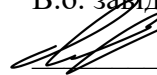


НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
кафедра РАДІОІНЖЕНЕРІЇ

«На правах рукопису»
УДК 621.396.677

До захисту допущено:

В.о. завідувача кафедри

 Сергій ЛІТВІНЦЕВ

«11» 12 2024 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою

«Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

зі спеціальності 172 « Електронні комунікації та радіотехніка»

на тему: «Ультраширокосмугова двополяризаційна логоперіодична антена
на діелектричній підкладці діапазону частот 700-6000 МГц»

Виконав студент II курсу, групи PI-31 мп

Хоменко Богдан Іванович



Науковий керівник:

PhD, доцент, Сушко Олександр Юрійович



Рецензент:

К.т.н., доцент, Антипенко Руслан Володимирович

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____



Київ – 2024

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра радіоінженерії

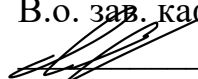
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

спеціальність 172 “Електронні комунікації та радіотехніка”

Освітньо-професійна програма “ Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія”

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. зав. кафедри РІ

 **Сергій ЛІТВІНЦЕВ**

« 02 » 09 2024 року

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту (тці)

Хоменку Богдану Івановичу

1. Тема дисертації Ультраширокосмугова двополяризаційна
логоперіодична антена на діелектричній підкладці діапазону частот
700-6000 МГц

науковий керівник дисертації

PhD, доцент, Сушко Олександр Юрійович

затверджені наказом по університету від «8» листопада 2024 р. № 5023-с

2. Термін подання студентом дисертації 11 грудня 2024 року

3. Об'єкт дослідження: подвійно поляризована логоперіодична антена

4. Вихідні дані: робочий діапазон частот антени 700 – 6000 МГц, коефіцієнт
підсилення 5 – 9.19 дБ, коефіцієнт підсилення 7 дБ, коефіцієнт відбиття від входу
 $S_{11} < -10$ дБ, вхідний опір - 50 Ом

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Огляд і аналіз конструкцій подвійно
поляризованих широкосмугових антен. 2. Дослідити особливості побудови
логоперіодичних антен на діелектричній підкладці. 3. Розрахунок та розробка
логоперіодичної дипольної антени та логоперіодичної антени на друкованій платі

з діапазоном частот 700 – 6000 МГц. 4. Розрахунок та розробка однопортової логоперіодичної антени з коловою поляризацією на діелектрику з діапазоном частот 700 – 6000 МГц. 5. Розробка подвійно поляризованої логоперіодичної антени на РСВ з діапазоном частот 700 – 6000 МГц. 6. Розробка Gerber файлів для виробництва подвійно поляризованої логоперіодичної антени. 7. Розробка стартап проекту

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація доповіді містить 17 слайдів

7. Орієнтовний перелік публікацій:

8. Консультанти розділів дисертації: науково-педагогічні працівники радіотехнічного факультету.

9. Дата видачі завдання: 2 вересня 2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз завдання та методів реалізації	02.09.2024-10.09.2024	
2	Аналіз реалізованих подвійно поляризованих логоперіодичних антен	10.09.2024-25.09.2024	
3	Розробка та моделювання логоперіодичної дипольної антени та логоперіодичної антени на друкованій платі	25.09.2024-10.10.2024	
4	Розробка та моделювання однопортової подвійно поляризованої логоперіодичної антени з коловою поляризацією на діелектрику	10.10.2024-10.11.2024	
5	Розробка та моделювання подвійно поляризованої логоперіодичної антени на РСВ	10.11.2024-21.11.2024	
6	Створення Gerber файлів для виготовлення подвійно поляризованої логоперіодичної антени	21.11.2024-28.11.2024	
7	Розробка стартап проекту	28.11.2024-05.12.2024	
8			

Студент



Богдан ХОМЕНКО

Науковий керівник



Олександр СУШКО

АНОТАЦІЯ

Метою даної роботи є дослідження і розробка ультраширокосмугової двополяризаційної логоперіодична антена на діелектричній підкладці.

Актуальність теми полягає в тому, що розвиток систем передачі інформації та радарних систем вимагає постійної адаптації до сучасних умов. З кожним роком зростає потреба в антенах, які забезпечують стабільні характеристики і широкий діапазон частот.

Ціль дослідження є проектування і розробка ультраширокосмугової двополяризаційної логоперіодичної антени на діелектричній підкладці для застосування в станціях радіорозвідки та бездротових системах передачі даних.

Задачею даного дослідження є оптимізація та створення параметризованої 3Д моделі антени із подальшим її виготовленням та експериментальним дослідженням.

Об'єктом дослідження є ультраширокосмугова двополяризаційна логоперіодична антена на діелектричній підкладці діапазону частот 700-6000 МГц.

Предметом дослідження є електродинамічні характеристики узгодження та випромінювання ультраширокосмугової двополяризаційної логоперіодичної антени на діелектричній підкладці діапазону частот 700-6000 МГц.

Методи - у даній роботі використовується теоретичний аналіз, огляд наукових статей та застосування програмних пакетів CST Microwave Studio і Altium Designer.

Практичне значення отриманих результатів обумовлені тим, що вони спрямовані на створення ультраширокосмугових двополяризаційних логоперіодичних антен, які можуть бути використані в таких галузях, як системи радіорозвідки та системи бездротової передачі даних. Це сприяє вдосконаленню сучасних технологій і розширенню їхніх можливостей у відповідних сферах застосування.

У першому розділі розглянуто особливості побудови логоперіодичних антен на діелектричній підкладці в порівнянні з класичними вібраторними

логоперіодичними антенами. Другий розділ присвячений аналізу існуючих аналогів подвійно поляризованих широкосмугових логоперіодичних антен. У третьому розділі було розглянуто розробку широкосмугової дипольної логоперіодичної антени та широкосмугової логоперіодичної антени на діелектрику. У четвертому розділі представлено розробку та моделювання логоперіодичної антени з коловою поляризацією на діелектричній підкладці та подвійно поляризованої логоперіодичної антени на РСВ. У п'ятому розділі показано процес розробки гербер файлів для виготовлення антени.

Текстова частина дипломної роботи містить: 86 сторінки, 84 рисунок та 20 посилань на використані джерела.

Ключові слова: логоперіодична антена, логоперіодична антена на друкованій платі, подвійнополяризована логоперіодична антена на друкованій платі.

ANNOTATION

The purpose of this work is to research and develop an ultra-wideband dual-polarization log-periodic antenna on a dielectric substrate.

The relevance of the topic lies in the fact that the development of information transmission systems and radar systems requires constant adaptation to modern conditions. Every year the need for antennas that provide stable characteristics and a wide frequency range is growing.

The purpose of the research is to design and develop an ultra-wideband dual-polarization log-periodic antenna on a dielectric substrate for use in radio reconnaissance stations and wireless data transmission systems.

The task of this research is to optimize and create a parameterized 3D model of the antenna with its subsequent manufacture and experimental research.

The object of the research is an ultra-wideband dual-polarization log-periodic antenna on a dielectric substrate in the frequency range of 700-6000 MHz.

The subject of the study is the electrodynamic characteristics of the matching and radiation of an ultra-wideband dual-polarization log-periodic antenna on a dielectric substrate in the frequency range of 700-6000 MHz.

Methods - this work uses theoretical analysis, a review of scientific articles and the application of the CST Microwave Studio and Altium Designer software packages.

The practical significance of the results obtained is due to the fact that they are aimed at creating ultra-wideband dual-polarization log-periodic antennas that can be used in such areas as radio reconnaissance systems and wireless data transmission systems. This contributes to the improvement of modern technologies and the expansion of their capabilities in the relevant areas of application.

The first section considers the features of constructing log-periodic antennas on a dielectric substrate in comparison with classical vibratory log-periodic antennas. The second section is devoted to the analysis of existing analogues of dual-polarized broadband log-periodic antennas. The third section considered the development of a broadband dipole log-periodic antenna and a broadband log-periodic antenna on a

dielectric. The fourth section presents the development and modeling of a log-periodic antenna with circular polarization on a dielectric substrate and a dual polarized log-periodic antenna on a PCB. The fifth section shows the process of developing Gerber files for the manufacture of the antenna.

The text part of the thesis contains: 86 pages, 84 figures and 20 references to the sources used.

Keywords: log-periodic antenna, log-periodic antenna on a printed circuit board, dual polarized log-periodic antenna on a printed circuit board.

Зміст

АНОТАЦІЯ	4
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП	11
1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЛОГОПЕРІОДИЧНИХ АНТЕН	13
1.1 Живлення логоперіодичної антени на діелектричній підкладці	14
1.2 Кінець лінії живлення в логоперіодичній антені на діелектричній підкладці	18
1.3 Форма підкладки логоперіодичної антени	18
1.4 Зменшення розмірів логоперіодичної антени на діелектричній підкладці	19
1.5 Виготовлення логоперіодичної антени методом фотолітографії.....	22
Висновки до розділу 1	25
2. ОГЛЯД АНАЛОГІВ	26
2.1 Подвійно поляризована широкосмугова логоперіодична антена XSLP 9142	26
2.2 Подвійно поляризована широкосмугова логоперіодична антена XSLP 9143	28
2.3 Подвійно поляризована широкосмугова логоперіодична антена LPDA-A0157	29
Висновки до розділу 2	31
3. РОЗРОБКА ШИРОКОСМУГОВОЇ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ АНТЕНИ	32
3.1 Розрахунок логоперіодичної дипольної антени.....	32
3.2 Електродинамічне моделювання логоперіодичної антени на друкованій платі	37

Висновки до розділу 3	43
4. РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ АНТЕНИ З КОЛОВОЮ ПОЛЯРИЗАЦІЄЮ ТА ДВОПОЛЯРИЗОВАНОЇ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ АНТЕНИ НА ДІЕЛЕКТРИЧНІЙ ПІДКЛАДЦІ.....	45
4.1 Побудова однопортової логоперіодичної антени з коловою поляризацією на РСВ.....	45
4.2 Побудова подвійно поляризованої логоперіодичної антени на РСВ	57
Висновки до розділу 4	68
5. СТВОРЕННЯ ГЕРБЕР ФАЙЛІВ ДЛЯ ПОДВІЙНО ПОЛЯРИЗОВАНОЇ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ АНТЕНИ	70
5.1 Розробка гербер файлів для антени.....	70
Висновки до розділу 5	73
6. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ.....	74
6.1 Опис ідеї проекту	74
6.2 Технологічний аудит проекту.....	75
6.3 Аналіз ринкових можливостей стартап проекту	75
6.4 Створення ринкової стратегії.....	81
6.5 Розроблення маркетингової концепції стартап-проекту	82
Висновки до розділу 6	84
ВИСНОВКИ.....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	87

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

PCB – Printed circuit board – Друкована плата

ДС – Діаграма спрямованості

КСХН – Коефіцієнт стоячої хвилі по напрузі

ЛПВА – Логоперіодична вібраторна антена

РР – Радіорозвідка

ВСТУП

Сучасний світ дозволяє легко, швидко обмінюватися інформацією. Обсяг інформаційного потоку зростає з кожним днем, перевершуючи всі попередні показники. Кількість пристроїв і з'єднань збільшується значно швидше, ніж темпи зростання населення або кількість користувачів інтернету.

У військовій сфері цей бурхливий розвиток технологій активно використовується для створення сучасних систем радіорозвідки та систем бездротового зв'язку. Новітні пристрої та антенні комплекси, такі як логоперіодичні антени, забезпечують можливість перехоплення, аналізу та обробки величезних обсягів даних у реальному часі. Це дає змогу підвищити ефективність військового планування, моніторингу й управління, відкриваючи нові перспективи для інформаційної переваги на полі бою.

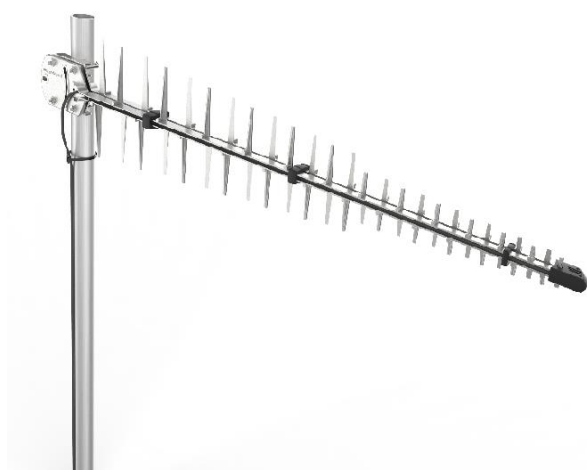
Логоперіодична антена (ЛПВА) є однією з найпоширеніших антен, яка використовується у широкому діапазоні частот. Ця антена відрізняється своєю широкосмуговістю та простотою конструкції. Вона є багатoelementною спрямованою антеною, конструкція якої заснована на логарифмічній залежності розмірів елементів.

З розвитком технологій виготовлення великомасштабних інтегральних схем та друкованих плат логоперіодичні антени у друкованому виконанні набули значної популярності серед дослідників, інженерів та розробників антенних систем. Їх переваги включають невелику вагу, низьку вартість, простоту виготовлення, а також зручність у монтажі. Друковані антени характеризуються низькопрофільною конструкцією, високою міцністю та універсальністю. Вони дозволяють легко налаштовувати параметри, такі як резонансна частота, діаграма спрямованості, поляризація та імпеданс. Додатково, такі антени легко інтегруються з електронними пристроями та можуть бути реалізовані у вигляді конформних антен для роботи на вигнутих поверхнях.

Завдяки своїм перевагам, друковані ЛПВА антени стають оптимальним рішенням у багатьох сучасних системах. Особливо їх привабливість обумовлена

можливістю значного зниження вартості та швидкості виробництва у порівнянні з традиційними антенами. Враховуючи попит на антени, здатні ефективно працювати у низькочастотному та високочастотному діапазоні, тема розробки друкованої подвійно поляризованої логоперіодичної антени стала актуальною для виконання в межах даної дипломної роботи.

Така антена має перспективу стати стандартним елементом у вимірювальних системах безехових камер, забезпечуючи високу точність випробувань завдяки стабільним характеристикам у широкому частотному діапазоні. Крім того, її конструкція відкриває можливості для інтеграції в компактні багатофункціональні пристрої, зокрема в сучасні системи зв'язку (рис. 1.1 а), військових комплексах радіорозвідки (рис. 1.1 б).



а) LPDA-92 для передачі сигналу в технології 5G



б) Всенаправлена біконусна антена діапазону 500-6000 МГц та 2 логоперіодичні антени діапазону 500-6000 МГц

Рисунок 1.1 – Зображення логоперіодичної антени, яка використовується в 5G-мережах [1] та у військових системах радіорозвідки [2]

1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЛОГОПЕРІОДИЧНИХ АНТЕН

Існує багато логоперіодичних антен. Деякі є плоскими, інші є трапецієподібними, інші відомі як V-подібні, щілинні тощо.

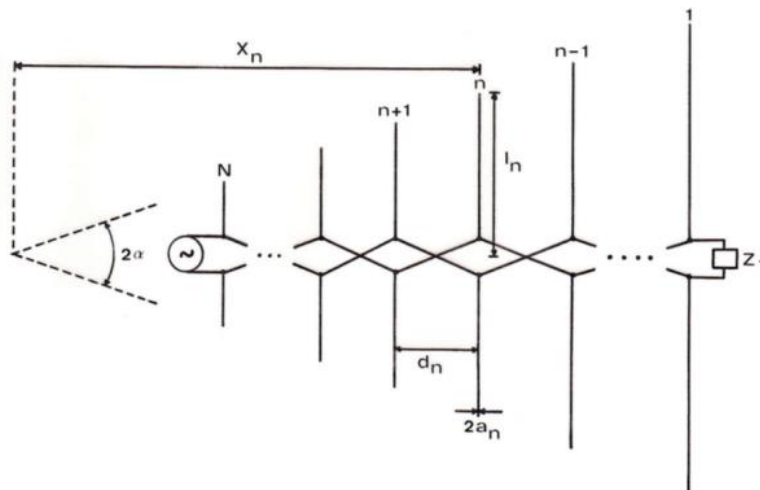


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення ЛПВА

У порівнянні з класичною вібраторною логоперіодичною антеною, рис. 1.2, логоперіодична антена на діелектричній підкладці характеризується схожими конструктивними параметрами та принципами побудови. Основною відмінністю є виготовлення антени на РСВ у вигляді тонких металізованих провідників, нанесених на поверхню діелектричної підкладки (друкованої плати).

З точки зору функціональності, логоперіодичну антену можна поділити на три основні зони: зону випромінювання, активну зону та зону відбиття. Вони визначаються наступним чином.

Активна область логоперіодичної антени являє собою зону, де збуджуються сильні струми, а диполі функціонують поблизу їхньої резонансної частоти. Енергія, що проходить через лінію передачі, поглинається, створюючи сильні струми на вході диполів. Фазові співвідношення цих струмів забезпечують формування основного пелюстка випромінювання у напрямку до вершини антени [3]. Диполі в активній зоні, довжина яких наближається до $\lambda/2$, виконують функції активних елементів. При підвищенні частоти роль активних елементів поступово передається від довших диполів до коротших. Енергія, що випромінюється

коротшими активними диполями, практично не передається довшим неактивним елементам, оскільки її інтенсивність швидко зменшується.

Область передачі є зоною антени, де диполі мають найменшу довжину. Вони характеризуються низьким входним опором і значним реактивним опором, обумовленим входною ємністю. У цій зоні лінія живлення може пропускати хвилю з мінімальним загасанням, що спричиняє появу струмів із дуже низькою амплітудою на входах диполів [3]. Випромінювані поля в цій області, через їхню низьку інтенсивність, мають тенденцію взаємно компенсуватися. Крім того, напруга вздовж структури залишається практично незмінною, тоді як фаза змінюється приблизно на 150 градусів для кожного $\lambda/4$ сегмента лінії передачі.

Область відбиття характеризується диполями, довжина яких перевищує $\lambda/2$, і які мають значний індуктивний входний опір. У разі повного поглинання енергії в активній області незначна частка енергії, яка не була випромінена, відображається саме в цій зоні. При цьому струми на входах дипольних елементів мають дуже малу амплітуду [3]. У ситуаціях, коли робоча частота досягає свого мінімального значення, область відбиття закінчується навантаженням на завершенні антени.

1.1 Живлення логоперіодичної антени на діелектричній підкладці

Живлення антени може здійснюватися як і у класичній штирьовій логоперіодичній антені за допомогою коаксіального кабелю і друкованих ліній. Таке живлення називається пряме коаксіальне з'єднання.

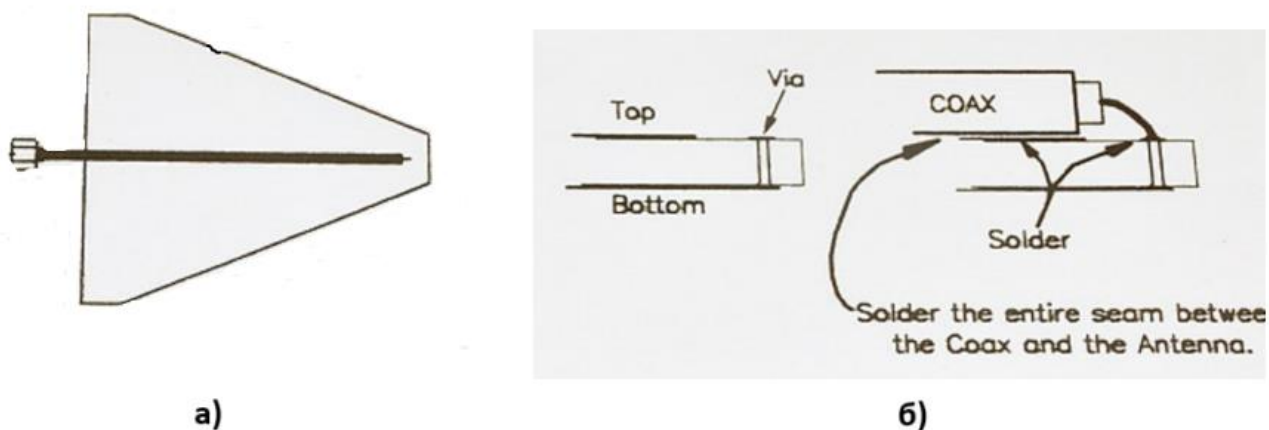


Рисунок 1.3 – Розміщення коаксіального кабелю уздовж антени (а), з'єднання центральної смужки антени з живленням (б)

Живлення антени може бути реалізоване за допомогою коаксіального кабелю, як показано на рис. 1.3а. У цій конфігурації використовується мідний напівжорсткий коаксіальний кабель, який безпосередньо припаяний до точки живлення логіперіодичної дипольної антени, а інший його кінець оснащений роз'ємом SMA. З'єднання з несучим полотном антени виконується шляхом пайки зовнішнього провідника коаксіального кабелю до однієї з ліній живлення, тоді як внутрішній провідник припаяний через діелектрик до іншої лінії живлення, як це показано на рис. 1.3б.

Ця побудова фактично складається з двох фідерних ліній, розташованих на протилежних сторонах друкованої плати, які забезпечують фазовий зсув у 180 градусів між сигналами. Однак подібна реалізація має певні недоліки. Зокрема, розташування коаксіального кабелю вздовж лінії живлення може значно зменшувати смугу пропускання антени [4].

Одним із підходів до вирішення проблеми живлення антени є розташування коаксіального кабелю, безпосередньо припаяного до передньої частини антени, як показано на рис. 1.4. Таке розміщення кабелю дозволяє значно розширити смугу пропускання антени, зменшуючи S_{11} в робочому діапазоні частот порівняно з іншими методами [5]. Однак, незважаючи на покращення смуги пропускання, дана реалізація має певні недоліки. Зокрема, у певних точках частотного діапазону можуть виникати незначні коливання коефіцієнта підсилення. Крім того, через переднє розміщення живлення можливі суттєві зміни в діаграмі спрямованості.

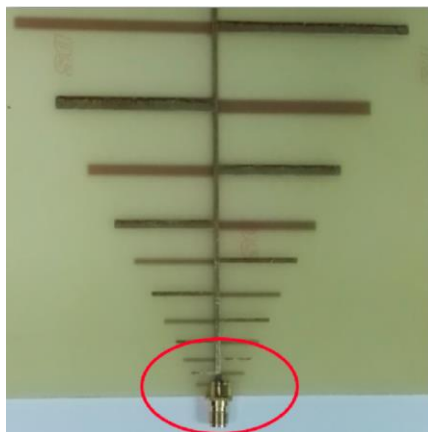


Рисунок 1.4 – Вигляд підключення живлення спереду

Окрім цього, використання даного типу живлення в друкованих структурах має ряд технологічних складнощів. Зокрема, його реалізація вимагає додаткових зусиль для забезпечення належного узгодження імпедансу. Моделювання такого каналу ускладнюється необхідністю свердління отворів у підкладці для прокладання кабелю, а також через те, що роз'єм виступає над поверхнею, що робить конструкцію менш плоскою, особливо у випадку використання товстих підкладок.

Живлення через мікросмужкову лінію до двосторонньої паралельної стрічкової лінії передбачає використання підсекційної конічної живильної лінії замість стандартної конічної мікросмужкової лінії та живлення антени з тильної частини, а не з фронтальної (перед антени). Такий підхід сприяє підвищенню рівня інтеграції антени з більшістю радіочастотних схем. На рис. 1.5 представлено планарний дизайн живлення через задню частину антени, де вона з'єднується через конічну мікросмужкову лінію із двосторонньою паралельною стрічковою лінією [5,6].

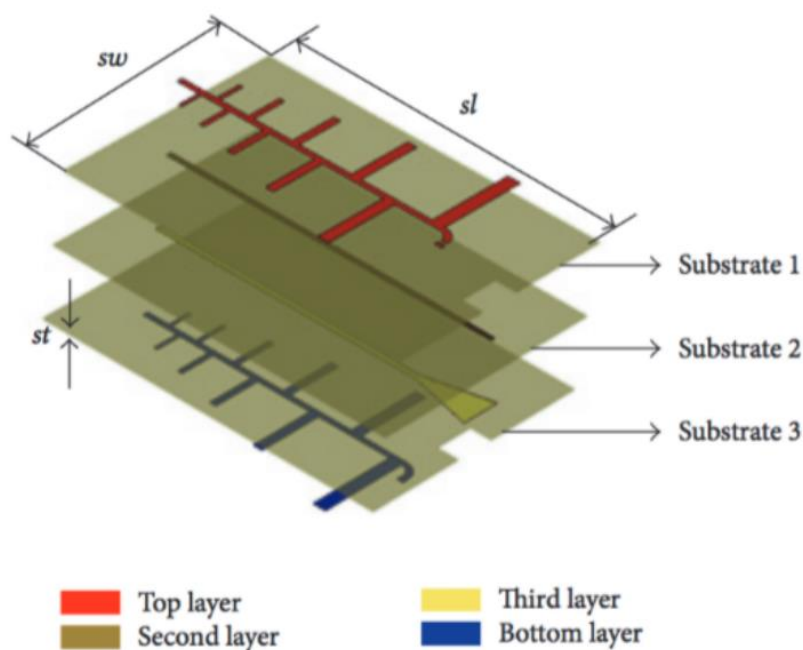


Рисунок 1.5 – Вигляд живлення при використанні чотирьох шарової плати

Окрім цього, конічна центральна мікросмужкова лінія є простішою у виготовленні порівняно з іншими методами живлення. Вона також полегшує підключення

антени до зовнішніх роз'ємів SMA та радіочастотних модулів. Проте для реалізації цієї технології потрібна чотиришарова друкована плата замість двошарової, яка використовується в стандартних конструкціях. У цій конфігурації дипольні елементи ЛПВА розташовуються на верхньому та нижньому шарах, тоді як лінії передачі друкуються на другому та третьому шарах [5]. Другий шар з'єднується безпосередньо з роз'ємом SMA для забезпечення узгодження з джерелом сигналу, а третій шар - із вихідним роз'ємом SMA.

