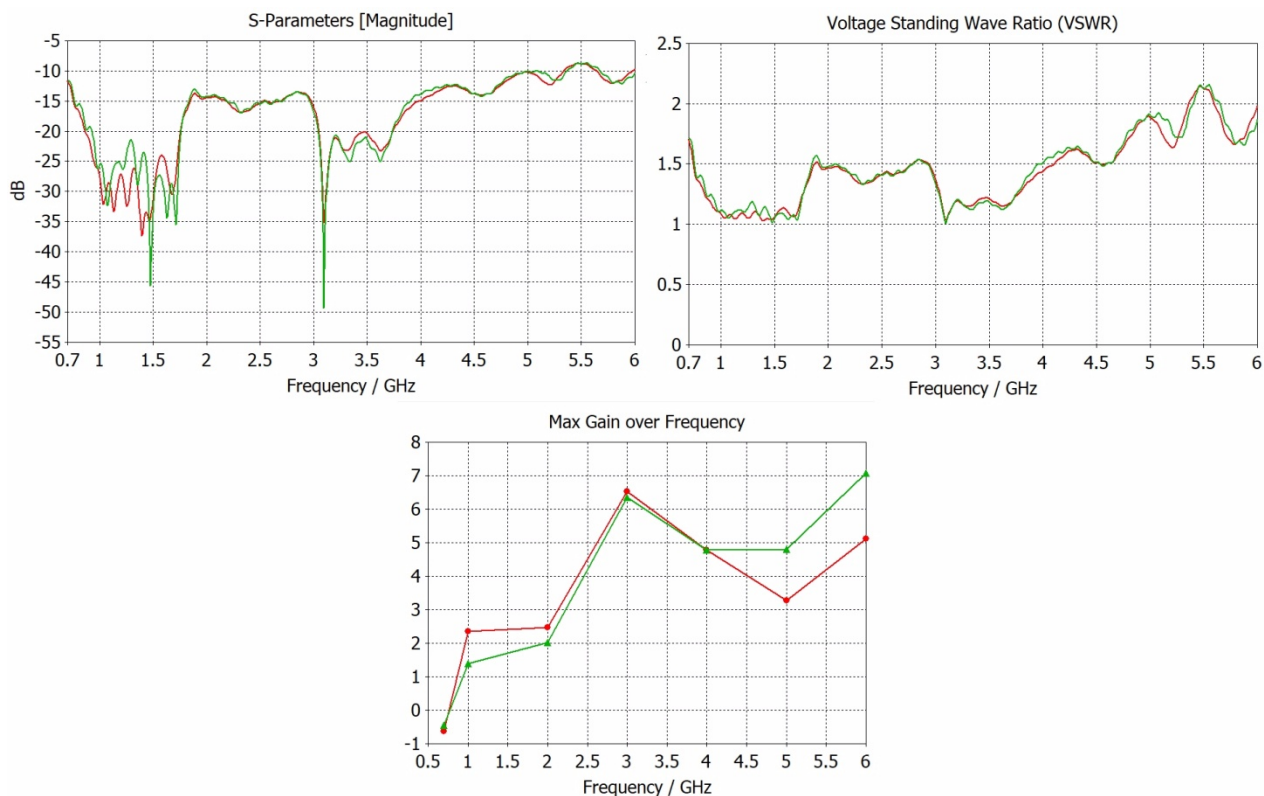


Рисунок 3.11 —

Параметри отримані в результатах моделювання антени (червоний колір) та прямої (зелений колір)

Підп. і дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Підп. і дата
Инв. № подп

Зм	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дат
----	------	----------	---------	-----

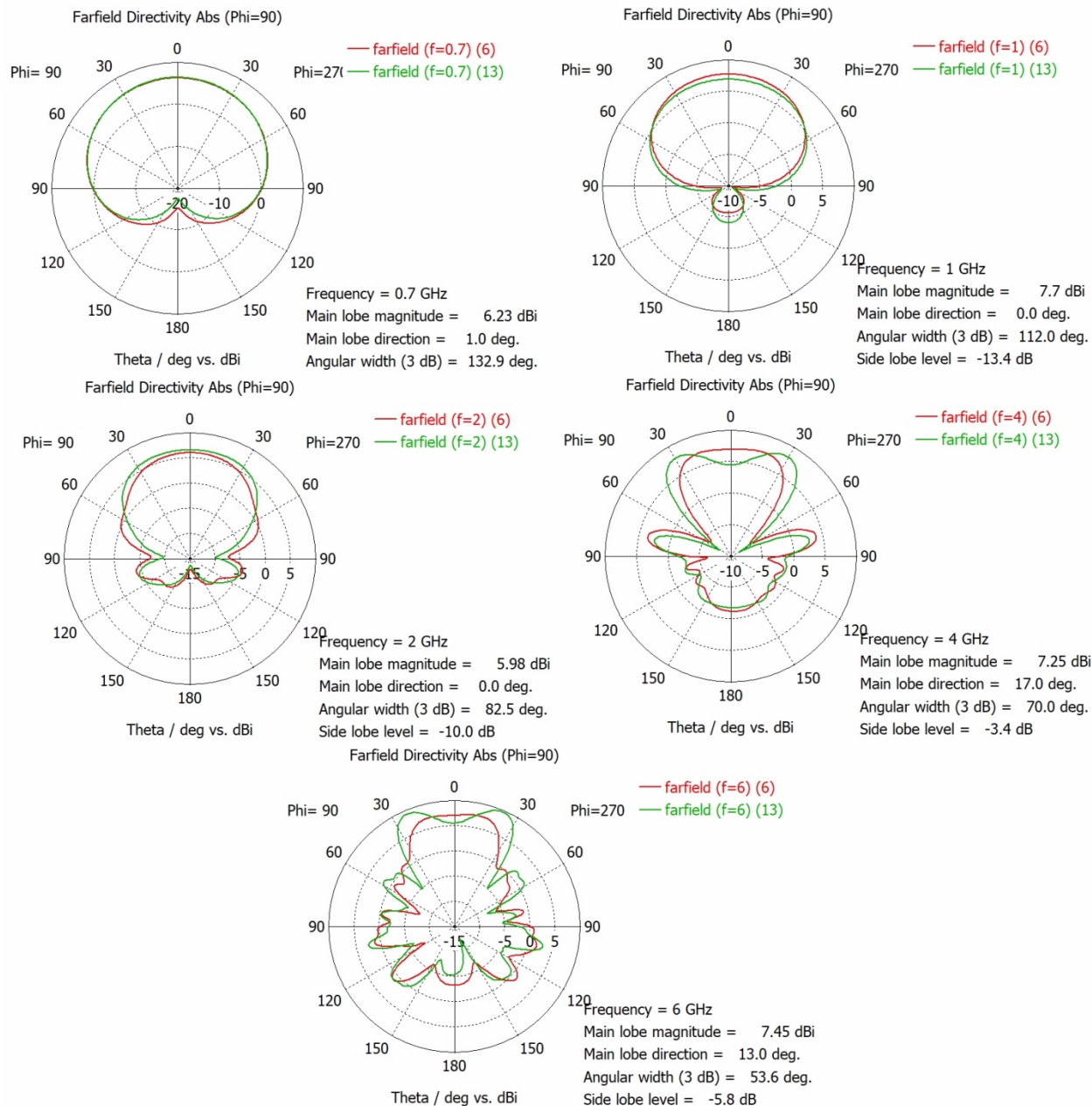


Рисунок 3.12 —

Діаграми спрямованості отримані в результаті моделювання антени (червоний колір) та прямої (зелений колір)

Основна проблема в прямоподібній структурі те що на 4 і 6 ГГц діаграма спрямовленості стає менше 60° за рівнем -3 дБ.

Підп. і дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Підп. і дата
Инв. № подл

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
-----	------	----------	--------	-----

3.6 Розробка в Altium Designer

Після успішної симуляції структури антени переходимо до її розробки у Altium Designer, для виготовлення прототипу на друкованій платі показано на рис. 3.13.