Альтернативний метод живлення логіперіодичної дипольної антени передбачає використання двох коаксіальних кабелів, які виконують роль нескінченного несучого полотна. Другий коаксіальний кабель, підключений до входу антени, дублює функції першого та сприяє стабілізації фазового центру антени, а також покращує її діаграму спрямованості [7].

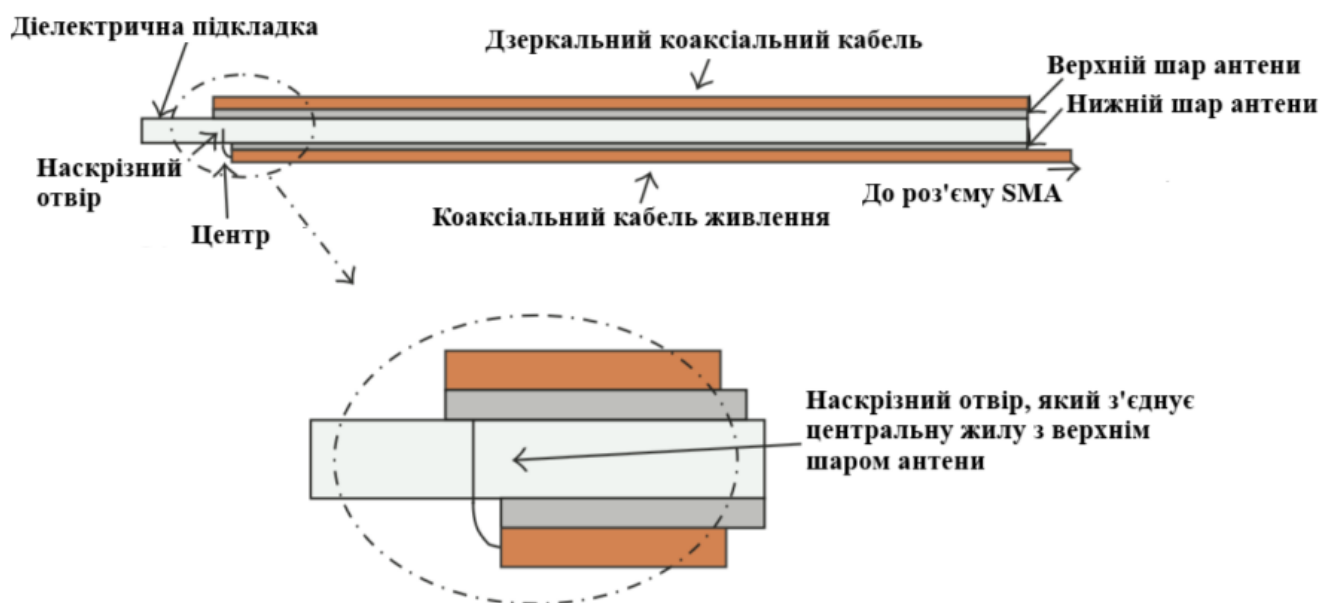


Рисунок 1.6 – Вигляд живлення антени з двома коаксіальними кабелями

Однак цей підхід має низку технологічних складнощів. Зокрема, для його реалізації потрібне використання двох коаксіальних кабелів, що значно ускладнює конструкцію. Процес передбачає пайку як живильного, так і дзеркального коаксіальних кабелів безпосередньо до антени, що є технічно складним завданням. Найменші похибки під час монтажу можуть призвести до порушення узгодження антени, що, у свою чергу, негативно вплине на її характеристики.

Ці труднощі ще більше загострюються у випадку антен, розроблених для роботи у Ku-діапазоні частот, оскільки такі антени мають дуже компактні розміри, що робить процес виготовлення ще більш складним і чутливим до точності виконання.

1.2 Кінець лінії живлення в логоперіодичній антені на діелектричній підкладці

Розрізняють три основні варіанти закінчення центральної смужки антени: з розімкненим шлейфом (рис. 1.6а), із шлейфом короткого замикання (рис. 1.6б), а також із кінцем без шлейфа (рис. 1.6в).

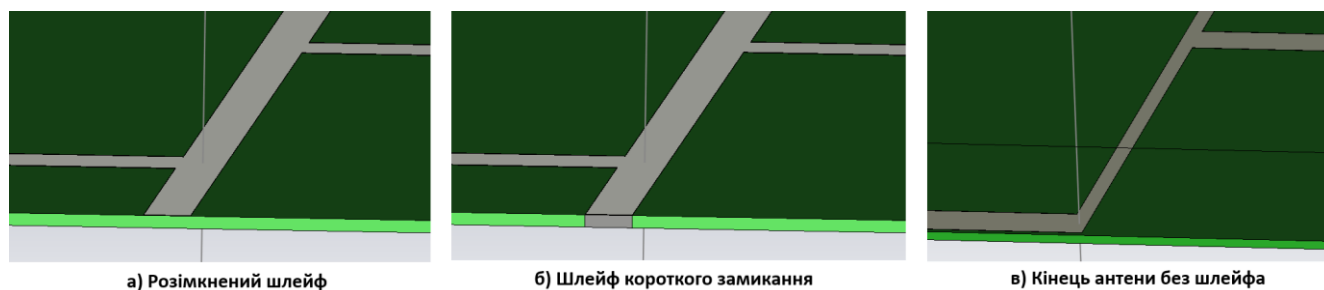


Рисунок 1.6 – Вигляд кінця лінії ЛПВА на РСВ

Ділянка відбиття антени може бути замінена навантаженням у її кінці, причому сегмент лінії довжиною $\lambda_{\text{max}}/8$ сприяє ефективному відбиттю всієї падаючої потужності, підвищуючи загальну ефективність антени у випадках рис. 1.6 а, б. Однак оптимальним рішенням для реалізації навантаження є використання завершення без шлейфа [5], яке дозволяє зменшити загальну довжину антени, забезпечуючи при цьому достатній запас пропускної здатності на робочих частотах.

1.3 Форма підкладки логоперіодичної антени

Логоперіодична дипольна антена характеризується дипольними елементами різних розмірів та відстаней між ними. Однією з популярних конструкцій антени є трапецієподібна форма. Такий дизайн дає змогу зменшити загальний розмір антени.

На рис 1.7 чорними стрілками позначено відстань між дипольними смужками та краєм діелектрика, а жовтим кольором виділено контур трапецієподібного

діелектрика. Цей конструктивний підхід змінює поведінку електромагнітних полів у діелектрику, що безпосередньо впливає на характеристики антени, зокрема її S_{11} параметри.

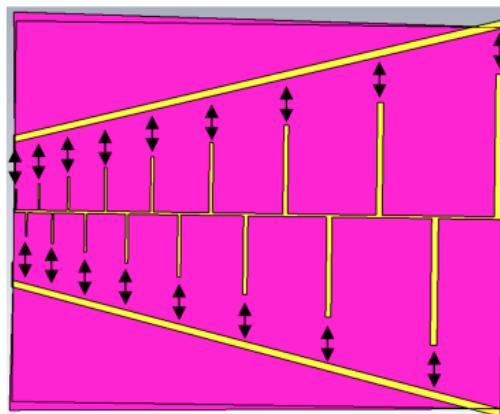


Рисунок 1.7 – Вигляд діелектрика прямокутної та трапецієподібної форми

Різниця в S_{11} параметрах між трапецієподібною та прямокутною формою зазвичай обумовлена розподілом полів у діелектрику [5]. Частина електричної енергії, яка створюється змінним електричним полем, поглинається діелектричним матеріалом. Це призводить до зростання втрат, особливо на високих частотах, де діелектричні втрати стають більш вираженими.

Трапецієподібна форма може запропонувати кілька переваг. По-перше, така геометрія сприяє кращому узгодженню імпедансу антени. По-друге, зменшення ваги і розміру антени робить її більш зручною для використання в мобільних та портативних пристроях.

1.4 Зменшення розмірів логоперіодичної антени на діелектричній підкладці

Завдяки своїй здатності працювати у широкому діапазоні частот і забезпечувати високу спрямованість випромінювання, ЛПВА є перспективним вибором для різних застосувань, таких як системи зв'язку та РР.

Однак для багатьох практичних приладів, особливо у портативних або компактних пристроях, розмір антени є критичним параметром. Зокрема, на низьких частотах розмір деяких дипольних елементів ЛПВА стає занадто великим, що створює обмеження для використання таких антен у компактних системах.

Проектування ЛПВА на діелектричній підкладці є ефективним підходом до вирішення цієї проблеми. Такий варіант дозволяє значно зменшити фізичні розміри антени завдяки мініатюризації, яку забезпечує діелектрична основа. Крім того, виготовлення таких антен є більш економічно вигідним завдяки використанню сучасних технологій друкованих плат.

На сьогоднішній день існує декілька варіантів мініатюризації даних антен. Реалізуються вони додаванням на кінець диполя елементів різних форм таких як Т-подібні, подвійні Т-подібні, капелюшні (рис. 1.8), дугоподібні, С-подібні (рис. 1.9) або будь-які інші фігурні елементи [8].

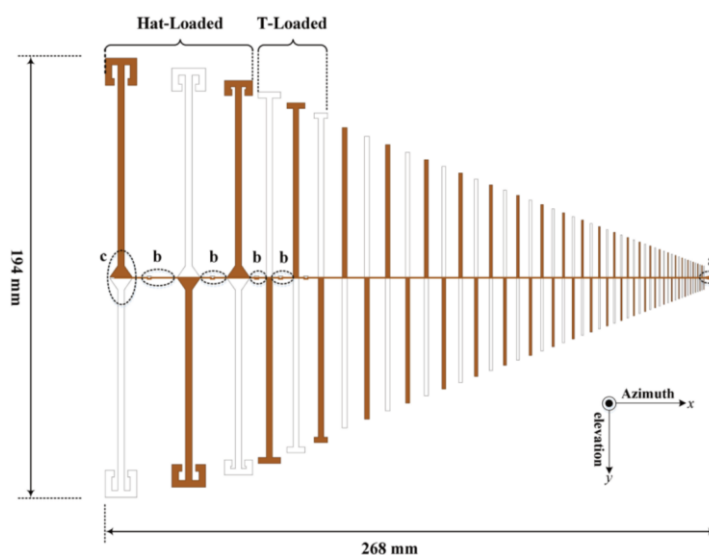


Рисунок 1.8 – Конструкція ЛПВА з реалізованими методами навантаження у вигляді капелюха та Т-подібної форми

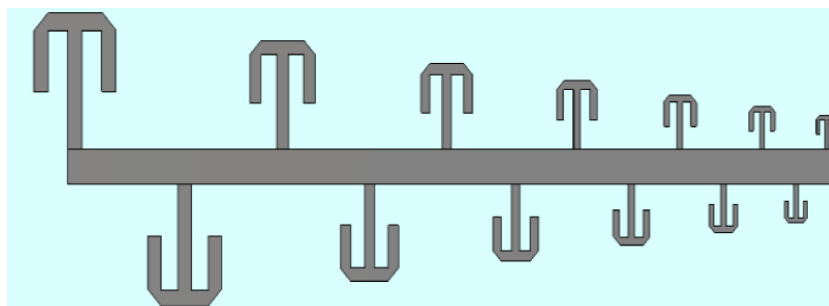


Рисунок 1.9 – Конструкція ЛПВА з реалізованою С-подібною формою

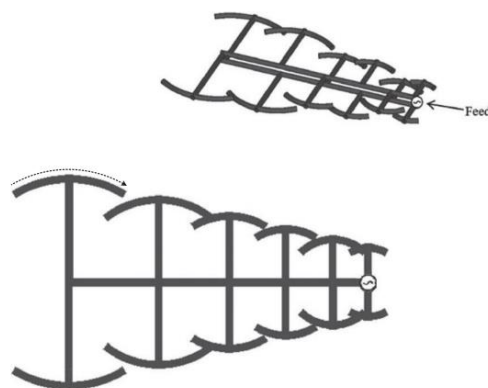


Рисунок 1.10 – Конструкція ЛПВА з Т-подібним навантаженням по дузі окружності

Цікавий підхід було запропоновано в [9], де замість введення реактивного навантаження була введена концепція нерівномірної лінії передачі з метою мініатюризації звичайного ЛПВА на РСВ шляхом модуляції профілю імпедансу прямих дипольних елементів до усіченого ряду Фур'є з використанням оптимізованих коефіцієнтів Фур'є (рис. 1.11 а). Також у [10] пропонується унікальний і корисний підхід, який можна використати для зменшення осьового розміру ЛПВА шляхом зменшення довжини несучого полотна використовуючи двосмугові диполі (рис. 1.11 б). Таким чином зменшується кількість диполів, необхідних для покриття широкого робочого діапазону.

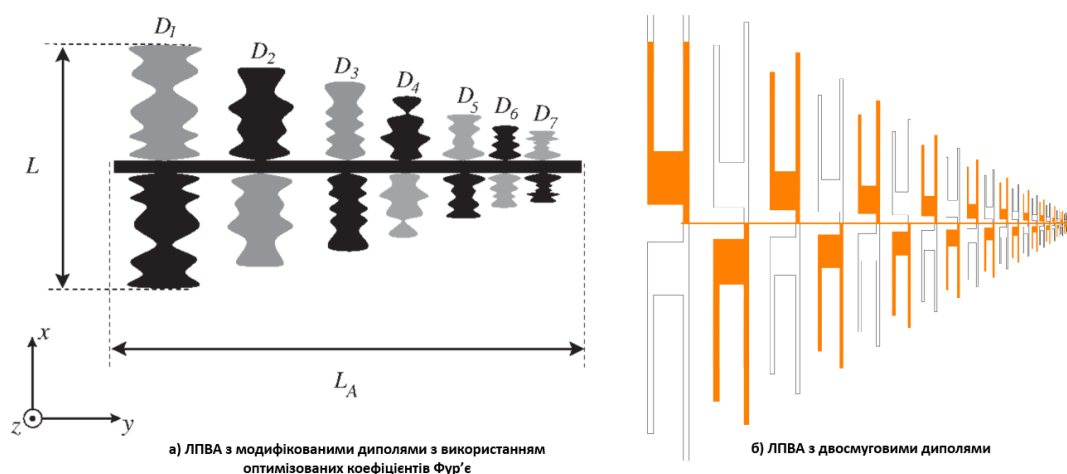


Рисунок 1.11 – Конструкція ЛПВА з модифікованими диполями з використанням оптимізованих коефіцієнтів Фур'є та з двосмуговими диполями

Порівнюючи варіанти мініатюризації, слід зазначити, що максимального зменшення розміру можна досягти, застосовуючи диполі із закінченням у вигляді С-подібної форми (рис 1.9) [8].

Також у дослідженні [11] представлено новий підхід до мініатюризації традиційної ЛПВА за допомогою двоступеневих діелектричних матеріалів із застосуванням техніки діелектричного навантаження. Запропонована конструкція використовує синусоїдальні диполі замість прямих, що показано на рис 1.11 [8]. Синусоїдальні диполі обрано завдяки їхній здатності забезпечувати довші шляхи струму та резонанс на нижчих частотах порівняно з прямими диполями. Особливістю цієї конструкції є наявність 2-міліметрового повітряного шару (при загальній товщині підкладки 3 мм), частково інтегрованого в підкладку. Додатково, для зменшення розміру антени, на кінцях перших двох синусоїдальних диполів розміщено чотири паразитні елементи, які реалізують техніку ємнісного навантаження.

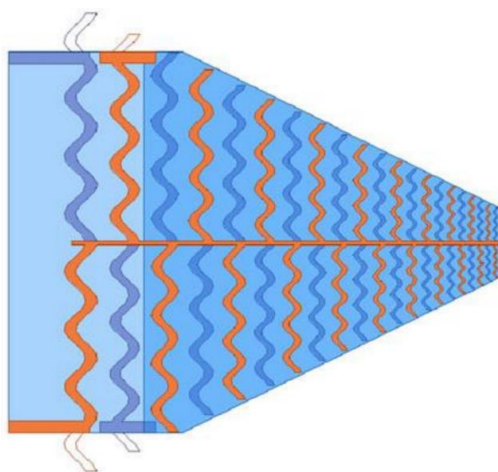


Рисунок 1.12 – Конструкція ЛПВА з методом діелектричного навантаження

Обмеженням методів рис. 1.8 – 1.11 є те, що стає важко досягти максимальної смуги пропускання, а також стабільного коефіцієнта спрямованості логіперіодичної антени.

1.5 Виготовлення логіперіодичної антени методом фотолітографії

Існує декілька методів виготовлення друкованих плат, а саме: фотолітографія, механічна обробка (фрезерування), електрохімічне нанесення,

шовкографія (трафаретний друк), 3D-друк друкованих плат та інші. Процес виготовлення ЛПВА за допомогою техніки фотолітографії є найпоширенішим методом. Основні етапи виготовлення друкованої плати даним методом включають:

1. Процес виготовлення починається зі створення маски схеми, яка є двовимірним зображенням плати. Маска використовується для друку фотоплівки реального розміру, яка містить усі шари друкованої плати.

2. Діелектричну основу формують для забезпечення жорсткості і міцності плати. Її поверхня повинна бути ідеально знежиреною. Це досягається шляхом очищення від оксидів і домішок.

3. На підготовлену поверхню наноситься шар фоторезисту у контрольованих умовах із приглушеним освітленням та у приміщенні без пилу. Після висихання фоторезисту плату піддають впливу ультрафіолетового світла через прозору плівку маски [12], яка закриває області, що не повинні піддаватися випромінюванню. Ультрафіолетове світло зміцнює фоторезист на провідних ділянках, тоді як інші області залишаються незахищеними.



Рисунок 1.13 – Освітлення плати ультрафіолетовим світлом на фабриці JLCPCB

4. Далі виконується хімічне травлення, яке використовується для видалення незахищеної міді, залишаючи на поверхні лише провідні ділянки плати. Травлення виконується у розчинах на основі соляної кислоти, перекису водню або лужних складів. Після цього залишки резисту змиваються, залишаючи готову структуру схеми.

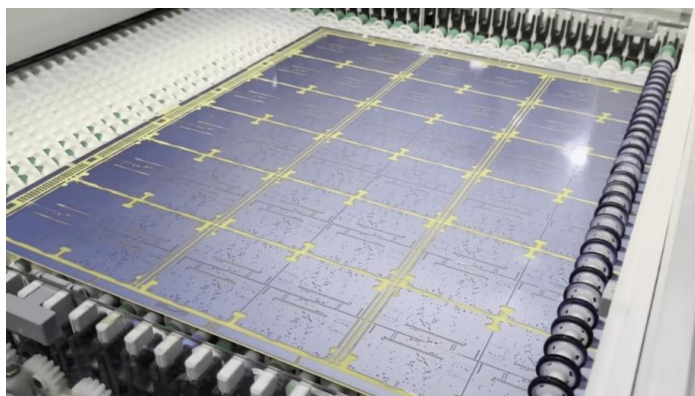


Рисунок 1.14 – Вигляд плат перед хімічним травленням на фабриці JLCPCB

5. Провідники знову покриваються тонким шаром міді методом гальванічного осадження. Потім на мідні ділянки наноситься захисний шар олова або інший матеріал для захисту від окислення та поліпшення з'єднання під час пайки [12]. Серед найбільш поширених покриттів: іммерсійне срібло, тверде золото, безелектричне нікелеве золото.

6. На плату наноситься шар паяльної маски для захисту провідників від коротких замикань і запобігання утворенню паяних містків.

7. Завершальним етапом виготовлення плат є тестування друкованих плат. Це невід'ємний етап виробничого процесу, який перевіряє функціональність плат та їх відповідність початковим технічним вимогам. Для перевірки якості та працездатності друкованих плат застосовуються різноманітні методи тестування. Перед тим як вважати плату завершеною, технік проводить електричні випробування, щоб підтвердити її коректну роботу відповідно до вимог початкового проєкту.



Рисунок 1.15 – Вигляд процесу тестування друкованих плат

Висновки до розділу 1

У цьому розділі проведено аналіз конструктивних особливостей, методів живлення, мініатюризації логоперіодичних антен (ЛПВА), що виготовляються на діелектричній підкладці.

Виявлено, що правильний вибір способу живлення впливає на ширину смуги пропускання та стабільність діаграми спрямованості, але кожен із методів має свої обмеження та складнощі у реалізації.

Також детально описано технологію виготовлення ЛПВА методом фотолітографії, який є найбільш поширеним завдяки своїй високій точності та економічній доцільності.

Отримані результати досліджень і розробок дозволяють зробити висновок, що ЛПВА на діелектричній підкладці є перспективними для застосування в системах зв'язку, радарних системах та інших галузях. Оптимізація конструкції та виробничих процесів сприяє підвищенню ефективності та розширенню можливостей таких антен.

2. ОГЛЯД АНАЛОГІВ

2.1 Подвійно поляризована широкосмугова логоперіодична антена XSLP 9142

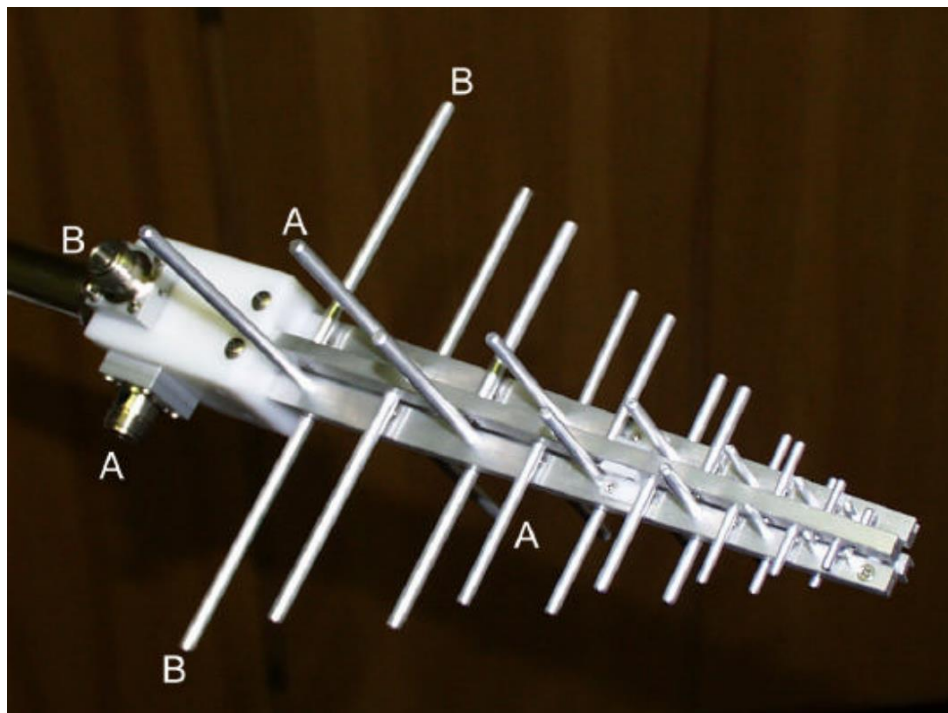


Рисунок 2.1 – Вигляд антени XSLP 9142

Дана антена (рис. 2.1) має дві ортогональні площини поляризації, до яких можна отримати доступ окремо через два роз'єми. Виробник рекомендує використовувати роз'єм "В" для горизонтальної поляризації [15]. Антена може застосовуватися як передавальна або приймальна у системах радіомоніторингу та зв'язку, радіолокації та для тестів інших антен.

Характеристики

- Діапазон частот: 0.8 - 3 ГГц.
- Коефіцієнт підсилення: 4 - 7 дБі.
- Хвильовий опір: 50 Ом.
- Рівень задньої пелюстки: -15 дБ.
- КСХН: 1.5 - 3.
- Максимальна вхідна потужність: 50/100 w.