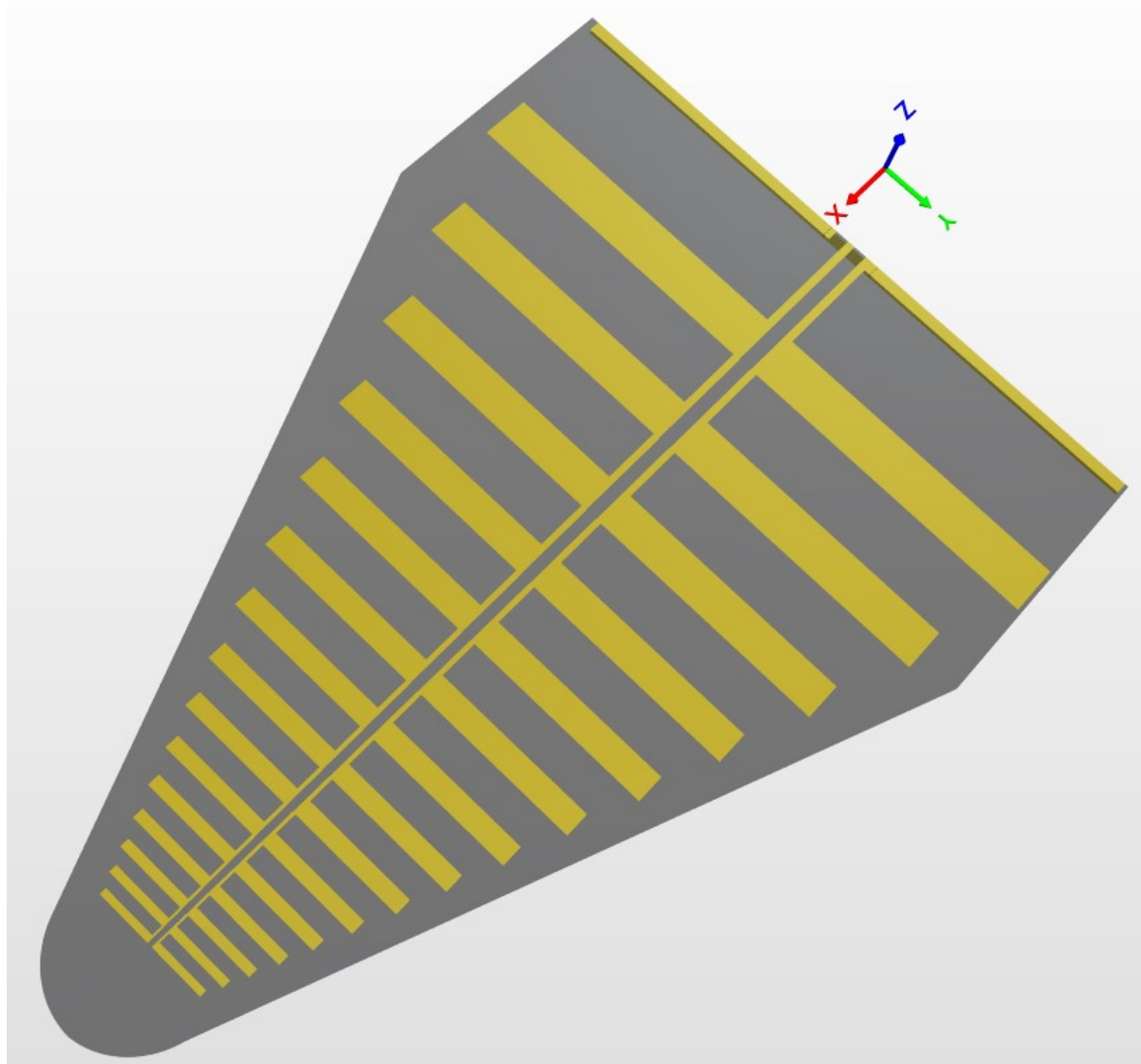


Рисунок 3.13 — 3D модель антени

Ине. № подп	Подп. и дата	Ине. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Зм	Арк	№ докум.	Підпис.	Дат

PI01.464659.001 ПЗ

Арк

32

Инв. № подл	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

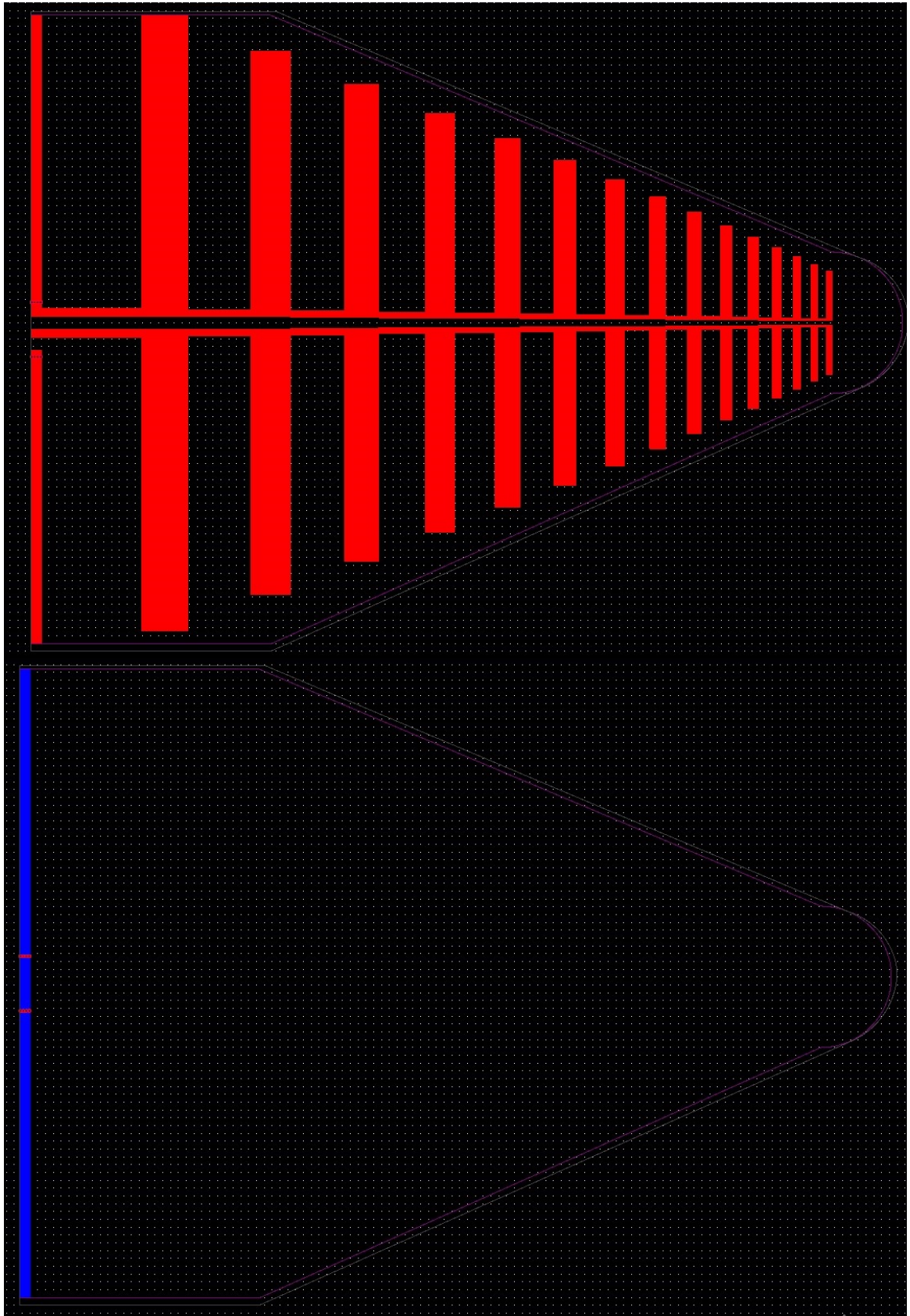


Рисунок 3.14 — Шари плати антени червоний верхній шар, синій нижній шар

PI01.464659.001 ПЗ

Арк.

33

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ЗРАЗОК

Для експериментального дослідження антени було замовлено виготовлення зразка. Виготовлено макетантени на діелектрику FR4 товщиною 1.5 мм та металізацією з олова товщиною 0.017 мм показано на рисунку 4.1.

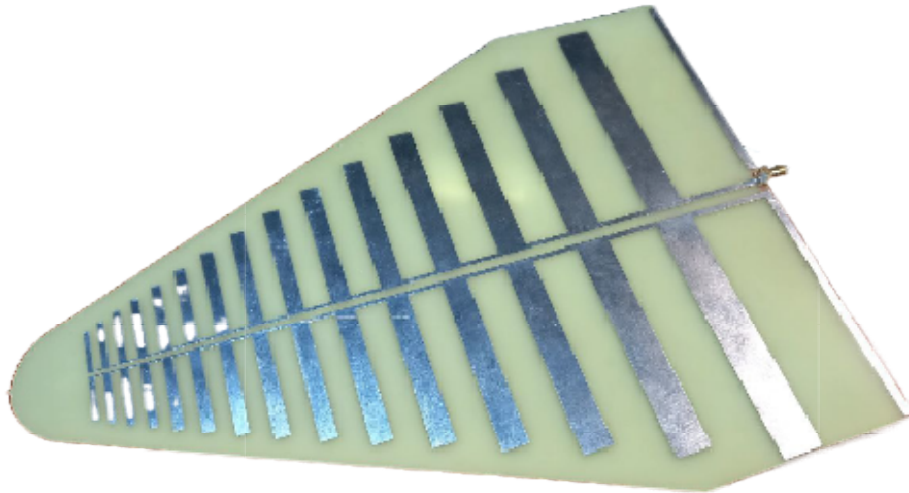


Рисунок 4.1 — експериментальний зразок готової плати

Для порівняння практичної і теоретичної моделі виведемо їхні параметр і S11 (рис. 4.2)

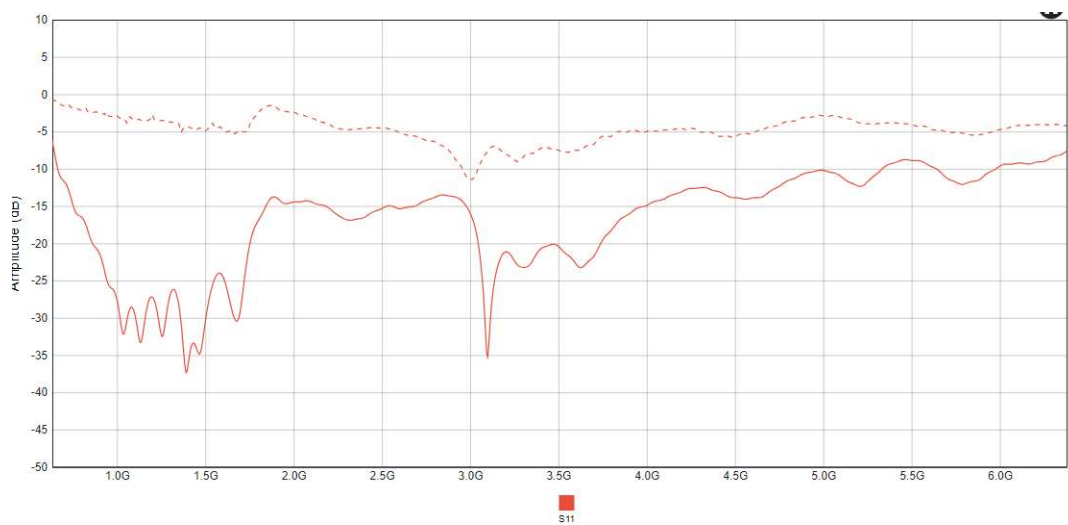


Рисунок 4.2 —

Порівняння теоретичного значення (суцільна лінія) і експериментального значення (пунктирна лінія)

Подп. и дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Подп. и дата
Инв. № подл

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
-----	------	----------	--------	-----

Є різниця майже в 2 рази в результатах, з'ясуємо в чому причина, проведемо деякі модернізації для можливого виправлення проблеми.

Можлива помилка у під'єднанні порта, допаяємо до контактів додаткове з'єднання з антеною показано на рисунку 4.3.