- Розміри: 200 x 474 x 200 мм
- Вага: 0.8 кг

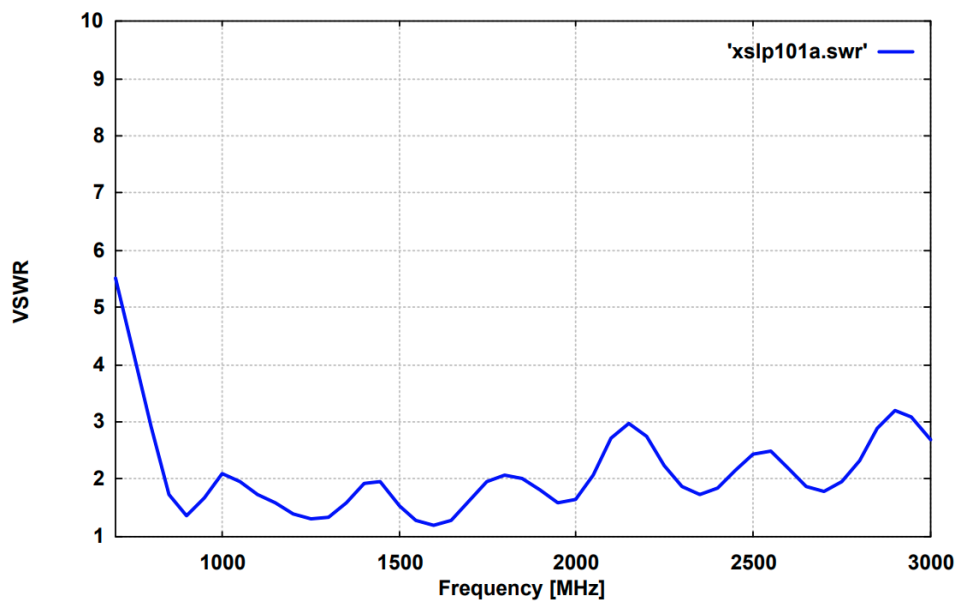


Рисунок 2.2 – КСХН роз'єму "А"

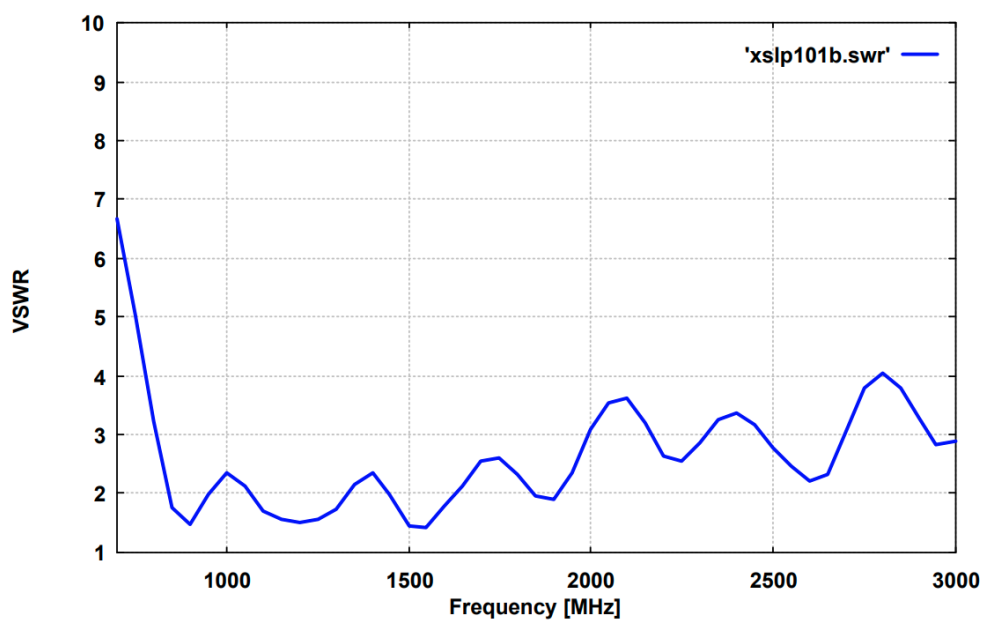


Рисунок 2.3 – КСХН роз'єму "В"

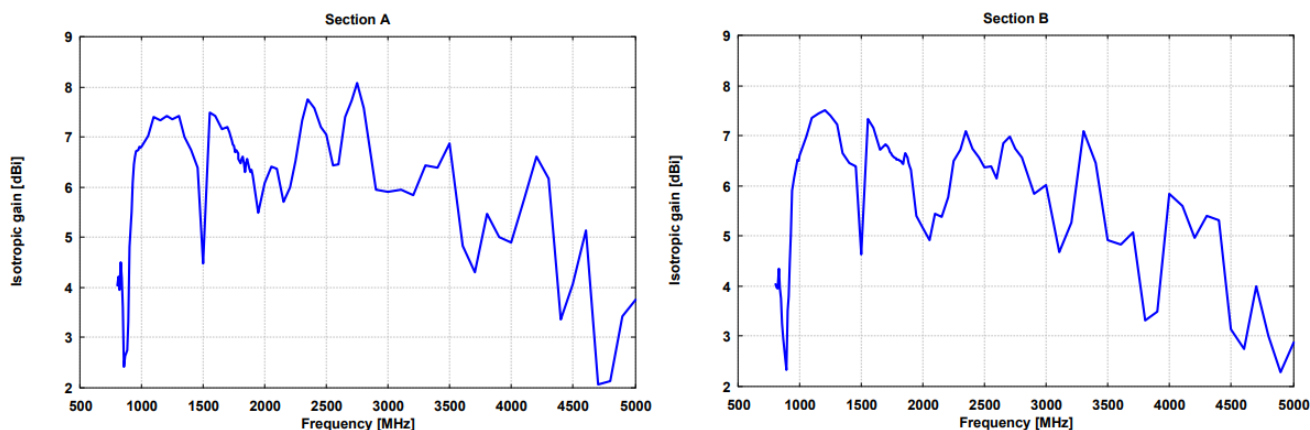


Рисунок 2.4 – Підсилення антени відносно ізотропного випромінювача

2.2 Подвійно поляризована широкосмугова логоперіодична антена

XSLP 9143

Лінійна подвійно поляризована логоперіодична широкосмугова антена (рис. 2.5) для програм прийому і передачі сигналів також оснащена двома роз'ємами для забезпечення належної роботи [16]. Вона може використовуватися як передавальна або приймальна антена в системах радіомоніторингу, зв'язку, радіолокації, а також для тестування інших антен. Варто зазначити, що дана антена була розроблена на основі звичайної логоперіодичної антени USLP 9143 з діапазоном частот 0.3 - 8 ГГц.

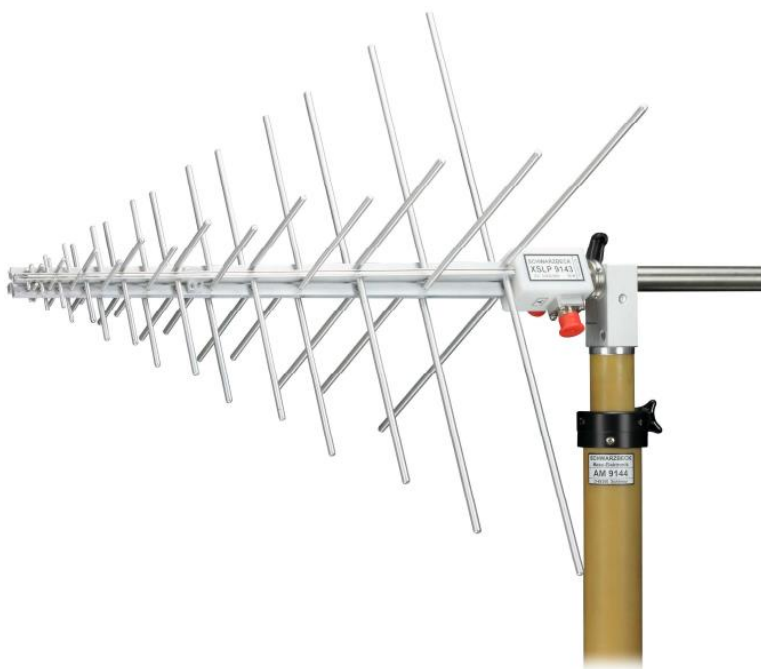


Рисунок 2.5 – Вигляд антени XSLP 9143

Характеристики

- Діапазон частот: 0.3 - 3 ГГц.
- Коефіцієнт підсилення: 4 - 7 дБі.
- Хвильовий опір: 50 Ом.
- Рівень задньої пелюстки: -15 – - 25 дБ.
- КСХН: 1.5 - 3.
- Максимальна вхідна потужність: 50/100 w.
- Розміри: 540 x 695 x 540 мм.
- Вага: 1.2 кг.

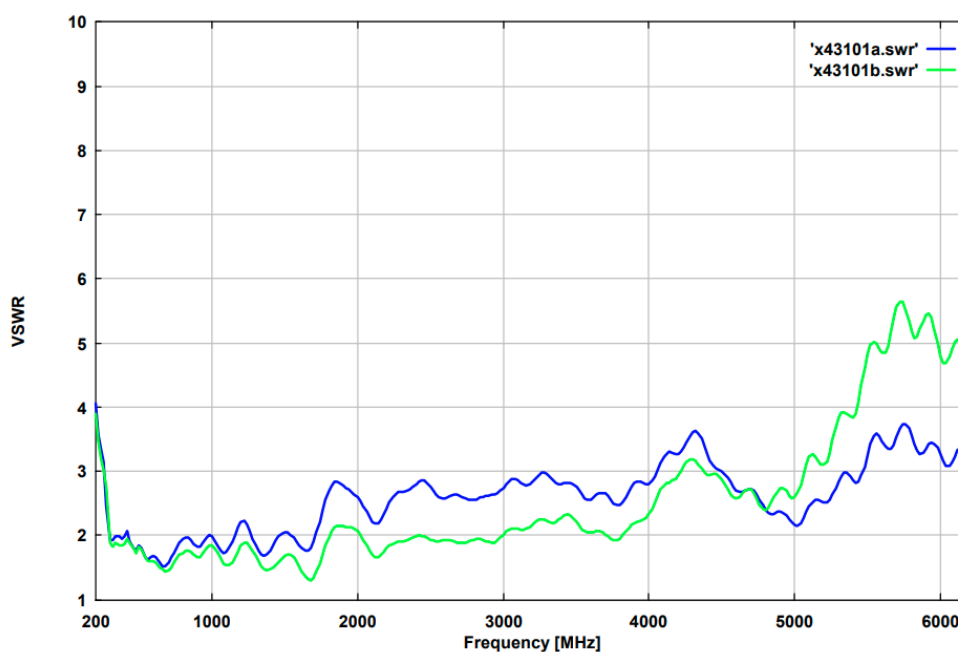


Рисунок 2.6 – КСХН роз’єму “А” та “В”

2.3 Подвійно поляризована широкосмугова логоперіодична антена LPDA-A0157

Спрямована логоперіодична антена з подвійною поляризацією (рис. 2.7). Розроблена як частина стаціонарної установки, кріплення на щоглі, ідеально використовується в поєднанні з ізоляційною щоглою [17], що робить її гарним варіантом для передавання та приймання сигналів в мережах зв’язку.



Рисунок 2.7 – Вигляд антени LPDA-A0157

Характеристики

- Діапазон частот: 100 - 500 МГц.
- Коефіцієнт підсилення: 6 дБі.
- Хвильовий опір: 50 Ом.
- Рівень задньої пелюстки: -20 дБ.
- КСХН: 1 - 2.5.
- Максимальна вхідна потужність: 100 w.
- Розміри: 1700 x 1700 x 2100 мм.
- Вага: 16 кг.

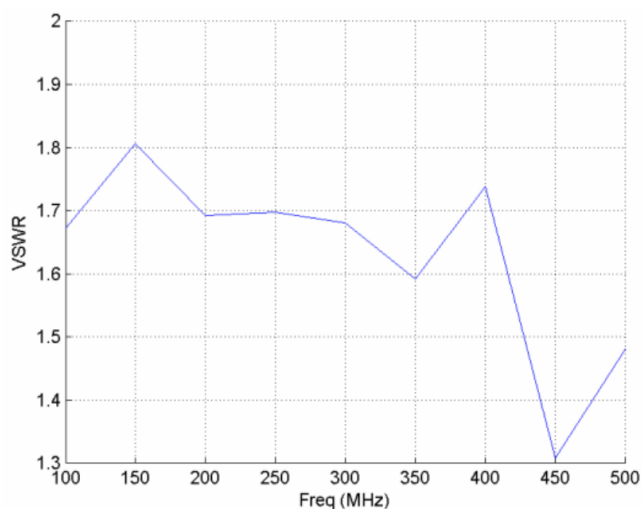


Рисунок 2.8 – КСХН роз'ємів ЛПВА-A0157

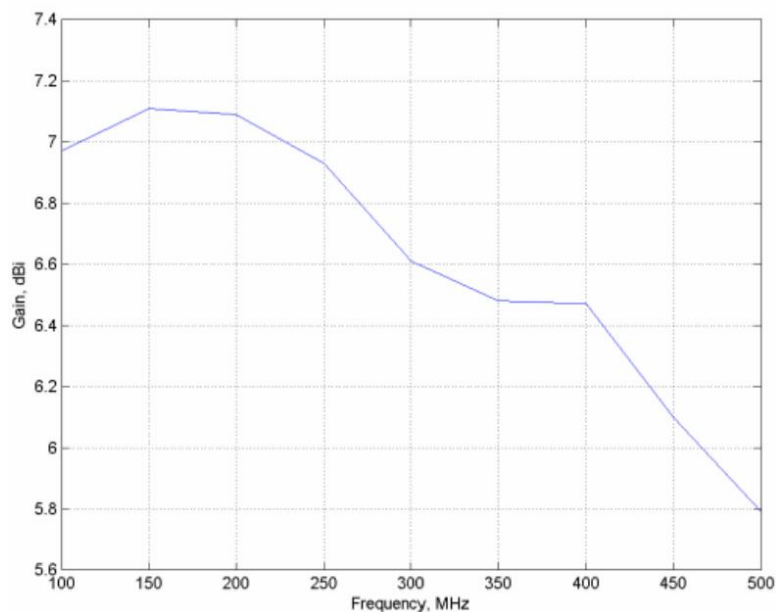


Рисунок 2.9 – Підсилення антени для кожного роз'єму

Висновки до розділу 2

Порівняння аналогів є необхідним етапом у процесі розробки антени, оскільки дозволяє оцінити вже наявні технічні рішення та їхні характеристики. Аналіз аналогів допоміг визначити параметри, такі як частотний діапазон (найбільший 0.3 – 3 ГГц), коефіцієнт підсилення (4 – 7 дБі) та конструктивні особливості, що забезпечують надійну роботу антен. Розуміння переваг та недоліків аналогічних антен також допомагає уникнути потенційних проблем у проектуванні.

Необхідно зазначити, що двополяризаційна логоперіодична антена на діелектричній підкладці не є поширеною в широкому використанні, що підтверджує актуальність її розробки.

3. РОЗРОБКА ШИРОКОСМУГОВОЇ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ АНТЕНИ

3.1 Розрахунок логоперіодичної дипольної антени

У багатьох застосуваннях антена повинна працювати в широкому діапазоні частот. Логоперіодична антена може бути однією з широкосмугових антен. Основна ідея побудови ЛПВА полягає у використанні елементів (диполів) різної довжини, які резонують на різних частотах в межах робочого діапазону. Напрямок випромінювання антени збігається з поздовжньою віссю і спрямований у бік вібратора з найменшою довжиною.

На першому етапі процедури проектування необхідно вибрати фундаментальні параметри конструкції антени – коефіцієнт відношення довжини наступного вібратора до довжини попереднього вібратора (або відношення відстаней між вібраторами) τ [13] та параметр довжини антени σ , а також довжину найдовшого вібратора. Похідним від вказаних параметрів є та кут між віссю антени і лінією, що проходить через кінці вібраторів α :

$$\tau = \frac{l_n}{l_{n-1}} = \frac{d_n}{d_{n-1}}, \quad (3.1)$$

$$\sigma = \frac{d_n}{2l_n}, \quad (3.2)$$

$$\tan(\alpha) = \frac{1 - \tau}{4\sigma}, \quad (3.3)$$

Для виконання технічного завдання на розробку антени з робочим діапазоном частот 700 – 6000 МГц було вирішено дещо розширити використовуваний діапазон до 400 – 6000 МГц для забезпечення надійної роботи антени на частоті 700 МГц. При цьому також поставлена мета забезпечити мінімально можливу кількість диполів без суттєвого погіршення характеристик антени.

З рис. 3.1 знаходимо, що $\sigma_{\text{опт}} = 0.149$ при підсиленні близько 8.5 дБі, а $\alpha = 16.646^\circ$. Обрано $\tau = 0.823$, $\sigma = 0.148$.

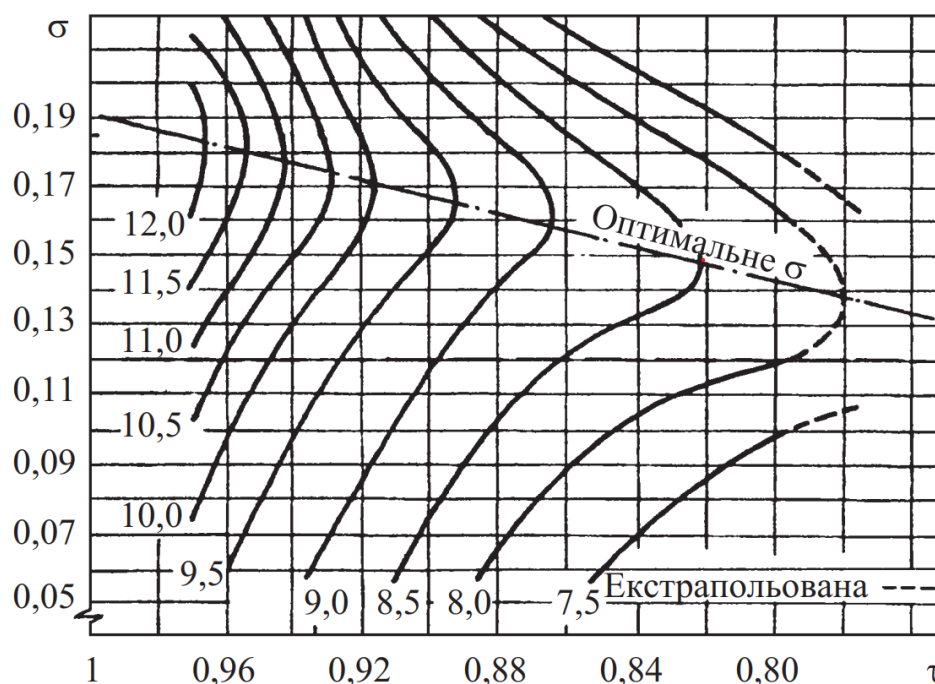


Рисунок 3.1 - Криві постійних значень коефіцієнта спрямованої дії

На основі заданих вихідних параметрів системи, таких як смуга пропускання і коефіцієнт підсилення, визначаються значення τ і σ . Після цього можна розрахувати найдовший і найкоротший елементи (диполі). Пропускна здатність активної області, V_{ar} може бути пов'язана з основними параметрами конструкції наступним рівнянням:

$$V_{ar} = 1.1 + 7.7(1 - \tau)^2 \text{ctg}(\alpha), \quad (3.4)$$

Отже, $V_{ar} = 1.912$, коефіцієнт перекриття по частоті даної антени має бути рівним 15. Але на практиці може виникати дещо більша смуга пропускання структури, V_s [13].

$$V_s = B \cdot V_{ar}, \quad (3.5)$$

Розрахувавши $V_s = 28.68$, розрахуємо отриману необхідну кількість вібраторів для побудови антени:

$$N = 1 + \frac{\log(B_s)}{\log\left(\frac{1}{\tau}\right)} = 18.229, \quad (3.6)$$

Для побудови ЛПВА потрібно 18 диполів. Таблиця 3.1 показує довжину i -го елемента, відстані між сусідніми елементами, розраховані за (3.7), (3.8), а також робочі частоти елементів.

$$l_i = l_{i-1}\tau, \quad (3.7)$$

$$d_i = d_{i-1}\tau, \quad (3.8)$$

Таблиця 3.1 – Розміри 18-ти елементного ЛПВА

Номер i -го елемента	Довжина i -го елемента, мм	Подвійна довжина i -го елемента, мм	Відстань між сусідніми елементами, мм	Розміщення елементів вздовж антени, мм	Робоча частота i -го елемента, МГц
1	187,5	375	-	-	400
2	154	308	111	111	487
3	127	254	91	202	591
4	104,5	209	75	277	718
5	86	172	62	339	872
6	70,5	141	51	390	1064
7	58	116	42	432	1293
8	48	96	34	466	1563
9	39,5	79	28	495	1899
10	32,5	65	23	518	2308
11	26,5	53	19	537	2830
12	22	44	16	553	3409
13	18	36	13	566	4167
14	15	30	11	577	5000
15	12,5	25	9	586	6000
16	10	20	7	593	7500
17	8,5	17	6	599	8824
18	7	14	5	604	10714,3

Для перегляду параметрів антени, було створено її модель (рис. 3.2) і проведено симуляцію характеристик. Висоту та ширину несучого полотна було обрано за 5 мм, відстань між бумами за 4 мм ззаду та 3 мм спереду, а також відстань до закоротки і її довжина 3 см, діаметр диполів – 2 мм, вхідний опір 50 Ом.



Рисунок 3.2 – Логоперіодична антена діапазоном частот 0.4 – 7 ГГц

Було промодельовано S_{11} параметри (рис 3.3) та діаграми спрямованості (рис.3.4 – 3.8) для п'яти частот – 400, 700 МГц; 1.5, 3 та 6 ГГц.

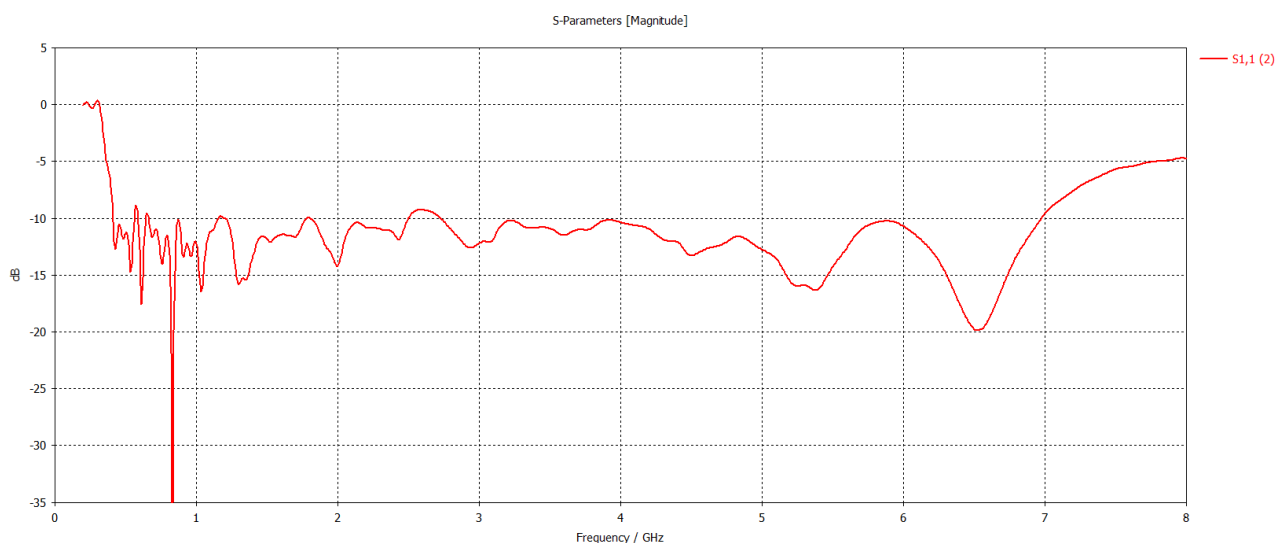


Рисунок 3.3 – Параметри S_{11}

З рис. 3.3 випливає, що робочий діапазон частот антени по узгодженню кращому за -10 дБ S_{11} становить від 0.4 до 7 ГГц.