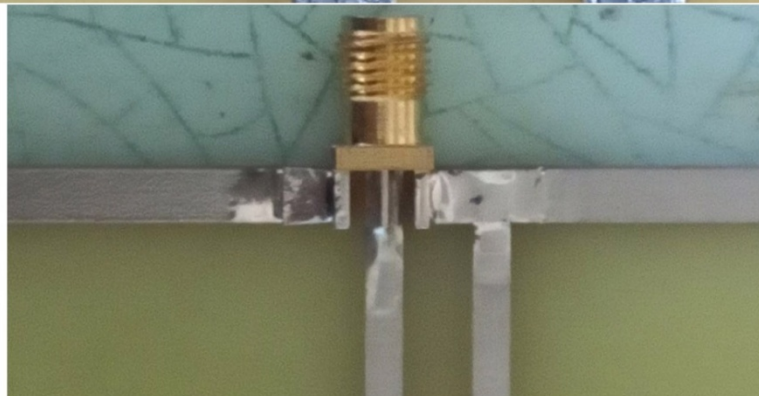
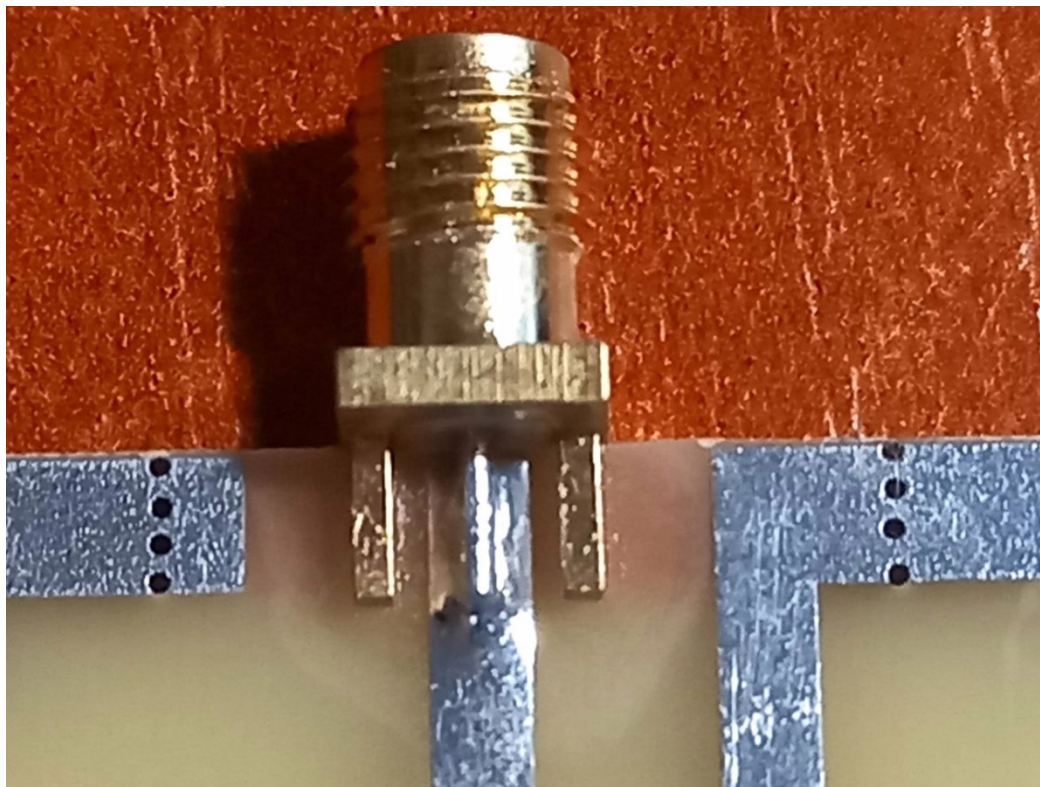


Рисунок 4.3 — Старе і нове розташування порта
Порівнюємо тепер теоретичний практичне значення (рис. 4.4).

Инев. № подп	Подп. и дата
Инев. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
-----	------	----------	--------	-----

PI01.464659.001 ПЗ

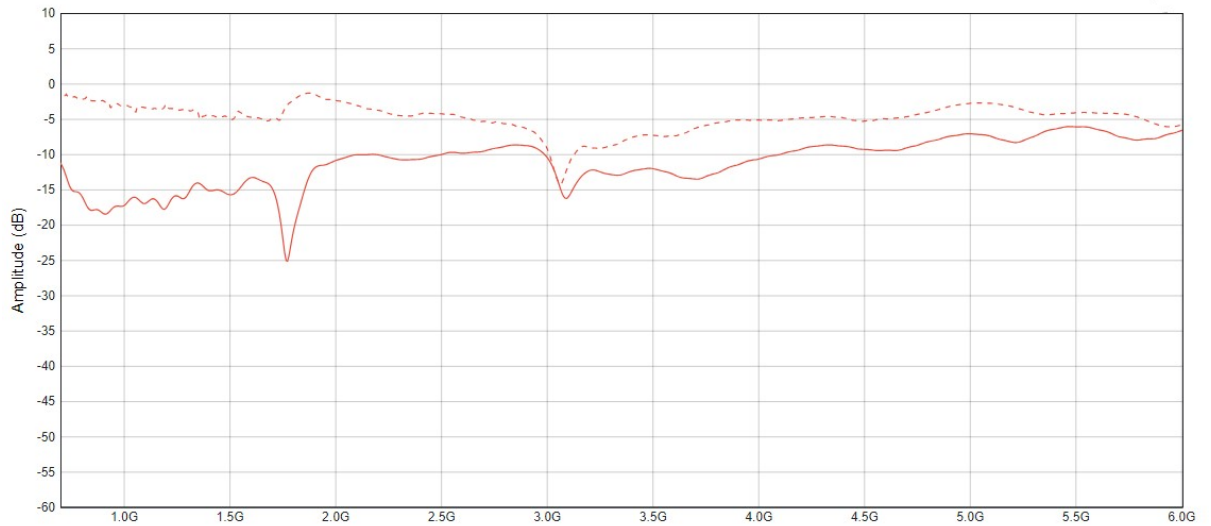


Рисунок 4.4 —

Порівняння теоретичного значення (суцільна лінія) і експериментального значення (пунктирна лінія)

Можливо є помилка в роботі змодельованої 3D моделі з визначенням хвилевідного порту поставлено дискретний порт показано на рисунку 4.5.

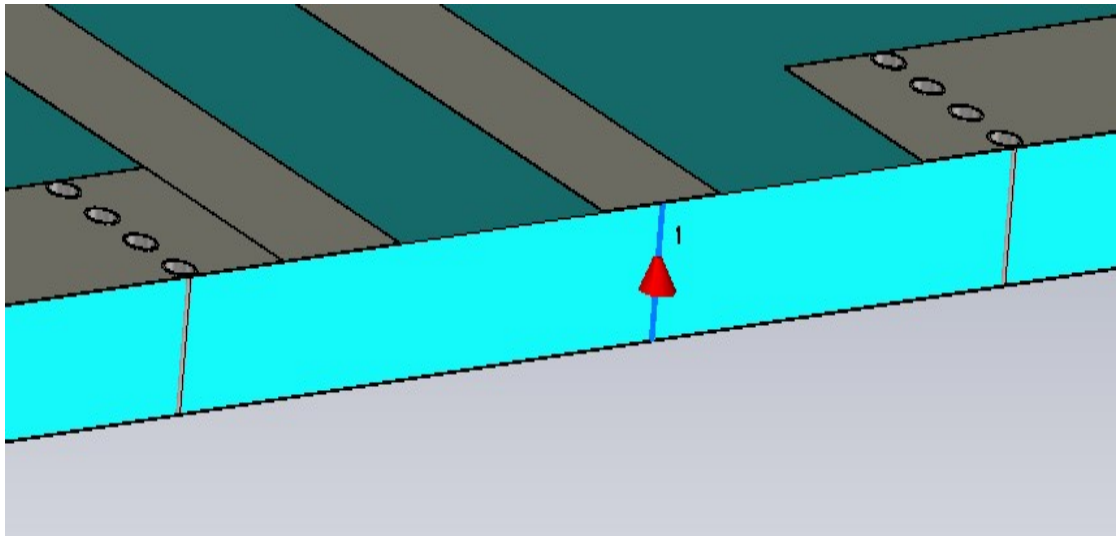


Рисунок 4.5 — Нове місцезнаходження дискретного порту на 3D моделі

Порівнюємо тепер результати з дискретним портом з експериментальними результатами показано на рисунку 4.6.

Підп. і дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Підп. і дата
Инв. № подп

Зм	Арк	№ докум.	Підпис	Дат
----	-----	----------	--------	-----

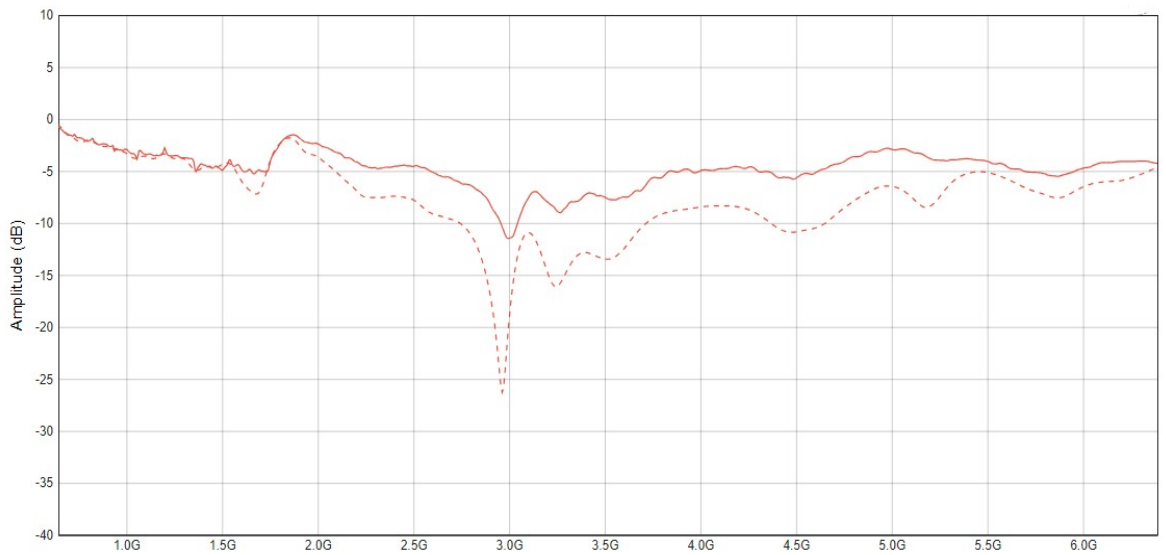


Рисунок 4.6 —

Порівняння теоретичного значення (пунктирна лінія) і експериментального значення (суцільна лінія)

Також можливою причиною може бути те що занадто мала відстань між вібраторами, але як видно з третього розділу відстань не сильно впливає. Але то були розрахунки на хвилевідному порті тож спробуємо ще зробити те ж саме з дискретним портом виведемо даний графік з збільшеною в півтора і в два рази відстані між вібраторами.

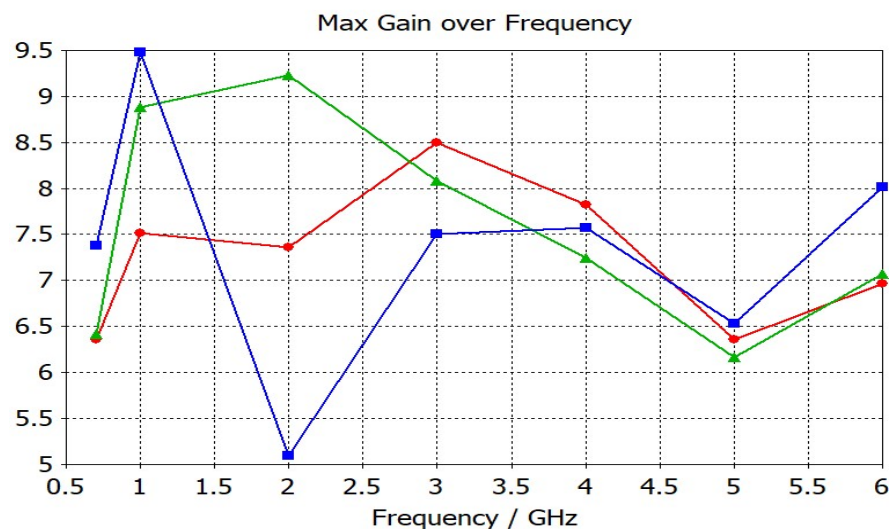


Рисунок 6.7 —

Параметри отримані в результатах моделювання нової антени (червоний колір), збільшений в 1.5 рази відстань між вібраторами до 60 мм (зелений колір), збільшений в два рази до 80 мм (синій колір)