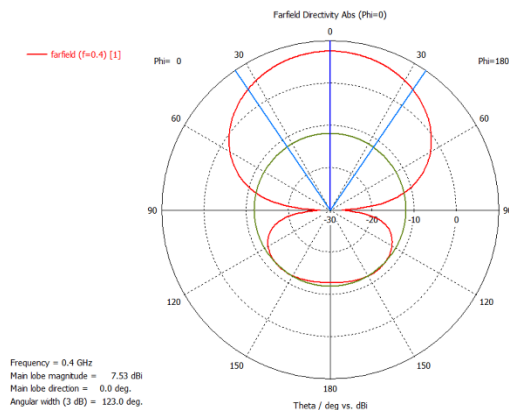
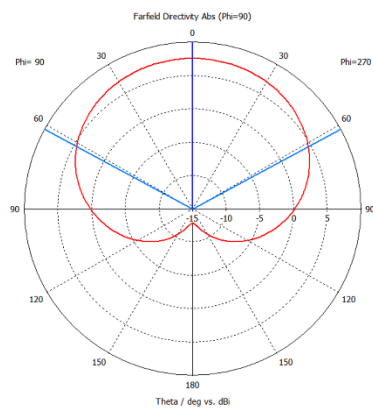


Рисунок 3.4 – ДС при $\phi = 90$ та $\phi = 0$ на частоті 400 МГц

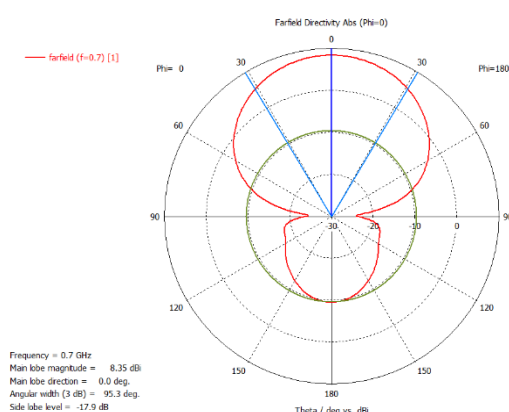
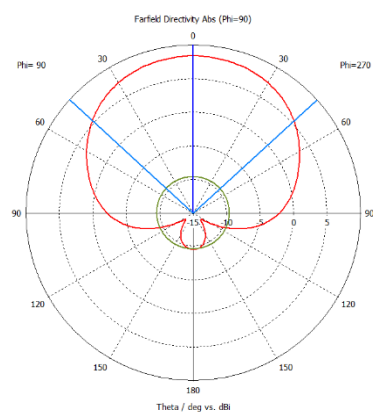


Рисунок 3.5 – ДС при $\phi = 90$ та $\phi = 0$ на частоті 700 МГц

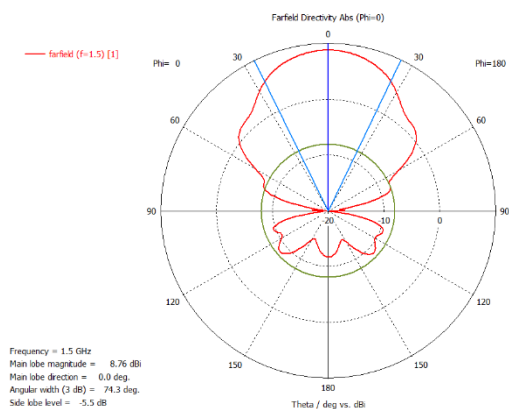
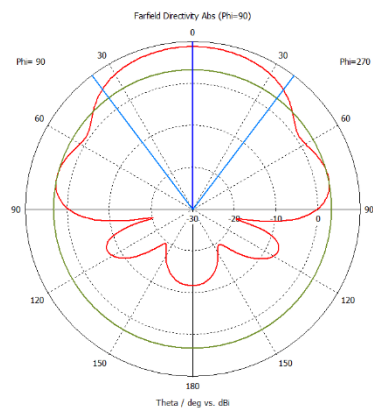


Рисунок 3.6 – ДС при $\phi = 90$ та $\phi = 0$ на частоті 1.5 ГГц

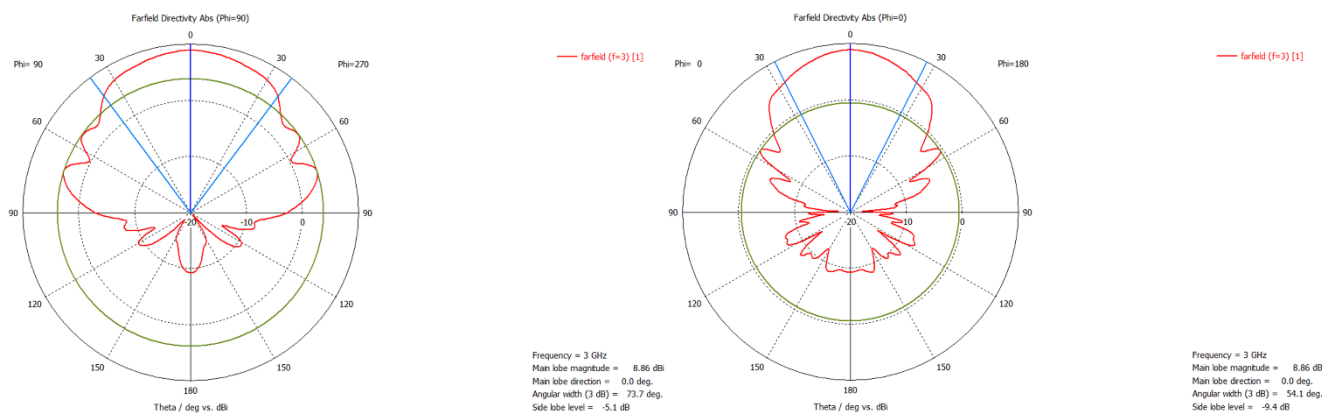


Рисунок 3.7 – ДС при $\varphi = 90$ та $\varphi = 0$ на частоті 3 ГГц

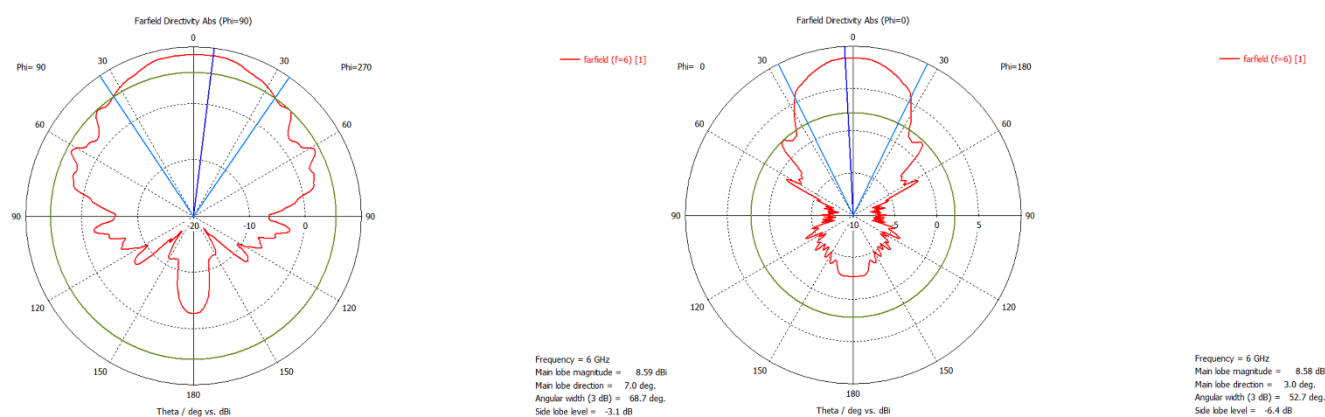


Рисунок 3.8 – ДС при $\varphi = 90$ та $\varphi = 0$ на частоті 6 ГГц

З даних діаграм видно, що по φ ширина головного пелюстка зменшується зі збільшенням частоти від 123 до 68.7 градусів в Н площині та 68.9 – 57.7 градусів в Е площині, а рівень бічних пелюстків варіюється від -19.5 до -3.1 дБ.

3.2 Електродинамічне моделювання логоперіодичної антени на друкованій платі

У сучасних бездротових системах зв'язку та військових комплексах радіорозвідки логоперіодичні дипольні антени на друкованих платах є популярним вибором завдяки своїм компактним розмірам та широкій смузі частот, що робить їх ефективними для різних застосувань – від радіомоніторингу до мобільного зв'язку.

Основні розміри елементів логоперіодичної антени на друкованій платі були взяті з класичної логоперіодичної дипольної антени, розглянутої в попередньому

підрозділі. За основу для побудови та оптимізації параметрів антени було обрано ширину несучого полотна (бума) 5 мм і ширину смужок (таблиця 3.2), які виконують роль диполів антени.

Таблиця 3.2 – Ширини смужок до оптимізації параметрів антени

Номер i-го елемента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ширина смужки i-го елемента	7	7	7	6	6	6	5	5	4	3	3	3	2	2	1,5	1,5	1,5	1,5

Матеріалом підкладки антени був обраний Rogers 4350B (друкована плата для високих частот зі склокомпозитним вуглеводневим та керамічним ламінатом), через її низькі втрати на високих частотах. Матеріал Rogers 4350B у порівнянні з FR-4 має значно менші втрати зі збільшенням частоти, що зображено на рис. 3.9. Можна приблизно побачити, що на частоті 6 ГГц втрати у матеріалі RO4350B на 0.5 дБ менші, ніж у FR4, хоча це залежить від конструкції антени [14]

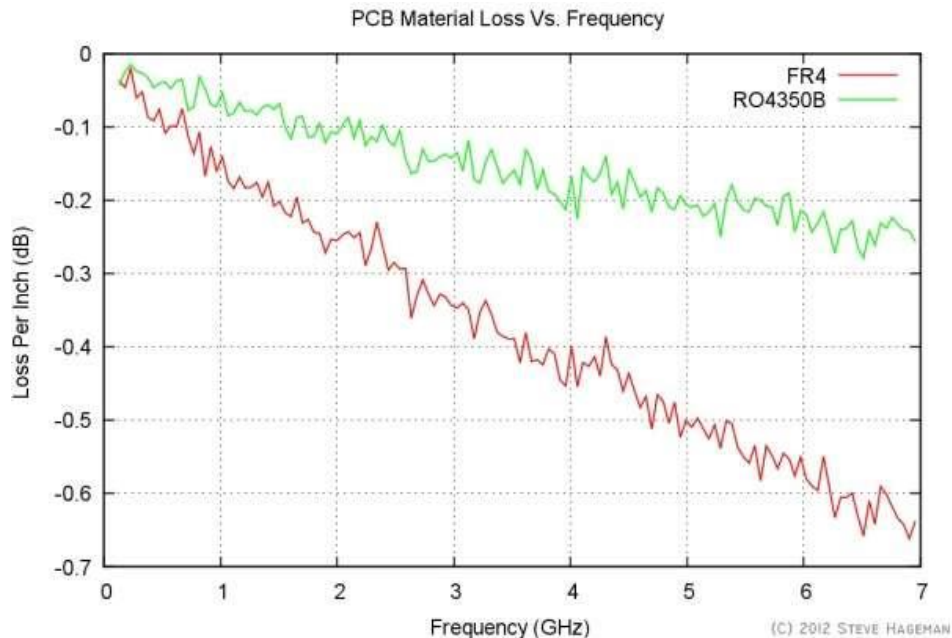


Рисунок 3.9 – Порівняння втрат у матеріалах FR4 та RO4350B

Після моделювання антени встановлено, що максимальний розмір друкованої плати для виготовлення становить 414x655 мм, а RO4350B можна використовувати стандартної висоти – 1.524 мм.

Для досягнення параметрів $S_{11} < 10$ дБ було виконано електродинамічне моделювання для оптимізації характеристик антени (смуги пропускання, КСХН, узгодження з джерелом сигналу). З точки зору поляризації, антена має лінійну поляризацію, що є типовою для антен з дипольними елементами. Крім того, антена оптимізована під вхідний опір 50 Ом і коефіцієнт відбиття нижче -10 дБ у межах смуги пропускання.

На рис. 3.10 видно, що антена має конструкцію у вигляді трапеції з розмірами 617x400 мм, включаючи запас 1 мм між смужками та межею плати для запобігання фізичних пошкоджень металу при експлуатації виробу, а також кінець без шлефа.

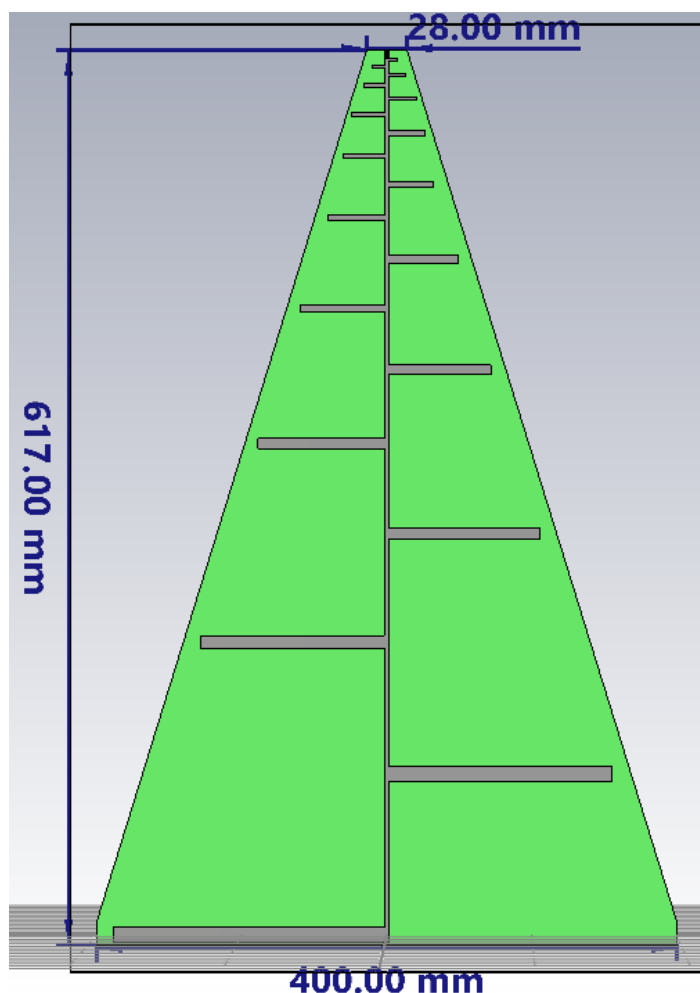


Рисунок 3.10 – Вигляд антени зверху

Після оптимізації вийшло, що ширина несучого полотна повинна бути близько 3 мм. Довжину несучого полотна було продовжено на 4 мм відносно найменшого диполя для надійного закріплення кабеля живлення (рис. 3.11).

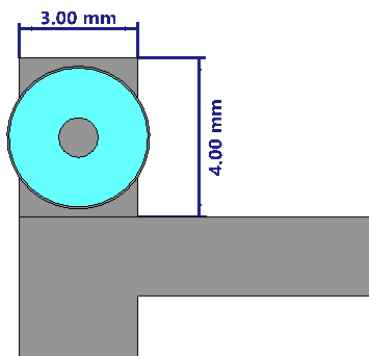


Рисунок 3.11 – Вигляд зверху продовження несучого полотна

У таблиці 2.3 наведено довжину та ширину i -го елемента, відстані між сусідніми елементами, а також робочі частоти елементів. Варто зазначити, що довжини диполів (з 10-го включно) були оптимізовані для досягнення параметра $S_{11} < 10$ дБ.

Таблиця 3.3 – Розміри 18-ти елементної ЛПВА на друкованій платі Rogers 4350B

Номер i -го елемента	Довжина i -го елемента, мм	Робоча частота i -го елемента, МГц	Відстань між сусідніми елементами, мм	Розміщення елементів вздовж антени, мм	Ширина смужки i -го елемента
1	187,5	400	-	-	11
2	154	487	111	111	10
3	127	591	91	202	9
4	104,5	718	75	277	8
5	86	872	62	339	7
6	70,5	1064	51	390	6
7	58	1293	42	432	5
8	48	1563	34	466	5
9	39,5	1899	28	495	4
10	31	2419,3	23	518	4
11	29	2586,2	19	537	3
12	25	3000	16	553	3
13	23	3260,8	13	566	3
14	19,5	3846,1	11	577	2
15	14,3	5244,7	9	586	2
16	11,3	6637,1	7	593	2

17	8,3	9036,1	6	599	2
18	6	12500	5	604	2

На рис. 3.12 можна розглянути параметри S_{11} , а також діаграми спрямованості антени на частотах – 400, 700 МГц; 1.5, 3 та 6 ГГц. З рис. 3.12 випливає, що реальний робочий діапазон частот антени від 0.35 до 6.4 ГГц, за рівнем $S_{11} < -9$ дБ від 0.35 до 7.2 ГГц.

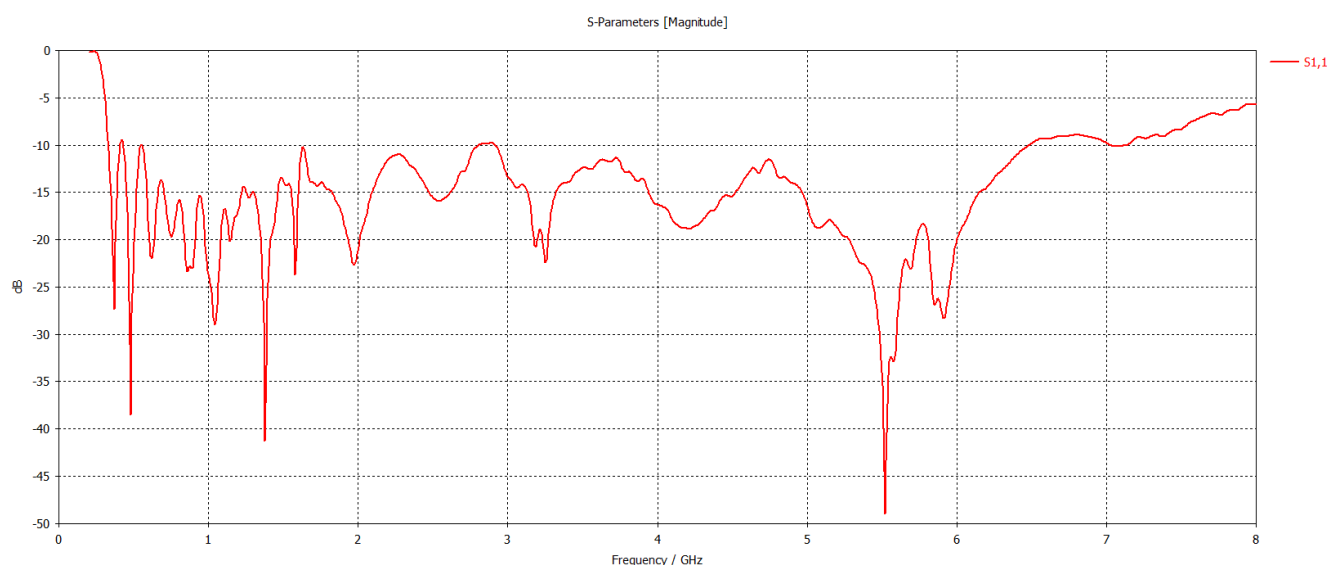


Рисунок 3.12 – Параметри S_{11} антени після оптимізації

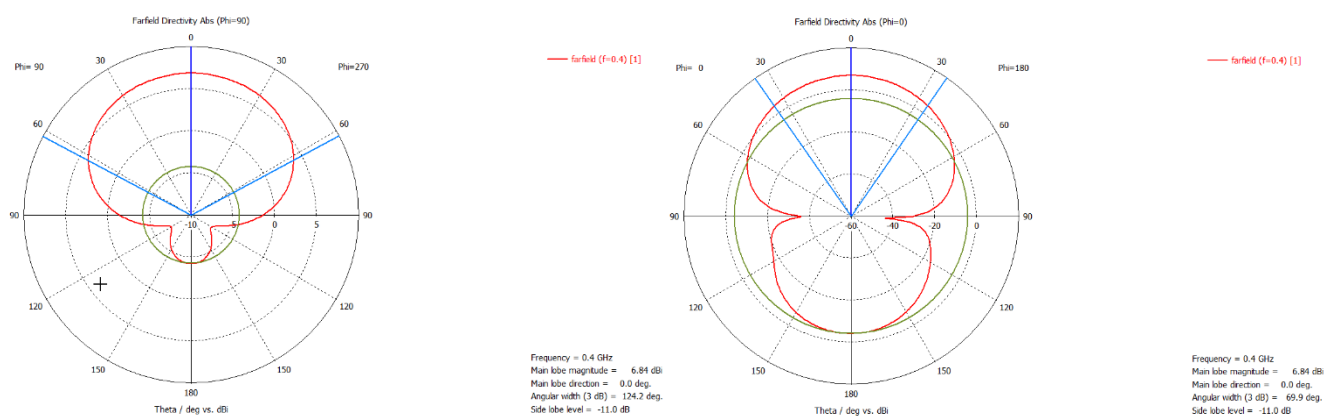


Рисунок 3.13 – ДС при $\varphi = 90$ та $\varphi = 0$ на частоті 400 МГц

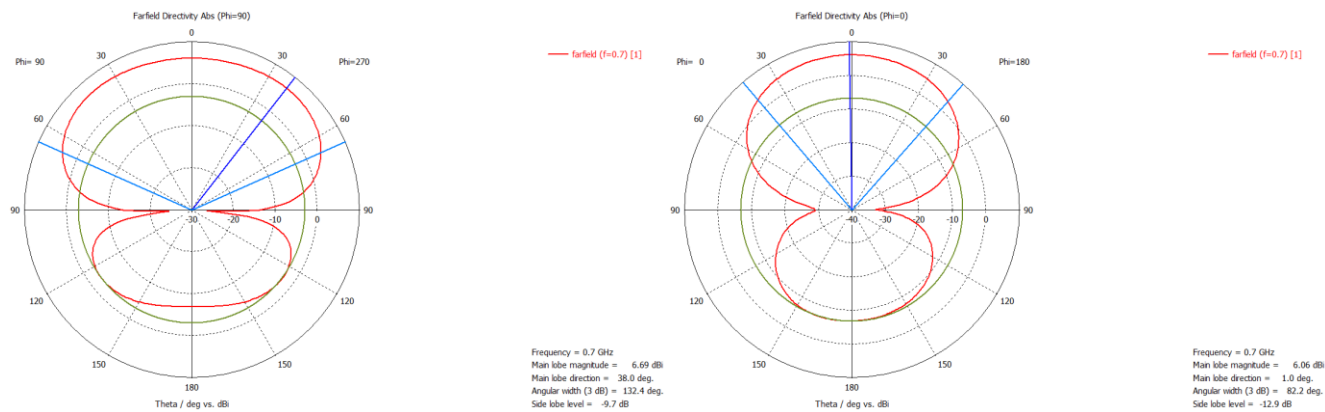


Рисунок 3.14 – ДС при $\varphi = 90$ та $\varphi = 0$ на частоті 700 МГц

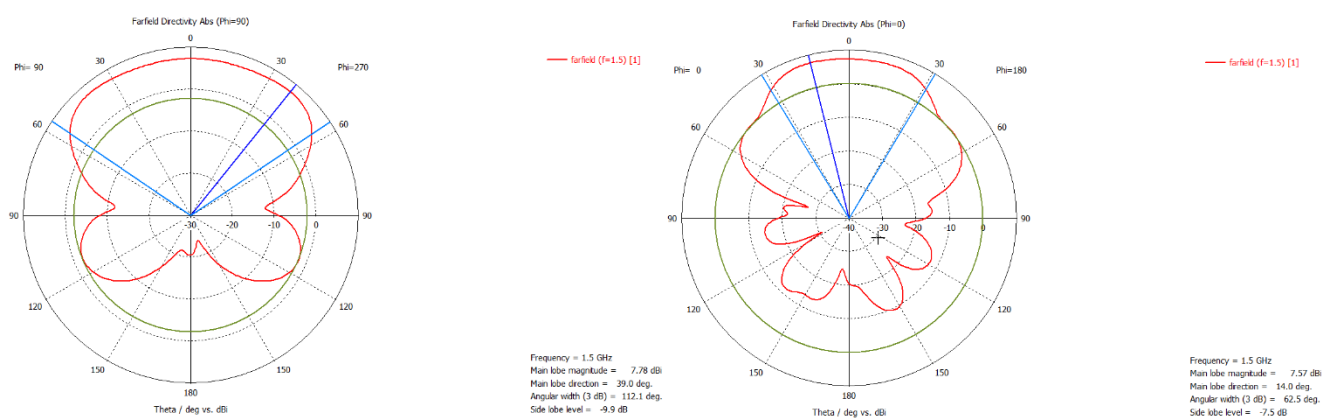


Рисунок 3.15 – ДС при $\varphi = 90$ та $\varphi = 0$ на частоті 1.5 ГГц

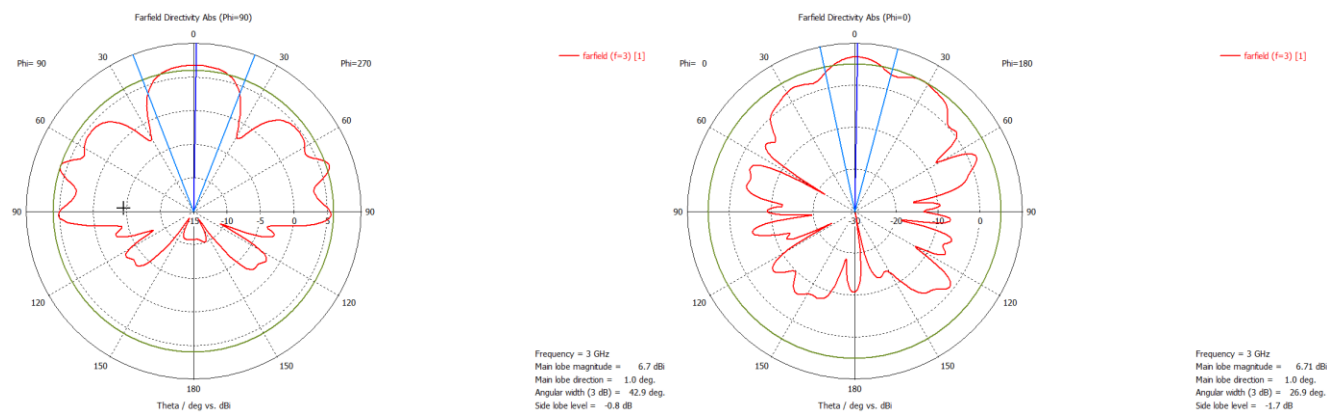


Рисунок 3.16 – ДС при $\varphi = 90$ та $\varphi = 0$ на частоті 3 ГГц

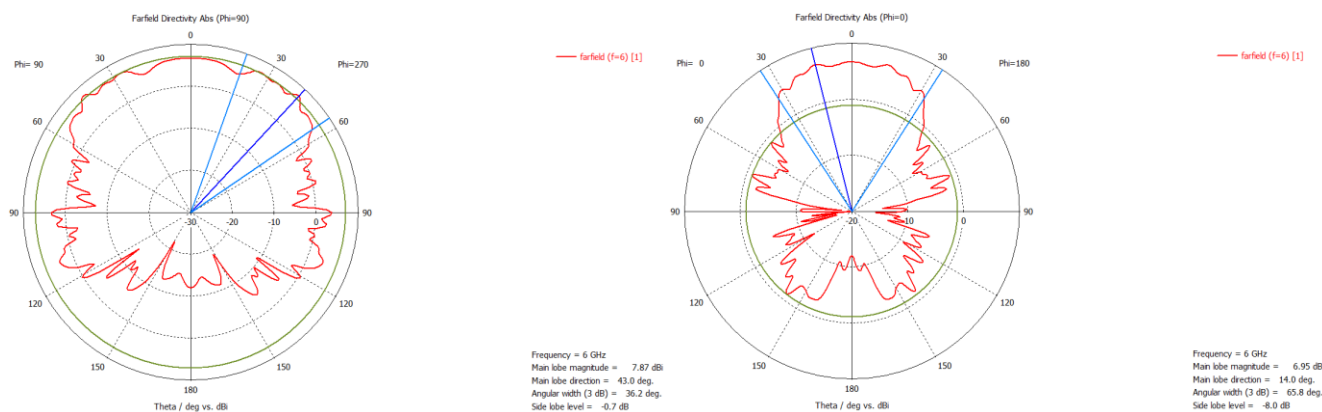


Рисунок 3.17 – ДС при $\phi = 90$ та $\phi = 0$ на частоті 6 ГГц

З діаграм отримуємо (рис. 3.13 - 3.17), що по ϕ ширина головного пелюстка зменшується зі збільшенням частоти від 124.2 до 42.9 градусів в Н площині та 69.9 - 26.9 градусів в Е площині, а рівень бічних пелюсток варіюється від -11 до -0.7 дБ. Високі рівні бічних пелюсток спостерігаються через те, що на верхніх частотах робочого діапазону антена стає електрично великою. У цьому випадку фізичні розміри елементів антени значно перевищують довжину хвилі, що призводить до складнішої структури діаграми спрямованості. ДС набуває порізаного вигляду.