Підп. і дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Підп. і дата
Инв. № подл

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
-----	------	----------	--------	-----

Отже можна зробити висновок, що теоретичні дані співпадають з експериментальними даними які були виміряні за допомогою векторний аналізатор кіл Anritzu, а скоріше різниця з першою спробою за все через те, що була проблема в роботі 3D модел, а саме в роботі хвилевідного порта можливе рішення цього буде перерахування даної антени з урахуванням дискретного порта, вироблення ще одного експериментального зразка і подальше його під налаштування. Загалом було розраховано з хвилевідним портом початкову модель і були отримані задовільні результати по відбиттю а саме менше -10 дБ і по діаграмам спрямованості на всій частоті вони були більше 60° за рівнем -3 дБ, але ці виміри не співпали з вимірами які були отримані експериментально було проведено аналіз моделі і виявлено, що була помилка у роботі при збудженні хвилевідним портом було проведено збудження за допомогою дискретного порту і результати цього моделювання співпало з експериментальними значеннями

Инв. № подп	Подп. и дата				Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	PI01.464659.001 ПЗ		
					38		

5 ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ АНТЕНИ

Хоча дана антена і проектується для радіорозвідки, але також вона може використовуватися для інших задач.

5.1 Використання в телекомунікаційних системах

Смужкова логоперіодична антена з копланарним живленням має широко-смужкові характеристики, що робить її потенційним вибором для телекомунікаційних систем. Передача та прийом сигналу в діапазоні частот від 0.7 до 6 ГГц забезпечує стабільну роботу мережі, що є критичним для сучасних систем мобільного зв'язку і бездротових інтернет-технологій.

5.2 Застосування в системах радіомоніторингу

Завдяки своїм широкосмужковим характеристикам розроблена антена може бути використана в системах радіомоніторингу. Це дозволяє відстежувати і аналізувати радіочастотний спектр, що є важливим для забезпечення національної безпеки, управління частотним ресурсом і виявлення несанкціонованих радіовипромінювань.

5.3 Перспективи у військових технологіях

Військові комунікаційні системи вимагають високої надійності та ефективності передачі даних. Смужкова логоперіодична антена може використовуватися в тактичних радіосистемах, системах зв'язку на полі бою, що працюють в широкому діапазоні частот. Це забезпечує надійну і захищену передачу інформації в складних умовах експлуатації. Антена може бути використана для забезпечення зв'язку між підрозділами на полі бою, а також для передачі даних з розвідувальних дронів, що дозволяє оперативно отримувати важливу інформацію і приймати відповідні рішення.

Антена може використовуватися для забезпечення зв'язку в умовах активного радіоелектронного придушення, що є критично важливим для сучасних військових операцій. Вона може інтегруватися в системи захищеного зв'язку,

Инва. № подп	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
-----	------	----------	--------	-----

PI01.464659.001 ПЗ

Арк.

39

забезпечуючи високий рівень безпеки передачі даних. Також антена може бути використана в системах радіоелектронної боротьби (РЕБ) для виявлення та придушення ворожих сигналів.

5.4 Безпілотні літальні апарати (БПЛА)

Іншою важливою областю застосування є безпілотні літальні апарати (БПЛА), які використовуються для різних цілей, включаючи спостереження, моніторинг і зв'язок. Смушкові логоперіодичні антени дозволяють забезпечити стабільний і надійний зв'язок між БПЛА і наземними станціями управління, що є критично важливим для роботи цих систем.

Антени для БПЛА також можуть використовуватися для забезпечення зв'язку в умовах поганої видимості або складних погодних умовах, що дозволяє підвищити ефективність місій з моніторингу та розвідки. Крім того, антени можуть використовуватися для забезпечення зв'язку з великим числом дронів одночасно, що важливо для координації масових операцій.

Таким чином, розроблена смушкова логоперіодична антена з коплананим живленням має широкий спектр можливих застосувань. Її універсальність роблять її привабливою для використання в різних галузях, де потрібна надійна передача даних в широкій смузі частот.

Також перевага даної антени в тому що порт живлення знаходиться ззаду, а не зі сторони менших вібраторів як у більш антенах, що робить його більш зручними і також також позбавляє нас від втрат в кабелю, який би в іншому випадку йшов би від коротких вібрав і був за довгим.

Підп. і дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Підп. і дата
Инв. № подп

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
-----	------	----------	--------	-----

PI01.464659.001 ПЗ

Арк.

40

ВИСНОВОК

У дипломному проекті було розраховано та виготовлено логоперіодичну антену з копланарним живленням, з підсилення 6.5-8.5 дБі, шириною діаграм спрямованості по рівню -3 дБ від 60° на частотах 0,7-6 ГГц на підкладинці FR4 з тангенсом кутових втрат 0,015 на частоті 10 ГГц.