Висновки до розділу 3

Логоперіодичні антени мають свої унікальні переваги, які визначають сферу їх застосування. Логоперіодична штирєва дипольна антена більше підходить для великогабаритних зовнішніх систем з високою потужністю та дальністю дії. Натомість логоперіодична антена на РСВ краще підходить для компактних пристроїв з низькою потужністю, де важливі мініатюрність, легкість інтеграції і вартість. Вибір між ними слід робити на основі конкретних вимог до характеристик антени та середовища експлуатації.

Проводячи аналіз двох логоперіодичних антени (рис. 3.4 - 3.9 та рис. 3.13 - 3.17), маємо, що класична логоперіодична дипольна антена має кращу спрямованість при відносно однакових зворотніх втратах S_{11} у порівнянні з логоперіодичною дипольною антеною на підкладці. Розміри класичної

логоперіодичної антени становлять 687x380x13 мм, а логоперіодичної антени на діелектричній підкладці – 617x400x1.524 мм.

У зв'язку з ширшою сферою застосування антени на друкованій платі у роботі було поставлено завдання спроектувати та дослідити подвійно поляризовану широкосмгову логоперіодичну антену на діелектричній підкладці.

4. РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ АНТЕНИ З КОЛОВОЮ ПОЛЯРИЗАЦІЄЮ ТА ДВОПОЛЯРИЗОВАНОЇ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ АНТЕНИ НА ДІЕЛЕКТРИЧНІЙ ПІДКЛАДЦІ

4.1 Побудова однопортової логоперіодичної антени з коловою поляризацією на РСВ

Двополяризована ЛПВА, створена на основі стандартної ЛПВА, можна спроектувати як дві стандартні ЛПВА з ортогональною поляризацією, розташовані перпендикулярно один до одного. При такій побудові та правильному проектуванні мережі живлення, ЛПВА забезпечує або вертикальну і горизонтальну або колову поляризацію [18].

Живлення ЛПВА виглядає наступним чином: з'єднання плечей (1, 4, 5, 8, ...) з внутрішнім коаксіальним провідником, з'єднання плечей (2, 3, 6, 7, ...) з зовнішнім коаксіальним провідником, а далі кожен набір плечей з'єднати паралельними подвійними лініями.

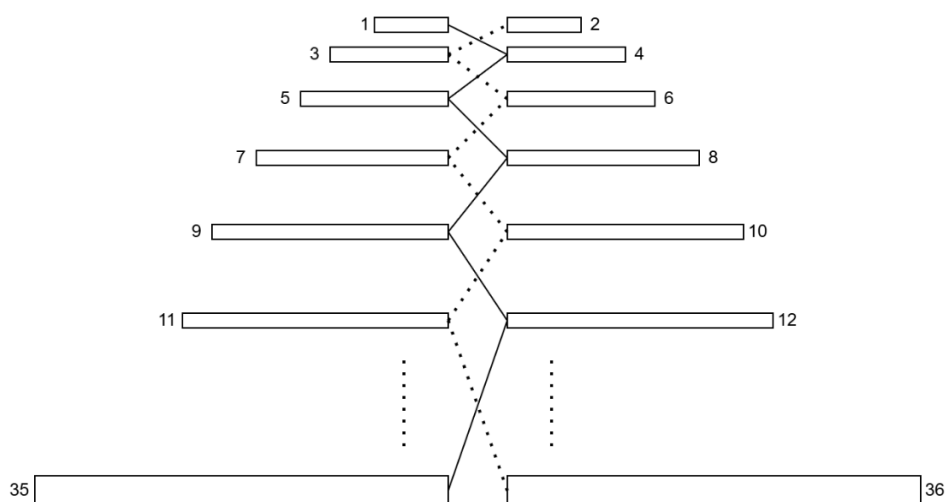


Рисунок 4.1 – Схема побудови антени з 18-ма елементами

Двополяризована ЛПВА може бути сформований шляхом вертикального розташування двох антен. Але використовуючи живлення через один вхід дану антену технічно складно виготовити на друкованій платі. Тому для проектування потрібно дещо змінити структуру антени, а саме повернути кожну пару плечей, рис. 4.2, (3, 4; 7, 8; 11, 12; ... 34, 35) на 90° [18]. Таким чином утвориться двополяризована ЛПВА. У зв'язку з тим, що плечі антени мають бути

підключеними до зовнішнього або внутрішнього провідника коаксіального кабелю, розташовані в одному квадраті, цю конструкцію можливо виготовити методом друкованої плати з одним роз'ємом живлення. Якщо на антену подаються два сигнали (тобто існує два джерела сигналів) з рівною амплітудою і різницею фаз у 90° , її поляризація стає круговою.



Рисунок 4.2 – Схематичний вигляд повороту елементів антени

Для побудови було обрано значення довжин та ширин елементів антени з таблиці 2.3. Матеріалом друкованої плати також є RO4350B з початковою товщиною 1.524 мм.

У процесі оптимізації та підбору ширини центральних смужок вийшло, що для зменшення коефіцієнту еліптичності антени його виготовити у формі трапеції, тобто спереду біля точки живлення він має дорівнювати 4 мм (рис. 4.3), а біля диполя найбільшої довжини – 6 мм (також покращує в даному випадку коефіцієнт зворотніх втрат S_{11}). Дані розміри були отримані експериментальним підбором пар довжин.

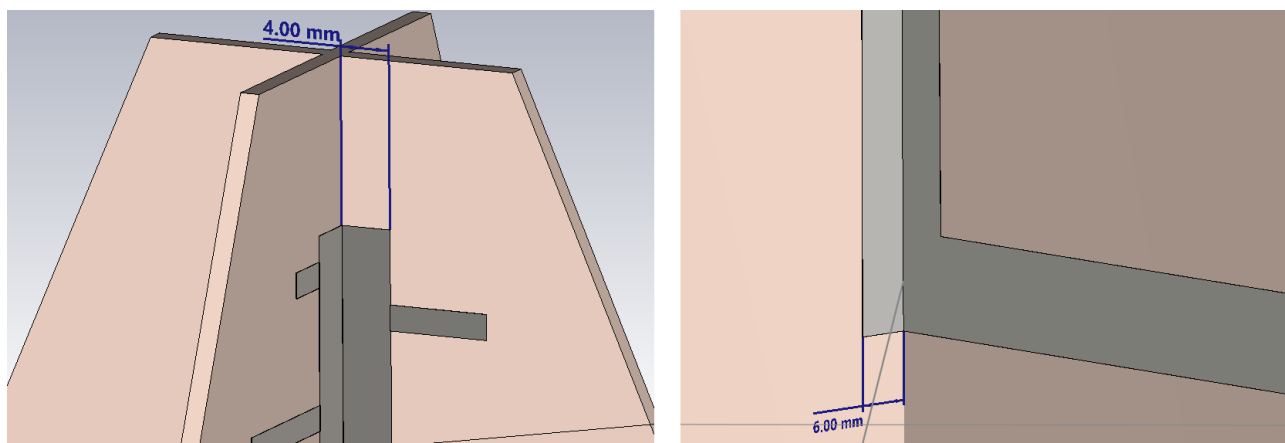


Рисунок 4.3 – Вигляд несучого полотна антени зверху та знизу

У зв'язку з погіршенням S_{11} (рис. 4.4) параметрів на частоті від 5 ГГц, а також зменшення коефіцієнту еліптичності було оптимізовано довжини більшості диполів. У таблиці 4.1 наведено довжини та робочі частоти елементів.

Таблиця 4.1 – Розміри диполів ЛПВА з коловою поляризацією на РСВ

Номер і-го елемента	Довжина і-го елемента, мм	Робоча частота і-го елемента, МГц
1	182	412
2	160	468,7
3	115	652,2
4	96	781,2
5	89	842,7
6	70	1071,4
7	60	1250
8	46	1630,4
9	39	1923
10	30	2500
11	27	2777,8
12	23	3260,8
13	20	3750
14	18	4166,6
15	15	5000
16	12	6250
17	8	9375
18	4	18750

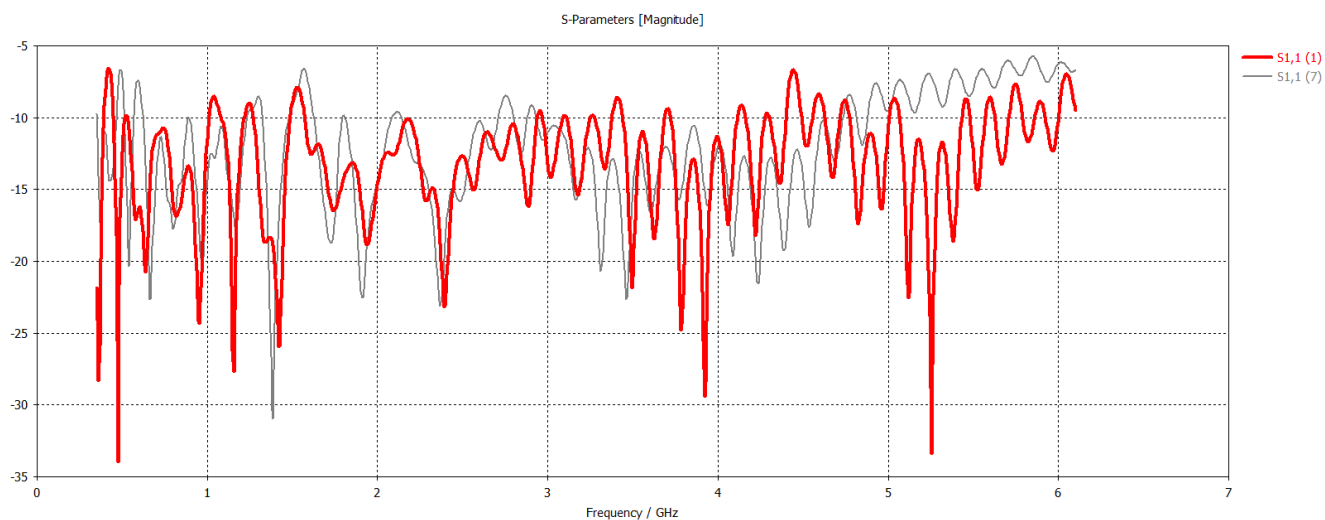


Рисунок 4.4 – Параметр S_{11} до та після оптимізації

З рис 4.4 видно, що фактичний робочий діапазон частот антени становить від 0,4 до 6 ГГц, з піком в -7 дБ на частоті 4.44 ГГц та піком в -8 дБ на частоті 1.53 ГГц.

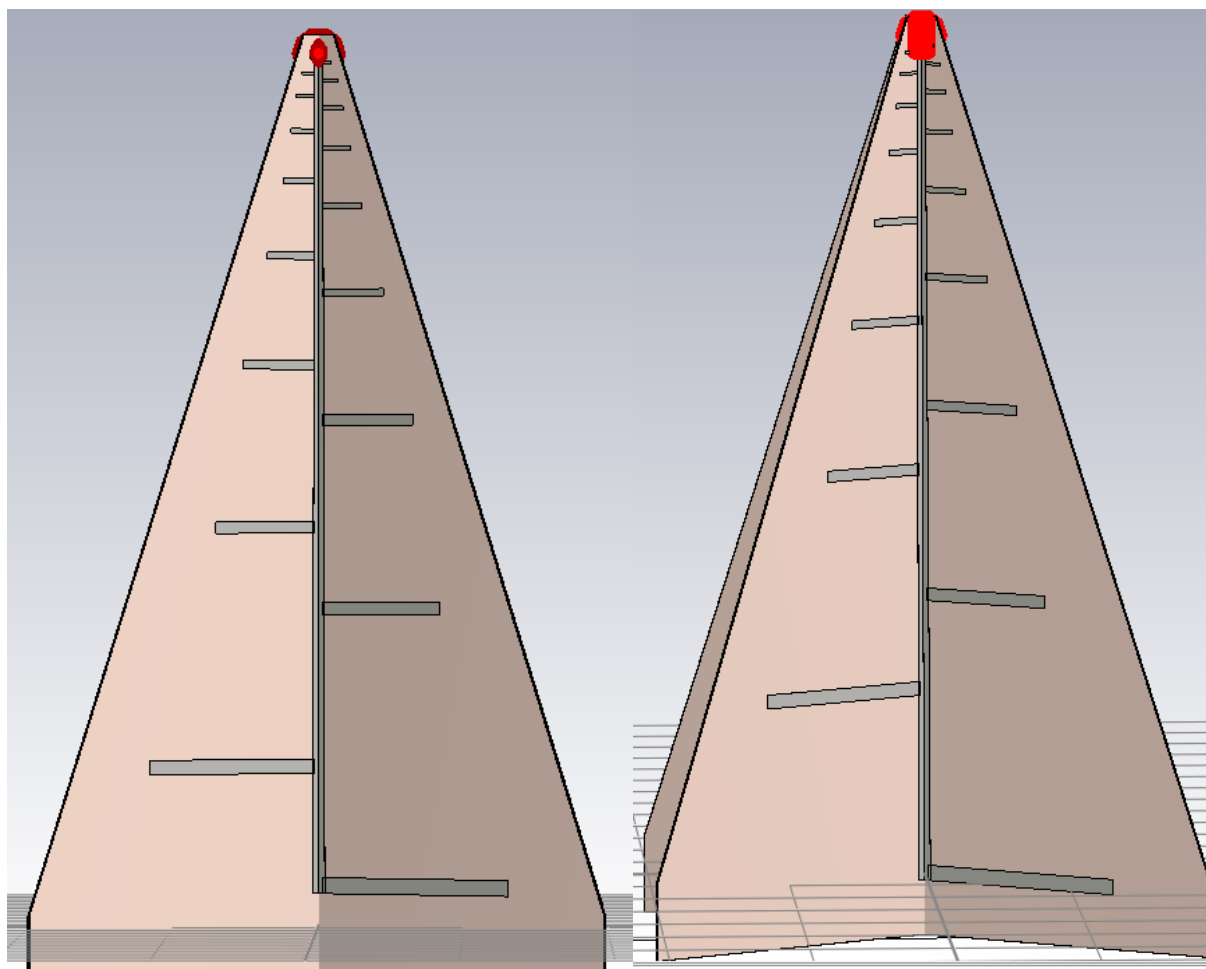


Рисунок 4.5 – Вид антени зверху та знизу з відступом 20 мм між смужками та краєм плати

При практичному конструюванні антени потрібно 2 плати RO4350B з мінімальними розмірами 615x414 мм (з закладеним відступом 1 мм між межею плати та смужками).

Також, по-перше, одна з плат має мати виріз на половину її довжини з шириною в товщину обраного RO4350B з нижнього кінця, друга – аналогічний виріз з верхнього кінця друкованої плати. По-друге, при вставці однієї плати в іншу потрібно забезпечити кращу площину контакту та міцність з'єднання плат за допомогою пайки.

Для пошуку найменшого коефіцієнту еліптичності антени було промодельовано параметри антени зі здвигом протилежних дипольних елементів антени на наступні відстані:

$$0, \frac{Lbd}{20}, \frac{Lbd}{10}, \frac{3Lbd}{20}, \frac{Lbd}{5}, \frac{Lbd}{4},$$

де Lbd - відстань між сусідніми диполями, табл. 2.3.

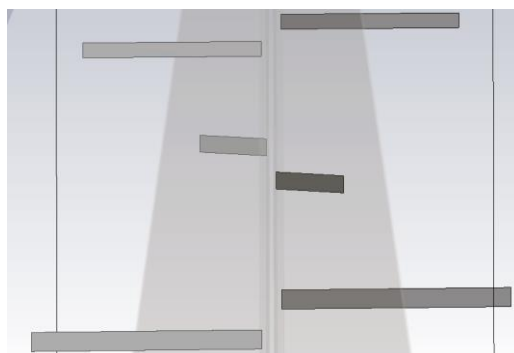


Рисунок 4.6 – Приклад зміщення диполів

На рис. 4.7 – 4.11, рис. 4.12 - зображено результати розрахунків діаграм спрямованості та коефіцієнта еліптичності антени при 0.4, 0.7, 1, 3, 6 ГГц.

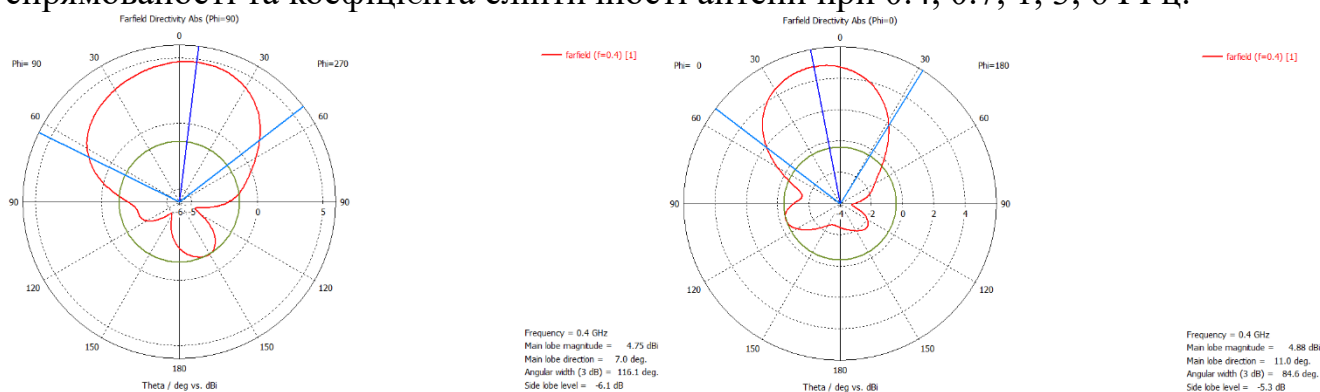


Рисунок 4.7 – ДС при $\varphi = 90$ та $\varphi = 0$ на частоті 400 МГц

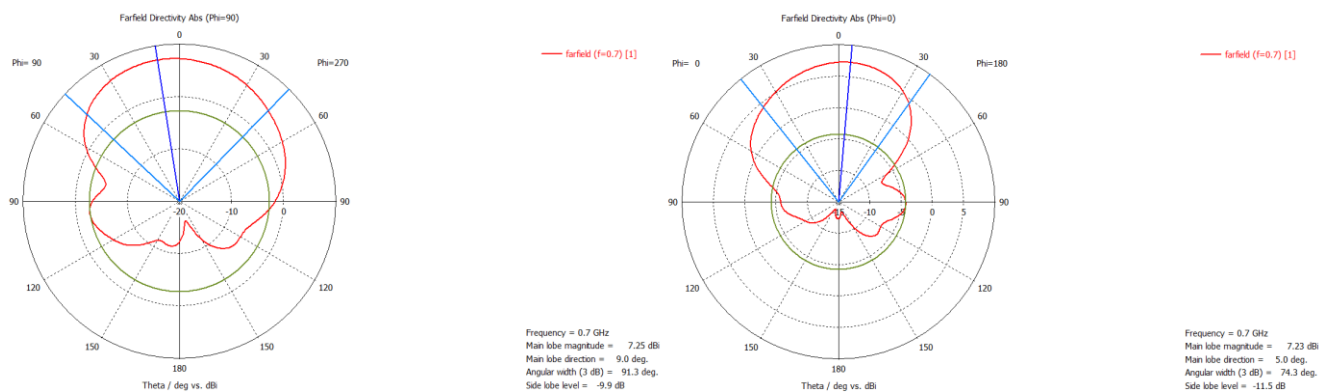


Рисунок 4.8 – ДС при $\phi = 90$ та $\phi = 0$ на частоті 700 МГц

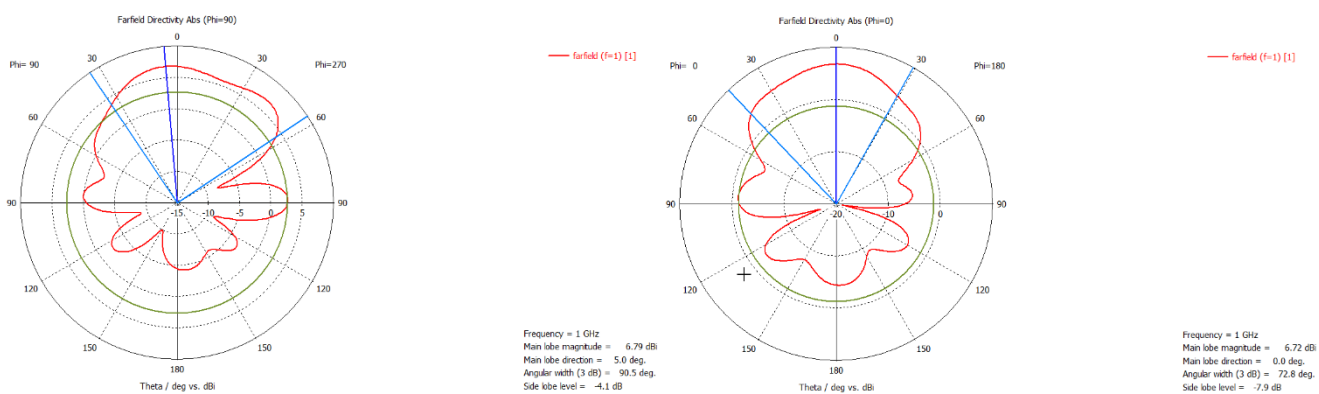


Рисунок 4.9 – ДС при $\phi = 90$ та $\phi = 0$ на частоті 1 ГГц

З наведених вище діаграм видно, що зі збільшенням частоти ширина головного пелюстка по ϕ зменшується: від 116,1 до 90,5 градусів у Н-площині та від 84,6 до 72,8 градусів у Е-площині.

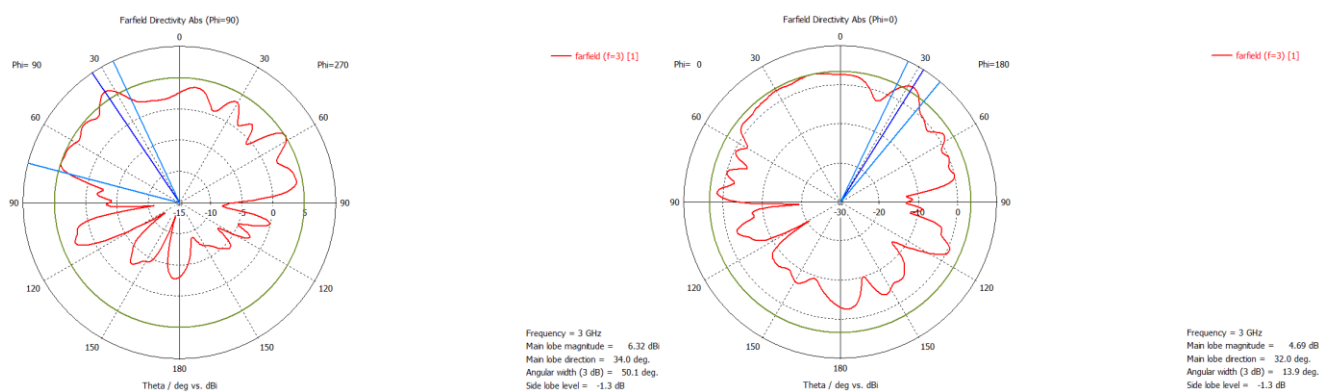


Рисунок 4.10 – ДС при $\phi = 90$ та $\phi = 0$ на частоті 3 ГГц

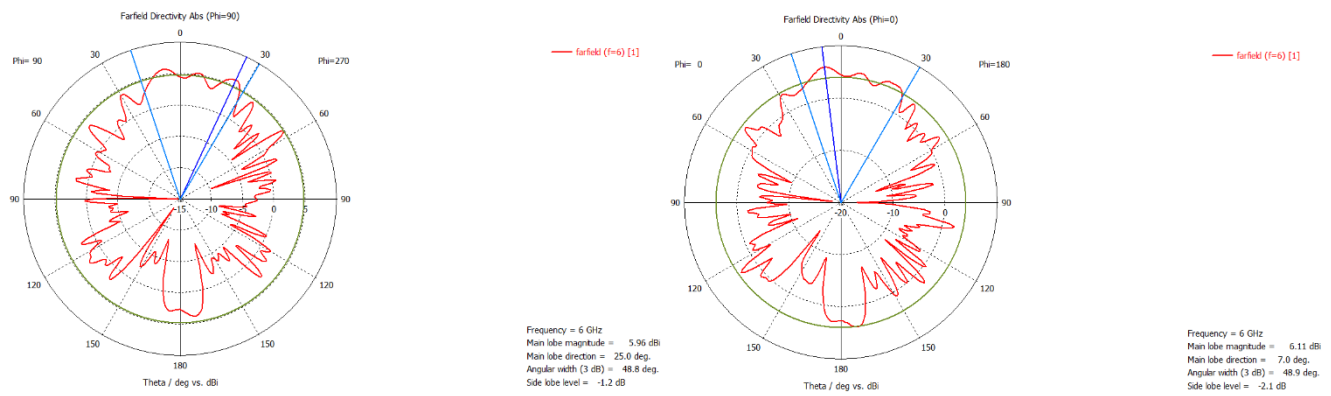


Рисунок 4.11 – ДС при $\varphi = 90$ та $\varphi = 0$ на частоті 6 ГГц

З діаграм видно, що зі збільшенням частоти ширина головного пелюстка також зменшується.