За результати моделювання було виготовлено друковану плату антени. Після виготовлення було проведено монтаж коаксимального SMA-роз'єму. Створений експериментальний зразок антени був підданий серії випробувань для оцінки його характеристик, які були порівняні з теоретичною моделлю яка змодельована із використанням методу FDTD.

Були виявлені розходження параметре S11 між теоретичними і експериментальними моделями, які були пов'язані з невірною роботою 3D моделі, а саме у збудженні хвилевідним портом. Після того, як збудження відбулося через дискретний порт отримані експериментальні і теоретичні дані співпали з середньою похибкою 20%.

Щоб покращити антену, необхідно провести додаткові експерименти, враховуючи зміни в її конструкції та параметрах. Це дозволить досягти більшої відповідності теоретичним розрахункам

. Це включає оптимізацію геометрії антени, вибір матеріалів з кращими електричними характеристиками (підкладки із низькими втратами) і покращення методик виготовлення прототипів.

Загалом, проведені дослідження показали можливість використання розробленої антени для використання в сучасних системах радіорозвідки. Подальші дослідження і вдосконалення антени дозволять покращити характеристики узгодження та розширити її застосування.

Попл. и дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Попл. и дата
Инв. № подл.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

PI01.464659.001 ПЗ

Арк.

41

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Simplified Printed Log-Periodic Dipole Array Antenna Fed by CBCPW Веб сайт URL: <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2013/548610/>
2. Ultra-Wideband Log Periodic Dipole Antenna (LPDA) for Wireless Communication Applications Веб сайт URL: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?Paperid=85767>
3. Wideband simplified feed for printed log-periodic dipole array antenna Веб сайт URL: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/el.2013.2184>
4. Design of a printed log-periodic dipole array antenna with high gain for millimeter-wave applications Веб сайт URL: https://www.academia.edu/21915195/Design_of_a_printed_log_periodic_dipole_array_antenna_with_high_gain_for_millimeter_wave_applications?auto=download
5. A Low-Profile High-Gain and Wideband Log-Periodic Meandered Dipole Array Antenna with a Cascaded Multi-Section Artificial Magnetic Conductor Structure Веб сайт URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6832207/>
6. Design and Optimization of Compact Printed Log-Periodic Dipole Array Antennas with Extended Low-Frequency Response Веб сайт URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/17/2044>
7. Антена Yagi широкосмугова 0,8-6 ГГц 5-8 Дб wavlink U6-SMA Веб сайт URL: <https://tehbezpeka.ua/ua/p1961758996-antenna-yagi-shirokopolosnaya.html>
8. MEASALL Log-Periodic Antenna KC R100B 8ghz Веб сайт URL: <https://deespace.net/product/kc-r100b-8ghz-log-periodic-antenna/>
9. Log Periodic Antenna SAS-519-7 Веб сайт URL: <https://www.ahsystems.com/catalog/SAS-519-7.php>

Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

PI01.464659.001 ПЗ

Арк.

42

10. Modeling of Electrodynamic Phenomena in an Ultra-Rapid Inductive–Dynamic Actuator as Applied to Hybrid Short-Circuit Breakers—A Review Study Веб сайт URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/24/9394>
11. МОДЕЛЮВАННЯ НВЧ ПРИСТРОЇВ І АНТЕН В ЗАДАЧАХ ЇХ АНАЛІЗУ, СИНТЕЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ Веб сайт URL: <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/?P=1733>
12. Parameterization and Optimization with CST Studio Suite Веб сайт URL: <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite/automatic-optimization>
13. "Mobile and Wireless Communications: Key Technologies and Future Applications" by Mohammad S. Obaidat, Alagan Anpalagan, Isaac Wongang.
14. "UAV Communications for 5G and Beyond" by Yong Zeng, Rui Zhang, Teng Joon Lim. Веб сайт URL: https://www.researchgate.net/publication/334669143_Receding_Horizon_Optimization_for_Energy-Efficient_UAV_Communication

Инв. № подл	Подп. и дата				Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл	Зм	Арк	№ докум.	Підпис	Дат	PI01.464659.001 ПЗ	Арк
	43														

ДОДАТОК А. . ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

1. Назва виробу

Смужкова логоперіодична антена із копланарним живленням для діапазону частот 0.7-6 ГГц.

2. Мета виконання і призначення продукції

2.1 Мета виконання

Метою роботи є розробка смужкової логоперіодичної антена із копланарним живленням. Перевага даної антени в тому, що порт живлення знаходиться ззаду.

2.2 Призначення продукції

Може бути використана в якості приймальної антени в системах радіорозвідки та радіомоніторингу. Також в системах передачі інформації, але для потужностей не більше декількох ват.

3. Технічні вимоги

3.1 Умови експлуатації

Граничні робочі температури, °С: -20...+60.

Відносна вологість: 60 % при +20 °С, 80 % при +25 °С

3.2 Вимоги призначення комплексу

S11 <-10 дБ

Ширина діаграми спрямованості за рівнем -3 дБ: 60градусів

Коефіцієнт підсилення: від 3 дВі

КСХН: <2

3.3 Вимоги до сировини, матеріалів.

Металізація з олова товщиною 0.017 мм та матеріал друкованої плати FR 4 з тангенсом кутових втрат 0,015 на частоті 10 ГГц.

3.4 Вимоги до розроблюваної документації

Оформлення документації згідно ДСТУ 3008:2015.

Підп. і дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Підп. і дата
Инв. № подп

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

PI01.464659.001 ПЗ

Арк.

44