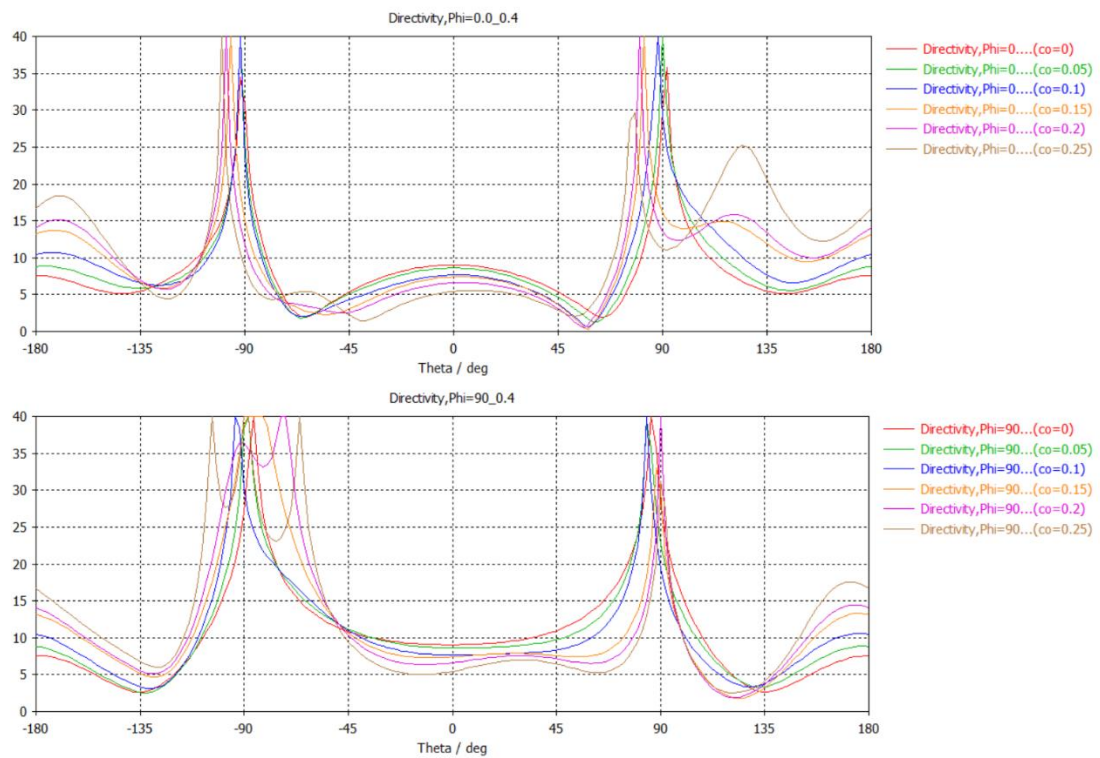


Рисунок 4.12 – Коефіцієнт еліптичності при $\varphi = 0$ та $\varphi = 90$ на частоті 400 МГц

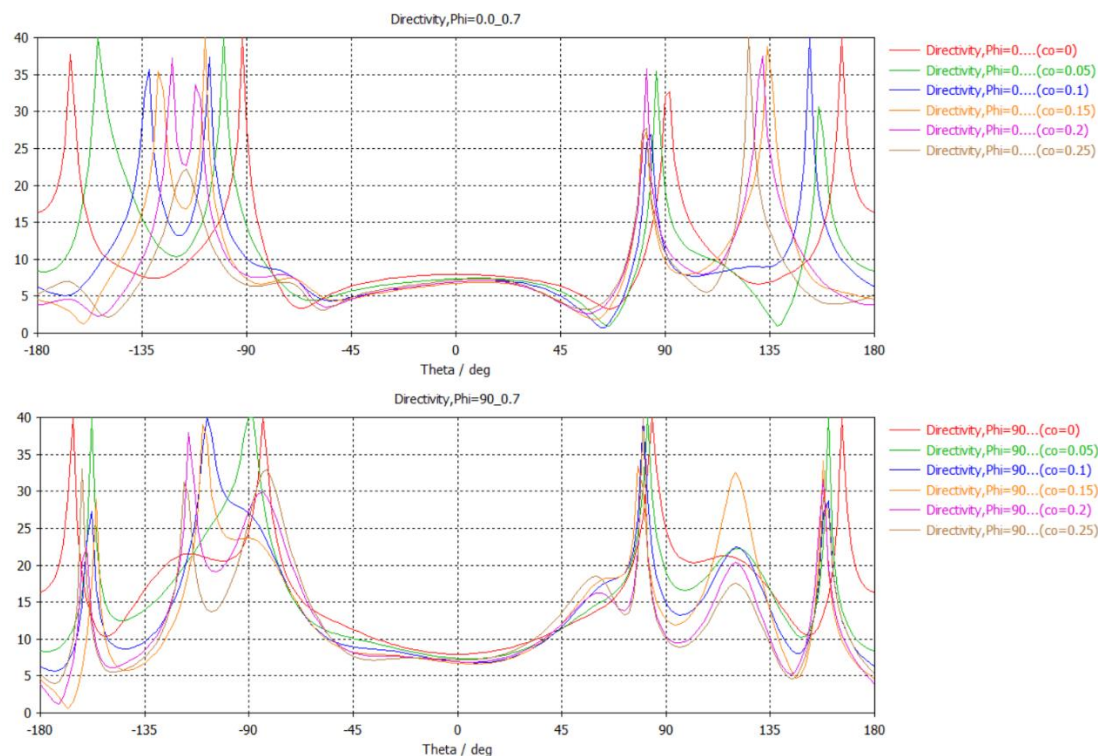


Рисунок 4.13 – Коефіцієнт еліптичності при $\varphi = 0$ та $\varphi = 90$ на частоті 700 МГц

На частоті 400 МГц коефіцієнт еліптичності знаходиться в межах 5 дБ, а на 700 МГц – 7.5 дБ.

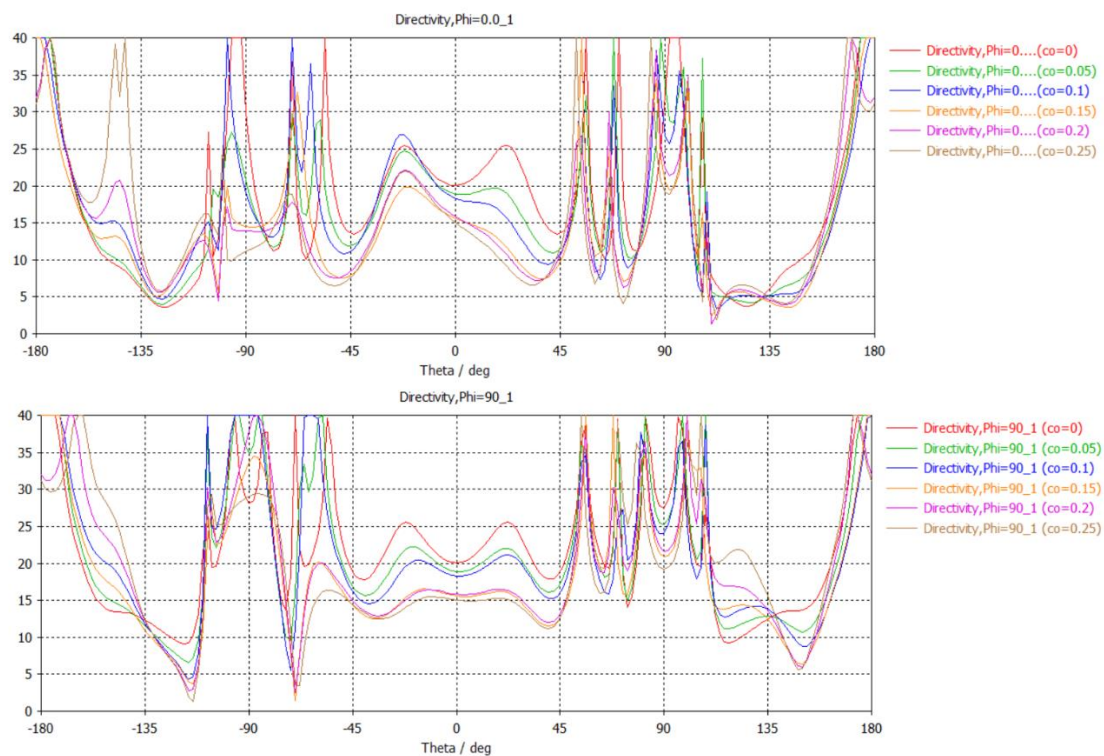


Рисунок 4.14 – Коефіцієнт еліптичності при $\varphi = 0$ та $\varphi = 90$ на частоті 1 ГГц

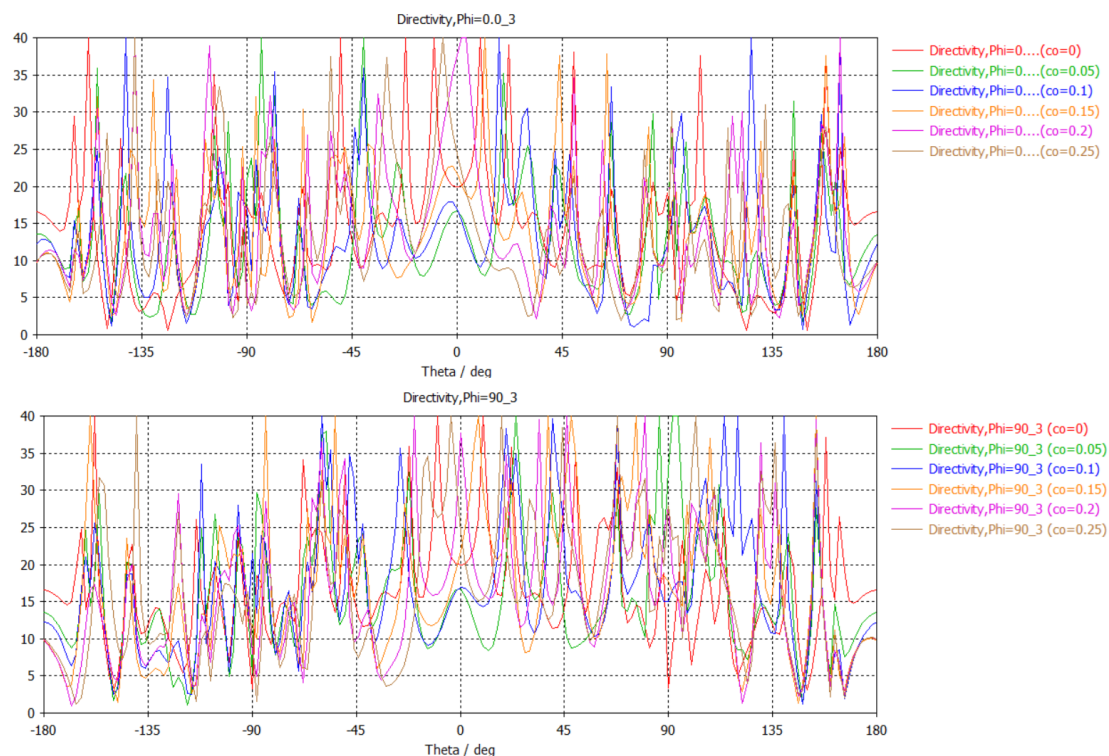


Рисунок 4.15 – Коефіцієнт еліптичності при $\varphi = 0$ та $\varphi = 90$ на частоті 3 ГГц

На частоті 1 ГГц коефіцієнт знаходиться в межах 15 дБ, а на 3 ГГц – 25 дБ.

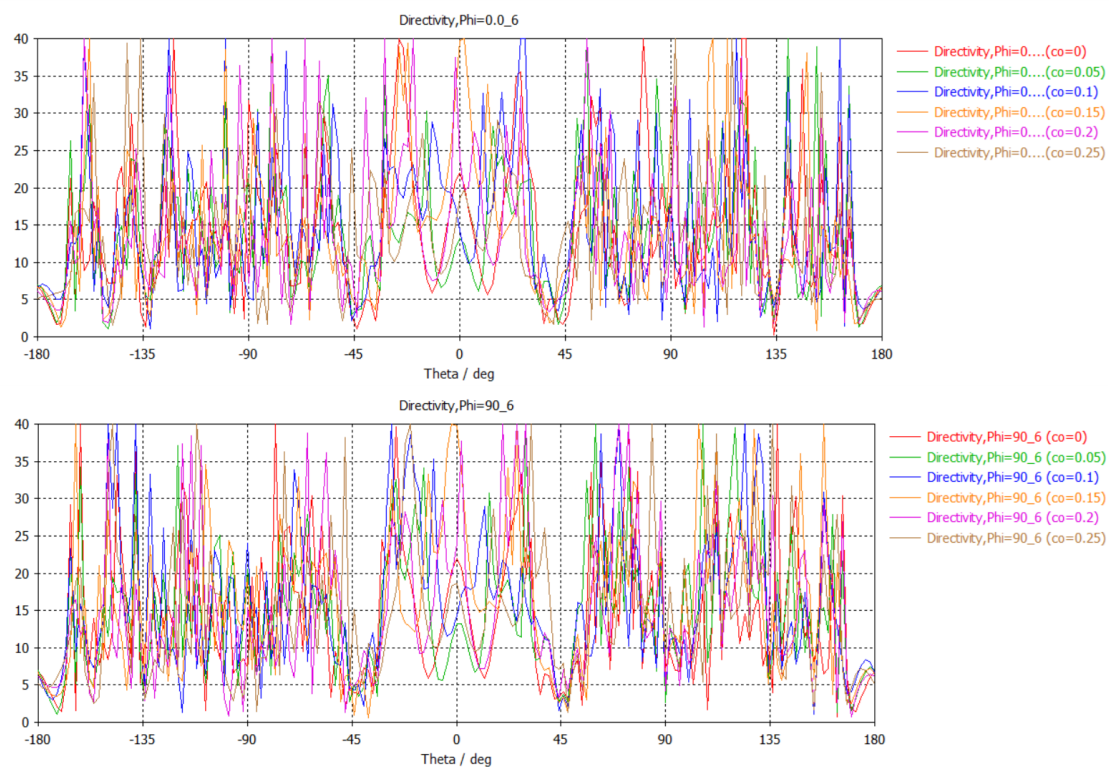


Рисунок 4.16 – Коефіцієнт еліптичності при $\varphi = 0$ та $\varphi = 90$ на частоті 6 ГГц

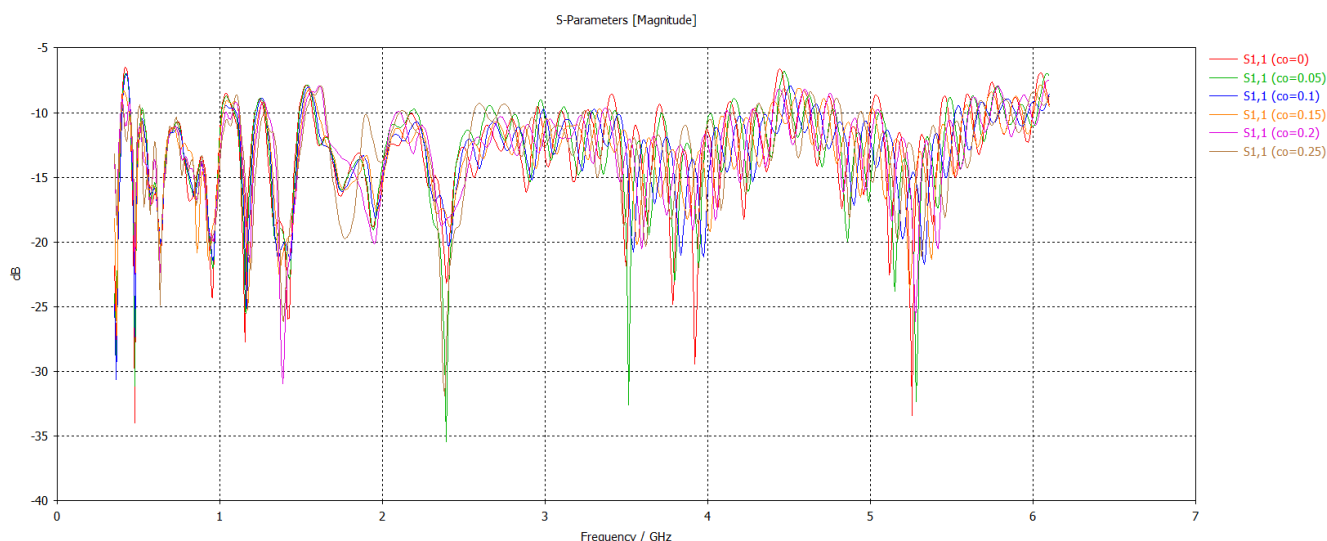


Рисунок 4.17 – Параметр S_{11} при зміщенні диполів

З рис. 4.12 – 4.16 випливає, що колову поляризацію за рівнем 5 – 7 дБ в даній антені можна отримати на діапазоні частот від 400 МГц до 700 МГц зі зміщенням на четвертину довжини відстані між диполями при незначній зміні S параметрів (додатково диполі було зміщено на ще менші проміжки для підтвердження даного висновку). Також, наприклад, коефіцієнт еліптичності залежить від зміни товщини діелектрика друкованої плати (3 стандартні розміри RO4350B).

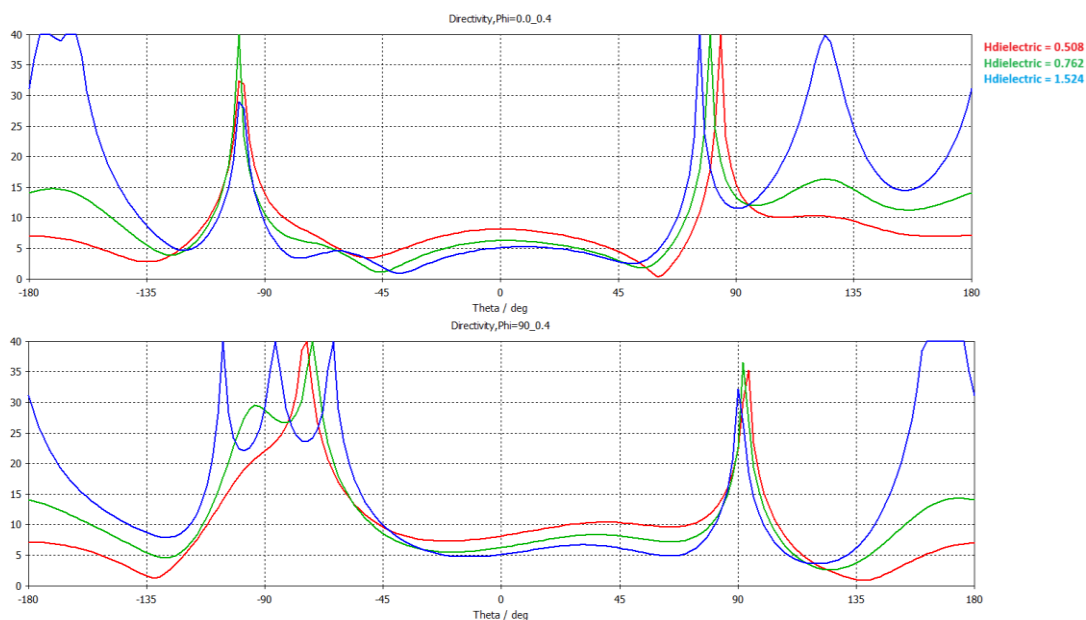


Рисунок 4.18 – Коефіцієнт еліптичності при $\varphi = 0$ та $\varphi = 90$ на частоті 400 МГц при зміні товщини діелектрика

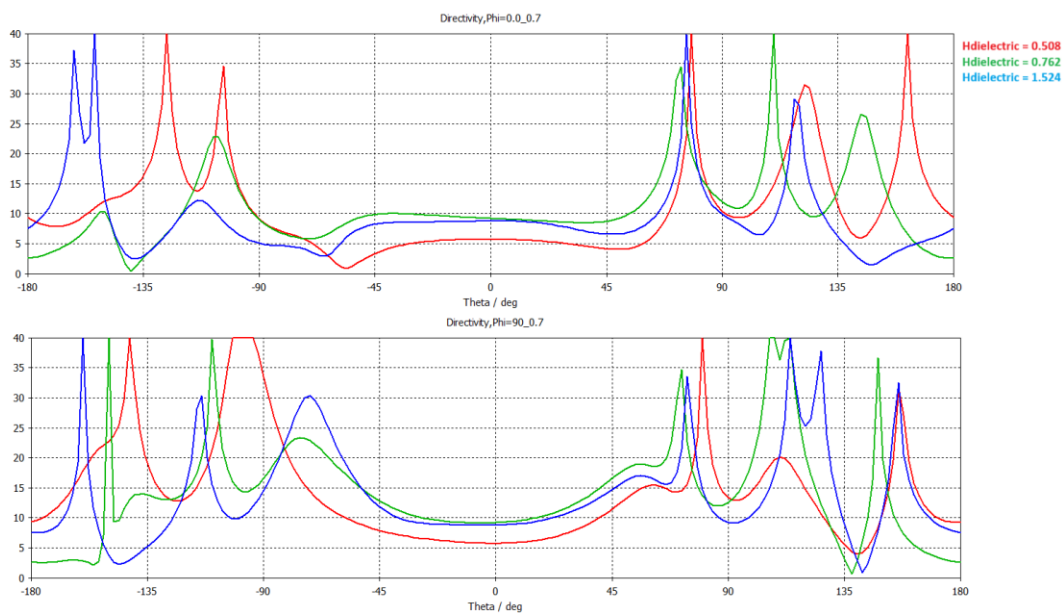


Рисунок 4.19 – Коефіцієнт еліптичності при $\varphi = 0$ та $\varphi = 90$ на частоті 700 МГц при зміні товщини діелектрика

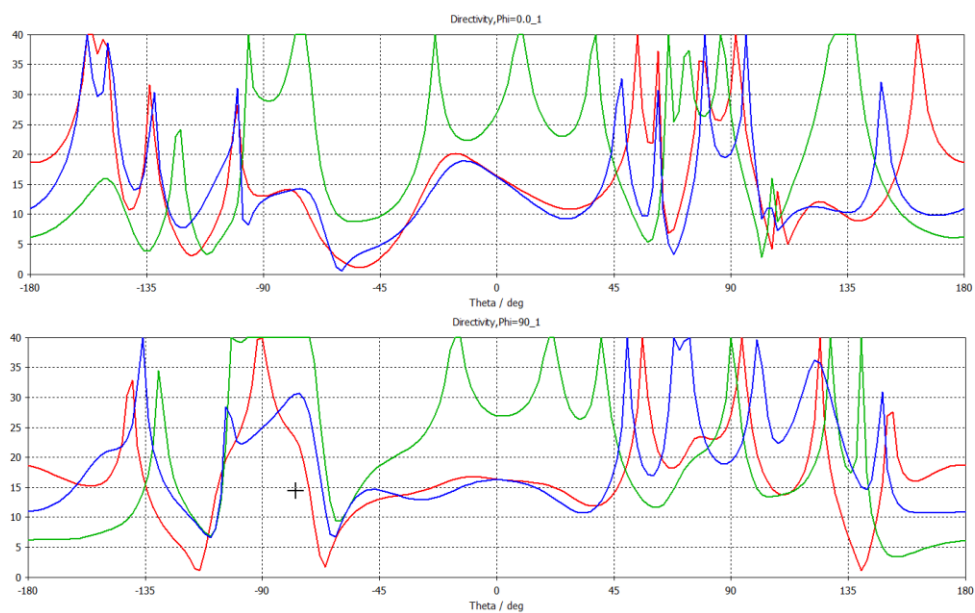


Рисунок 4.20 – Коефіцієнт еліптичності при $\varphi = 0$ та $\varphi = 90$ на частоті 1 ГГц при зміні товщини діелектрика

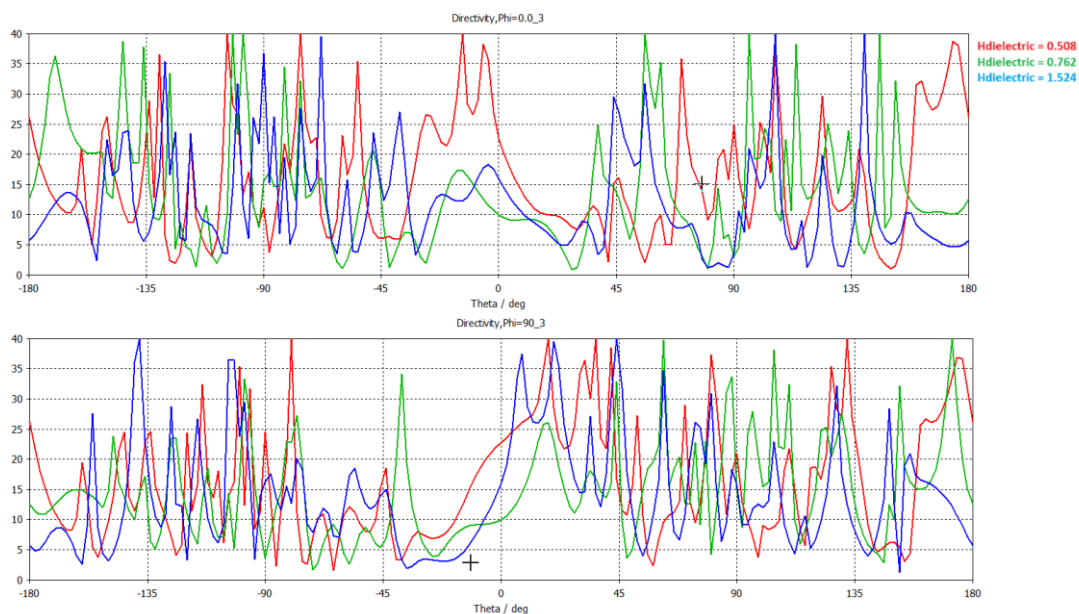


Рисунок 4.21 – Коефіцієнт еліптичності при $\varphi = 0$ та $\varphi = 90$ на частоті 3 ГГц при зміні товщини діелектрика

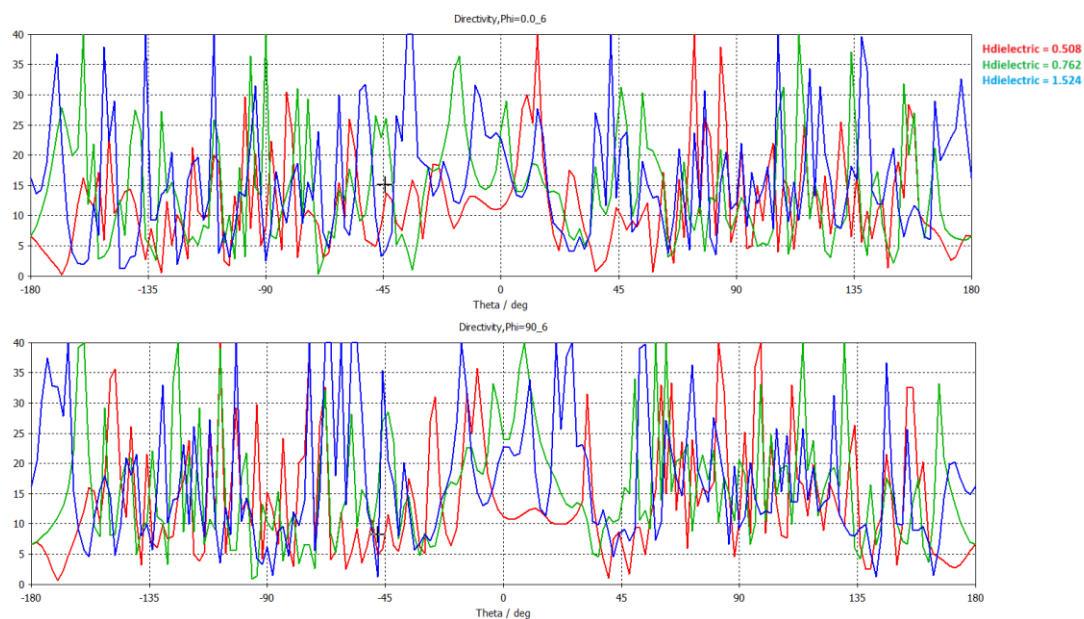


Рисунок 4.22 – Коефіцієнт еліптичності при $\varphi = 0$ та $\varphi = 90$ на частоті 6 ГГц при зміні товщини діелектрика

На основі аналізу результатів, представлених на рис. 4.12 – 4.16 та рис. 4.18 – 4.22, встановлено, що для забезпечення коефіцієнта еліптичності антени близько 5 дБ, коефіцієнт перекриття логоперіодичної антени має наближатися до значення 2. При цьому, вплив товщини діелектрика та ширини центральної смужки на показники коефіцієнта еліптичності є незначним. Тобто, на антені

ультраширокодіапазону 400 МГц – 6 ГГц, де коефіцієнт перекриття становить 15 не вдалось досягнути колової поляризації на всьому робочому діапазоні частот антени.

4.2 Побудова подвійно поляризованої логоперіодичної антени на РСВ

Першим кроком проектування подвійно поляризованої логоперіодичної антени на друкованій платі буде розгляд конструкції ЛПВА з двома джерелами живлення та проектування її конструкції на друкованих платах.

Двополяризована ЛПВА конструюється шляхом вертикального розташування двох антен, рис. 4.23, тобто використовується дві перпендикулярні системи диполів [19]: два ряди диполів розташовуються горизонтально, а інші два – перпендикулярно першому, рис. 4.24.

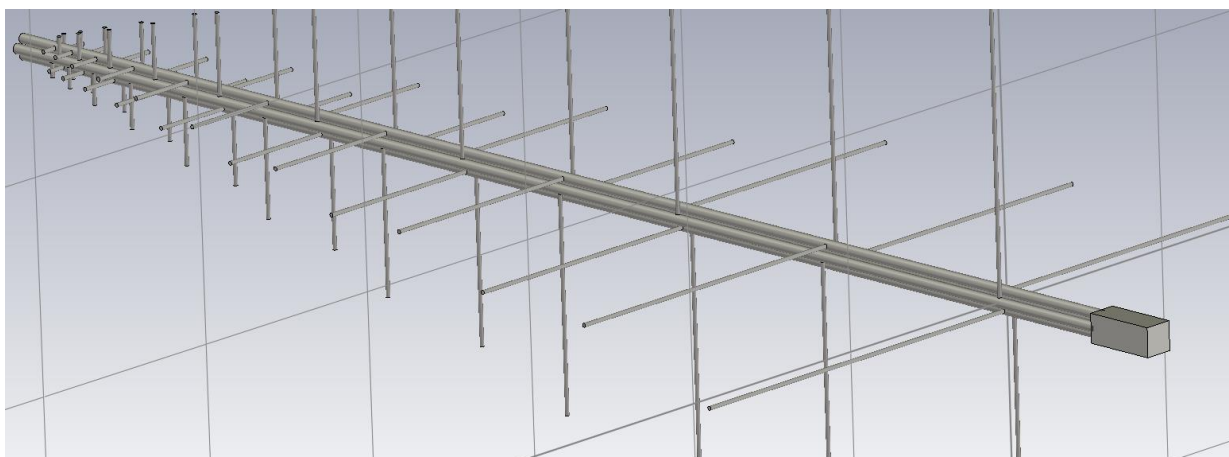


Рисунок 4.23 – Вигляд подвійно поляризованої ЛПВА збоку

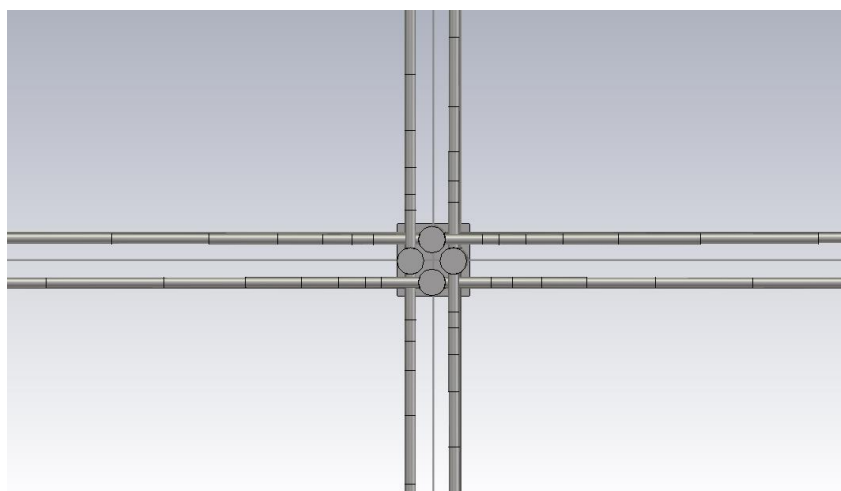


Рисунок 4.24 – Вигляд подвійно поляризованої ЛПВА спереду

Подвійно поляризована логоперіодична антена на друкованій платі конструюється аналогічним чином, переносячи взаємно перпендикулярне розміщення диполів на РСВ.

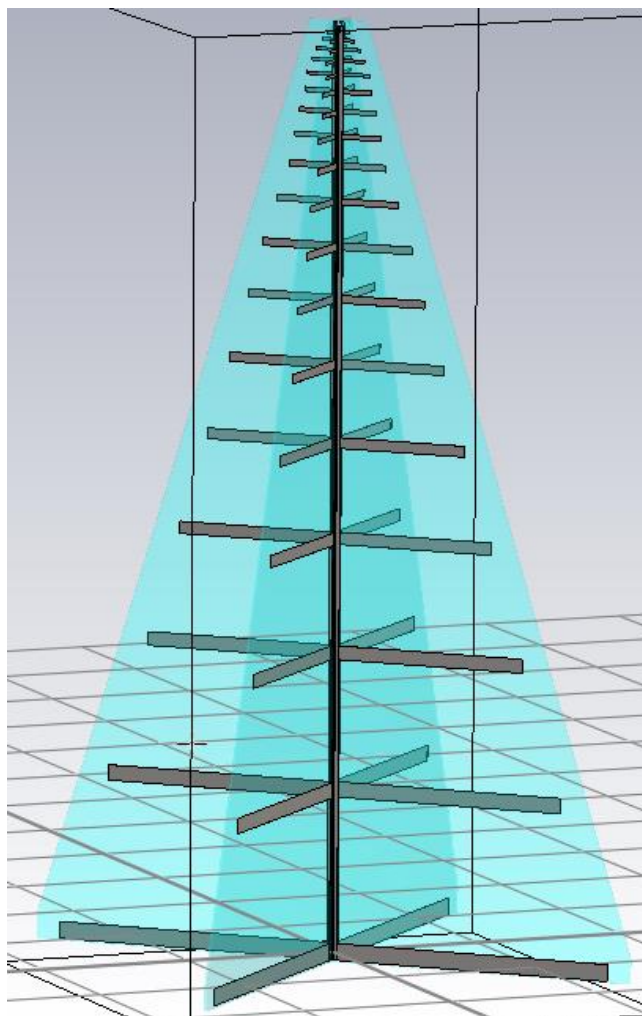


Рисунок 4.25 – Вигляд розміщення смужок диполів подвійно поляризованої ЛПВА на друкованій платі

На рисунку 4.26 представлено перпендикулярне розташування диполів на двох друкованих платах. Аналогічне розташування буде реалізоване на ще трьох взаємно перпендикулярних площинах друкованих плат, тобто обертаючи антену на кут 90° розміщення смужок змінюватись не буде.

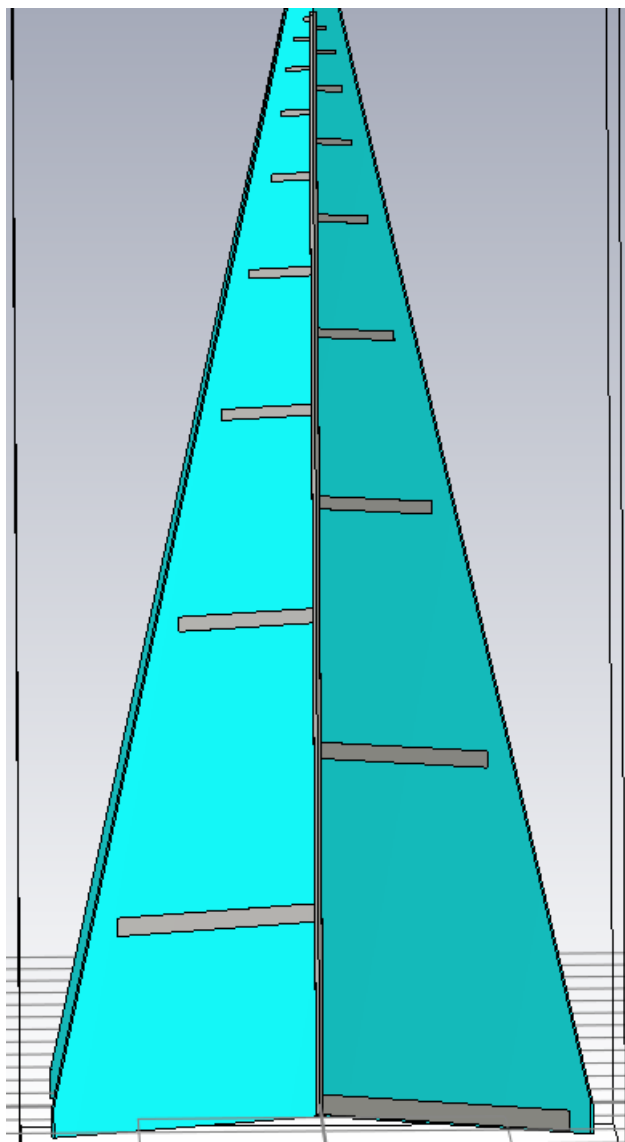


Рисунок 4.26 – Вигляд подвійно поляризованої ЛПВА на РСВ збоку

Для побудови матеріалом друкованої плати також є RO4350В з початковою товщиною 1.524 мм., вхідний опір – 50 Ом. У процесі оптимізації було скориговано довжини елементів диполів та міжелементні відстані (між 1-м та 2-м диполем зменшено відстань на 5 мм, 2-м та 3-м диполем зменшено дистанцію на 2 мм, між 3-м та 4-м диполем зменшено відстань на 1 мм. Це дозволило забезпечити відповідність конструкції заданим обмеженням діелектика RO4350В, максимальні габарити якого становлять 610x457 мм та зменшити зворотні втрати. В таблиці 4.2 наведено розміри після оптимізації.

Таблиця 4.2 – Розміри 18-ти елементного подвійно поляризованої ЛПВА на друкованій платі

Номер і-го елемента	Довжина і-го елемента, мм	Робоча частота і-го елемента, МГц	Відстань між сусідніми елементами, мм	Розміщення елементів вздовж антени, мм	Ширина смужки і-го елемента
1	187,5	400	-	-	11
2	154	487	106	105,5	10
3	127	591	89	194,5	9
4	104,5	717,7	74	268,5	8
5	86	872	62	330,5	7
6	70,5	1063,8	51	381,5	6
7	58	1293	42	423,5	5
8	48	1562,5	34	457,5	5
9	39	1923	29	486,5	4
10	30	2500	23	509,5	4
11	27	2777,8	19	528,5	3
12	23	3260,8	16	544,5	3
13	20	3750	13	557,5	3
14	18	4166,6	11	568,5	2
15	15	5000	9	577,5	2
16	12	6250	7	584,5	2
17	8	9375	6	590,5	2
18	4	18750	5	595,5	2

Внаслідок укорочення центральної смужки довжина антени зменшилась на 8.5 мм в порівнянні з антеною, розміри якої описані в таблиці 2.3. Ширина несучого полотна становить 2.63 мм, рис. 4.27. Для виготовлення антени потрібно 2 плати RO4350B з розмірами 610x414 мм і товщиною 1.524 мм (із закладеним відступом 1 мм між смужками та краями друкованої плати).

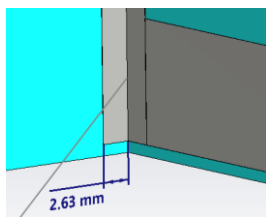
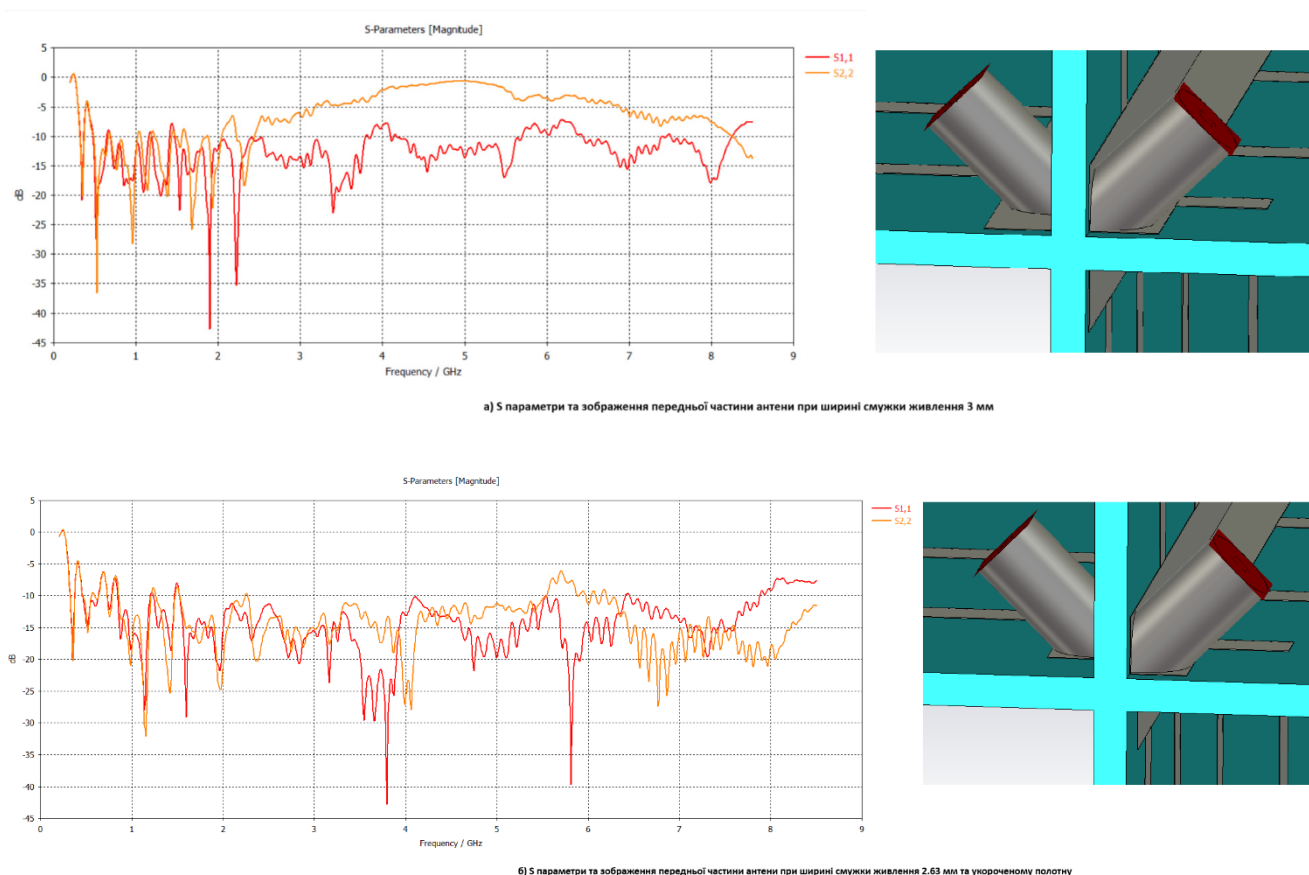


Рисунок 4.27 – Вигляд несучого полотна антени

Також в процесі оптимізації за для зменшення S параметрів антени було укорочено продовження центральної смужки антени до джерела її живлення, ширину центральної смужки та відстань між двома портами живлення, оскільки значення S_{22} були незадовільними і набагато гіршими за S_{11} , приблизно гіршими на 3 – 10 дБ (на частоті 4.5 ГГц – 5.1 ГГц S_{22} був близьким до 0 дБ, рис. 4.28 а). Діапазон робочих частот антени по рівню зворотніх втрат -10 дБ становить 0.45 - 7.5 ГГц.

Рисунок 4.28 – S_{11} та S_{22} до і після оптимізації несучого полотна антени

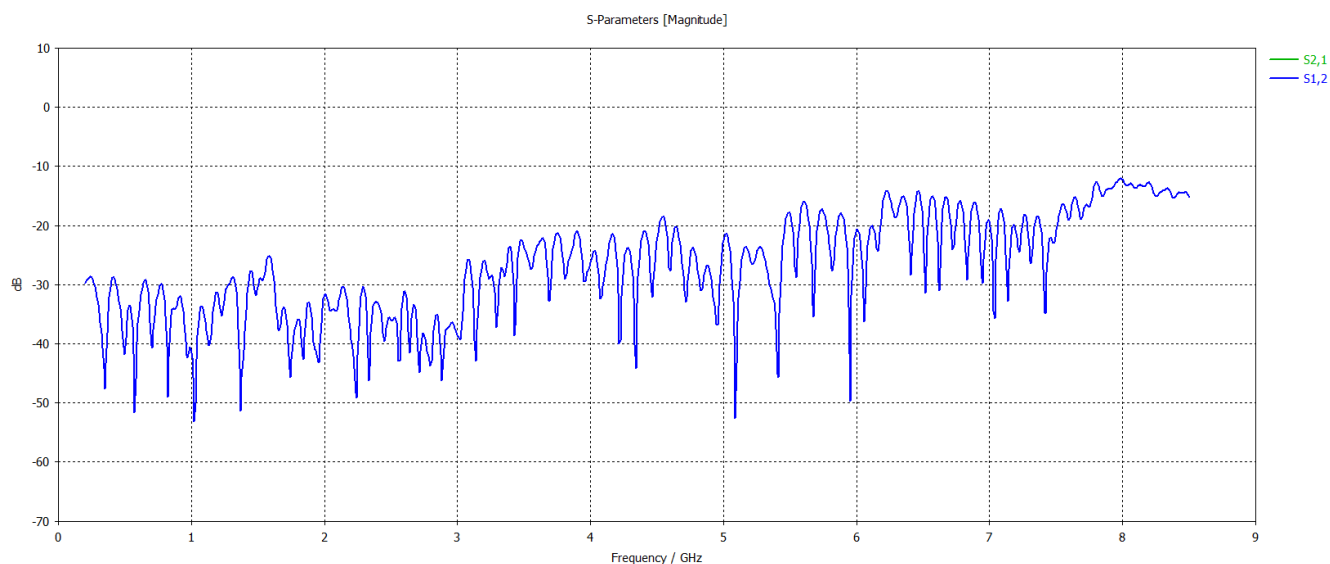


Рисунок 4.29 – S_{21} та S_{12} антени

На рис. 4.30 – 4.31 зображено залежність S параметрів антени для двох входів живлення при зміні ширини несучого полотна (5.33, 6.53, 7.53 мм) та відстані між портами живлення (3, 4, 5 мм). З рисунків видно, що дані параметри мають найбільший вплив на узгодження антени.

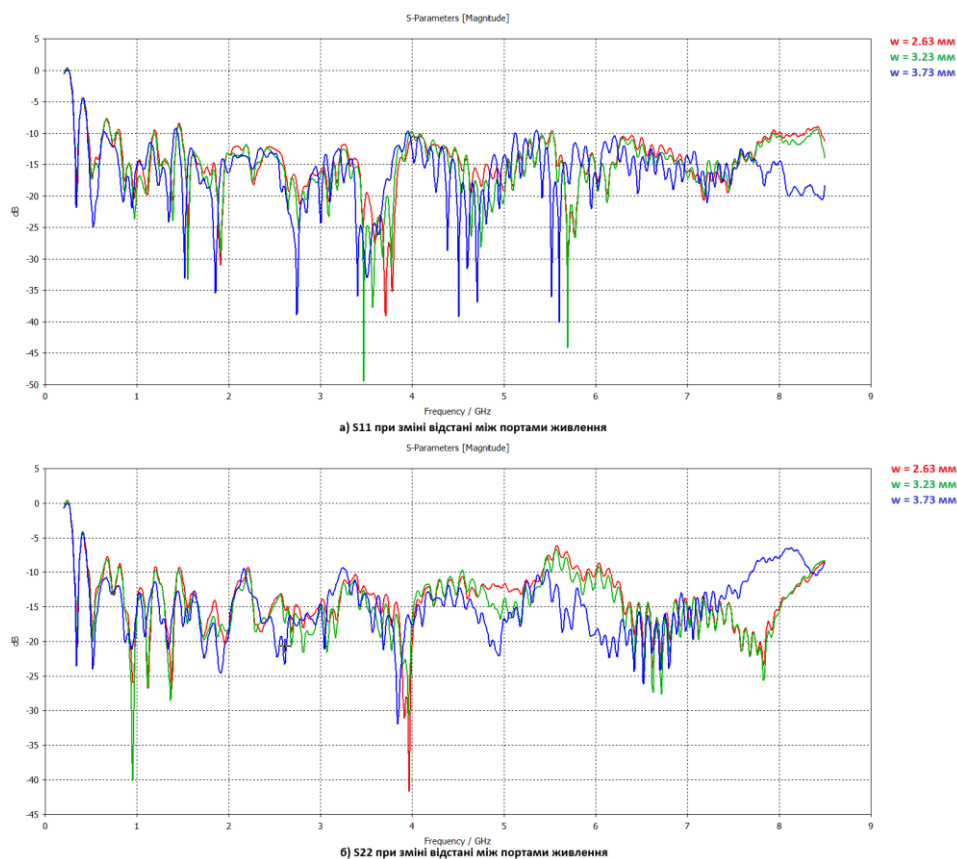


Рисунок 4.30 – S_{11} та S_{22} при зміні ширини несучого полотна

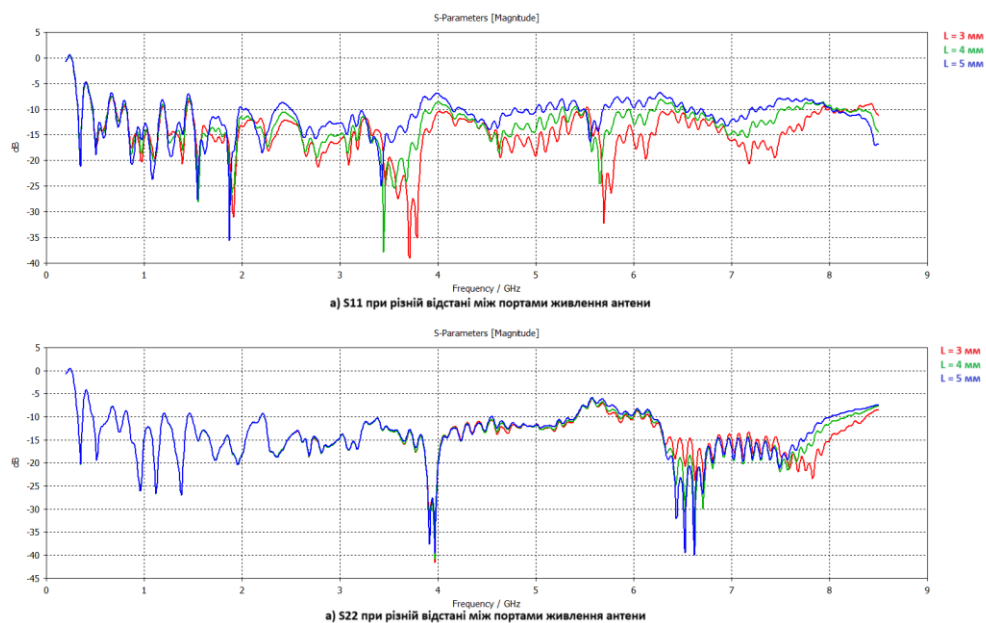


Рисунок 4.31 – S_{11} та S_{22} при зміні відстані між портами живлення

Розглянемо діаграми спрямованості антени на частоті 0.45, 0.7, 1.5, 3, 6, 7.5 ГГц.

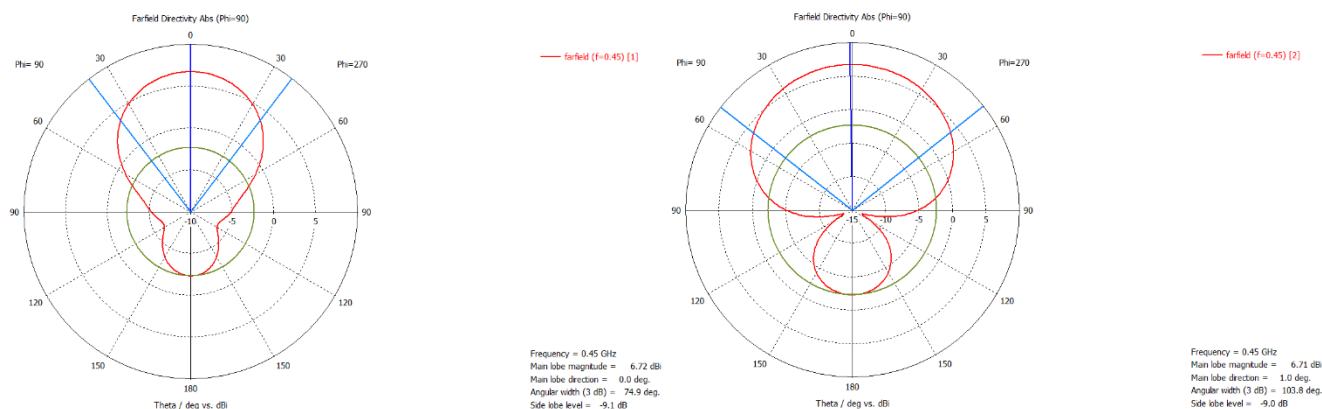


Рисунок 4.32 – ДС при $\phi = 90$ на частоті 450 МГц для двох входів антени

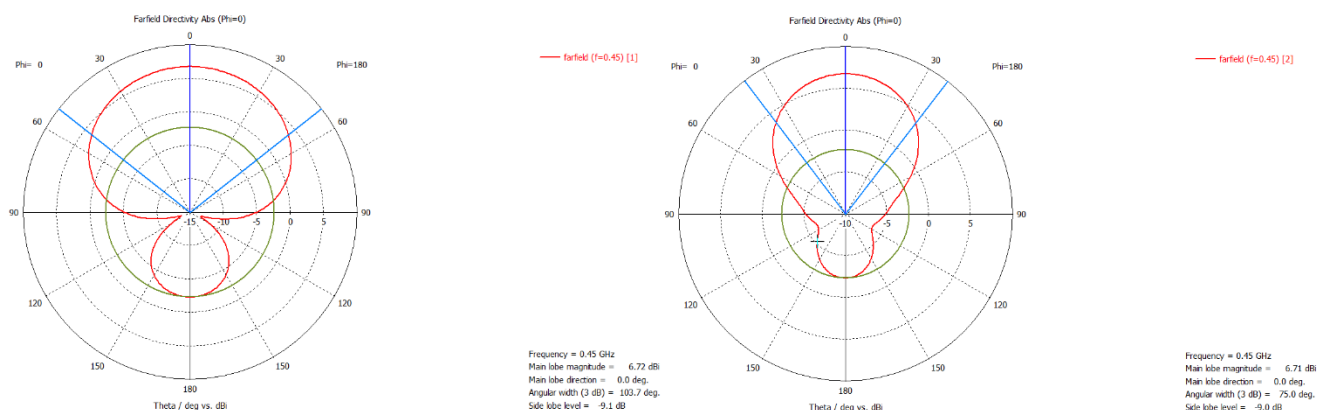


Рисунок 4.33 – ДС при $\phi = 0$ на частоті 450 МГц для двох входів антени

З наведених вище діаграм видно, що ширина головного пелюстка по ϕ є наступною: для першого входу живлення 74.9 градусів Н-площині та 103.7 градусів у Е-площині, для другого входу живлення 103.8 градусів Н-площині та 75 градусів у Е-площині.

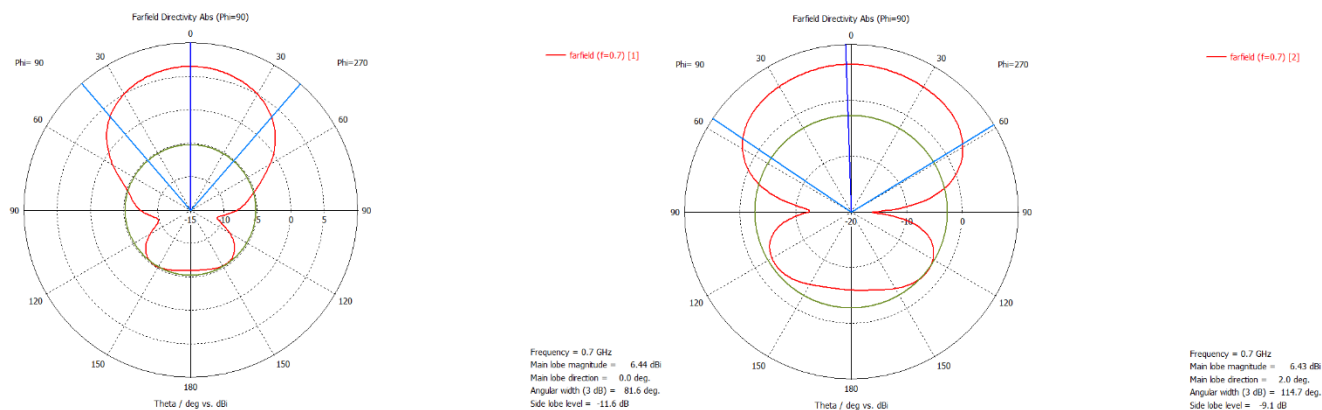


Рисунок 4.34 – ДС при $\phi = 90$ на частоті 700 МГц для двох входів антени

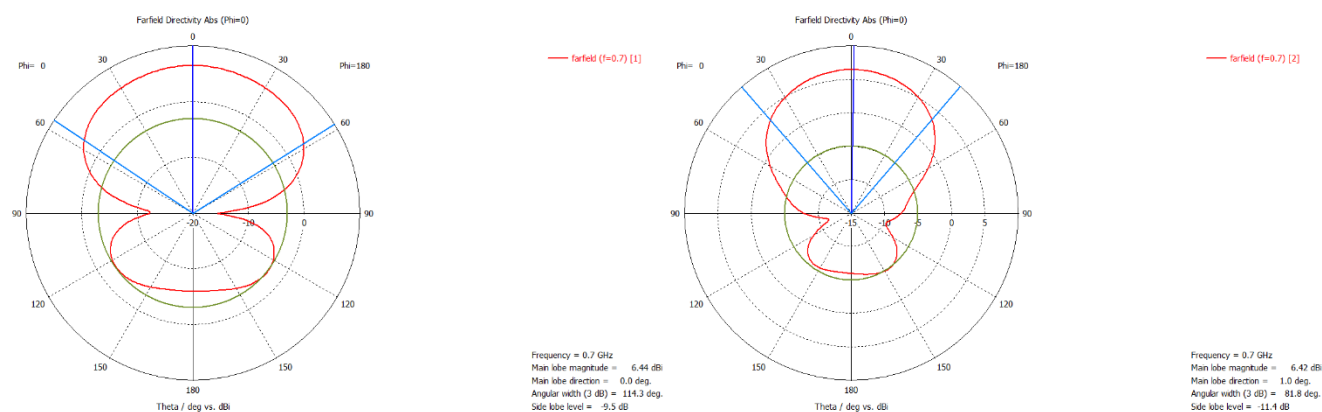


Рисунок 4.35 – ДС при $\phi = 0$ на частоті 700 МГц для двох входів антени

З діаграм видно, що ширина головного пелюстка по ϕ є наступною: у Н-площині для першого порта живлення 81.6 градусів та 114.3 градусів у Е-площині, у Н-площині для другого порта живлення 114.7 градусів у Н-площині та 81.8 градусів у Е-площині.

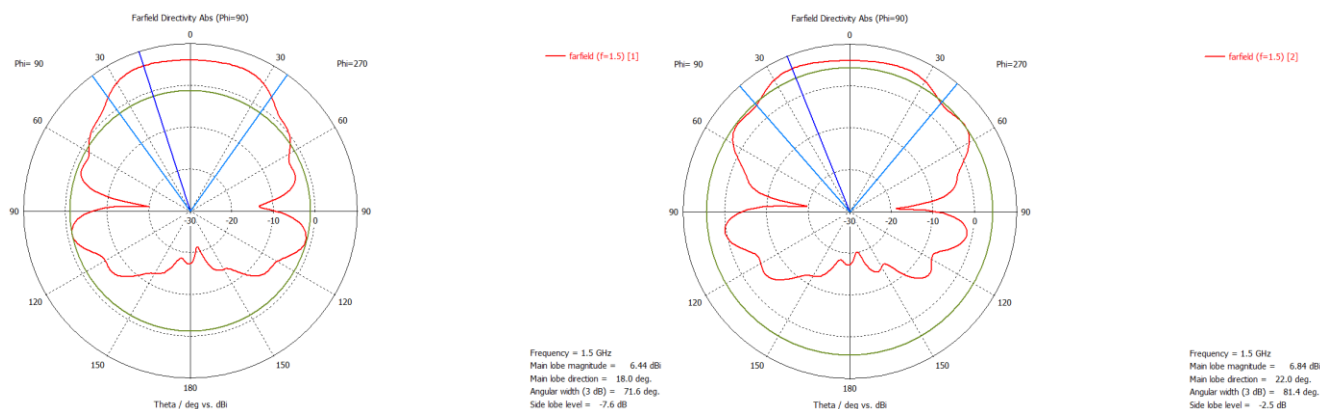


Рисунок 4.36 – ДС при $\varphi = 90$ на частоті 1.5 ГГц для двох входів антени

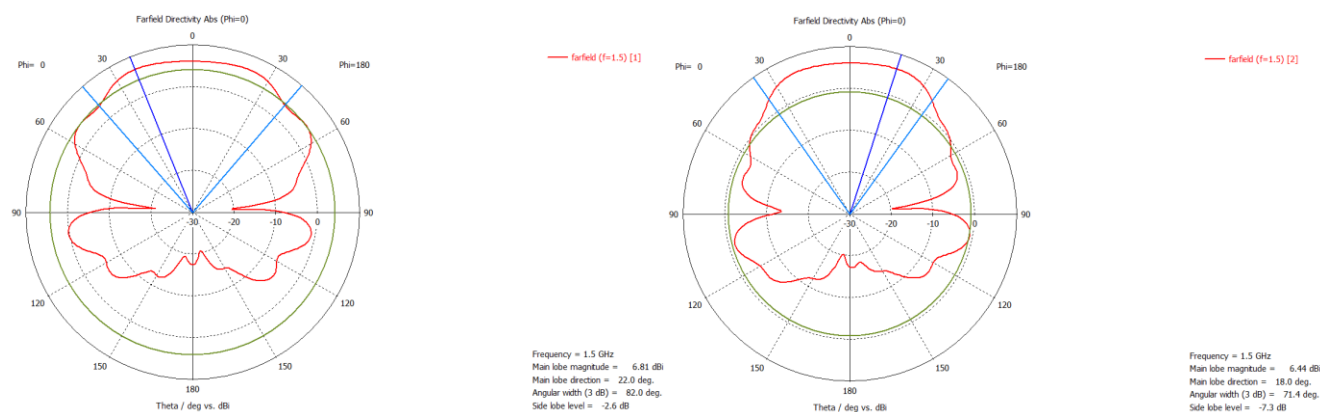


Рисунок 4.37 – ДС при $\varphi = 0$ на частоті 1.5 ГГц для двох входів антени

З діаграм можна побачити, що ширина головного пелюстка по φ є наступною: для першого входу живлення 71.6 градусів у Н-площині та у Е-площині 82 градусів, для другого входу живлення 81.4 градусів у Н-площині та у Е-площині 71.4 градусів.

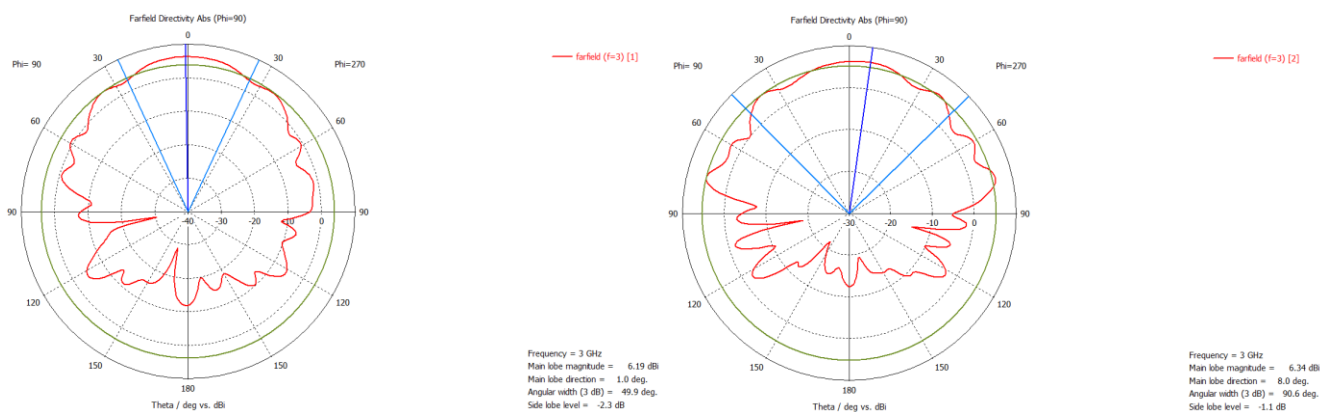


Рисунок 4.38 – ДС при $\varphi = 90$ на частоті 3 ГГц для двох входів антени

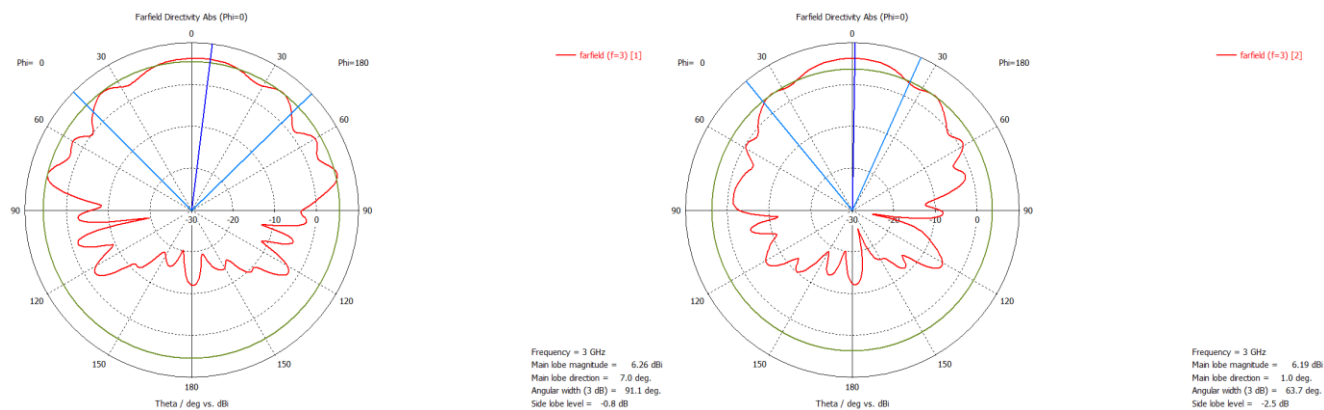


Рисунок 4.39 – ДС при $\phi = 0$ на частоті 3 ГГц для двох входів антени

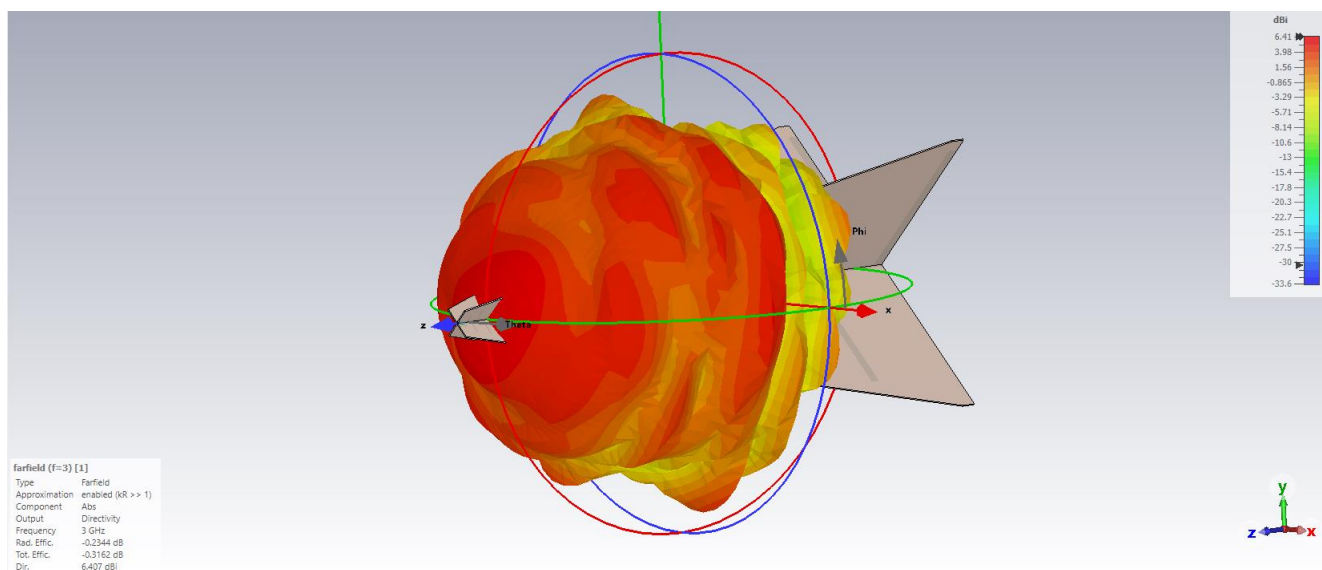


Рисунок 4.40 – ДС у 3Д зображенні

З діаграм видно, що ширина головного пелюстка по ϕ є наступною: для першого порта 49.9 градусів у Н-площині та 91.1 градусів у Е-площині, для другого порта 90.6 градусів у Н-площині та 63.7 градусів у Е-площині.

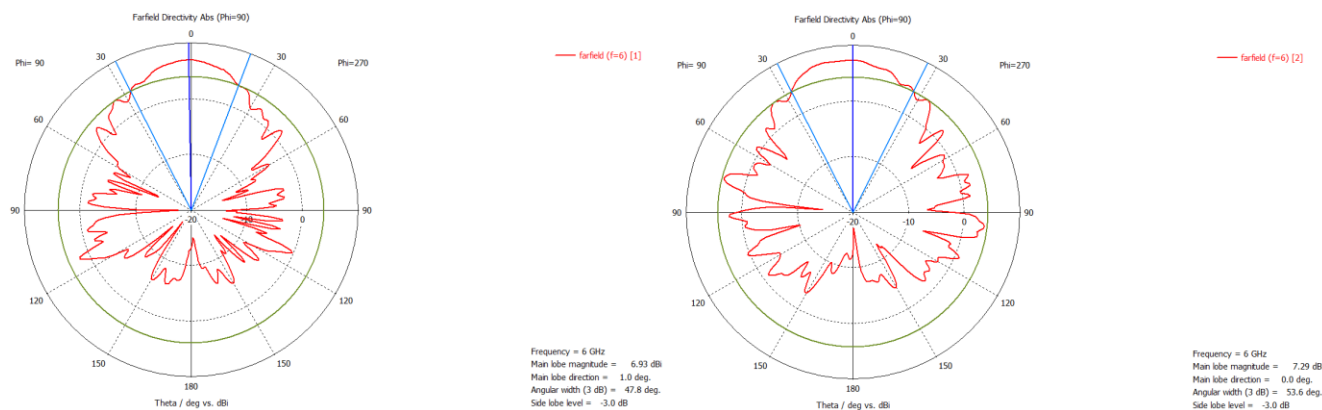


Рисунок 4.41 – ДС при $\phi = 90$ на частоті 6 ГГц для двох входів антени

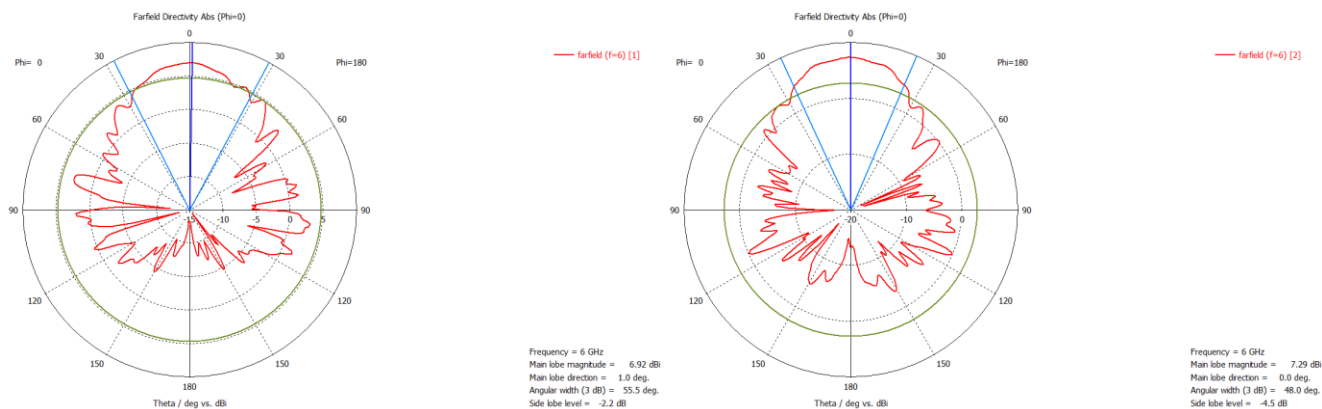


Рисунок 4.42 – ДС при $\varphi = 0$ на частоті 6 ГГц для двох входів антени

Можна побачити, що ширина головного пелюстка по φ є наступною: для першого входу живлення у Н-площині 47.8 градусів та 55.5 градусів у Е-площині, для другого входу живлення у Н-площині 53.6 градусів та 48 градусів у Е-площині.

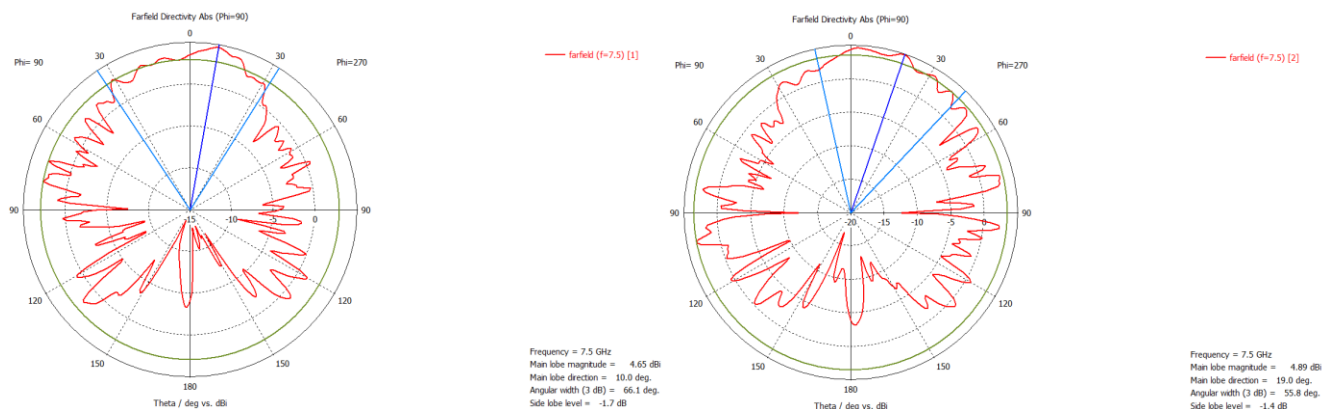


Рисунок 4.43 – ДС при $\varphi = 90$ на частоті 7.5 ГГц для двох входів антени

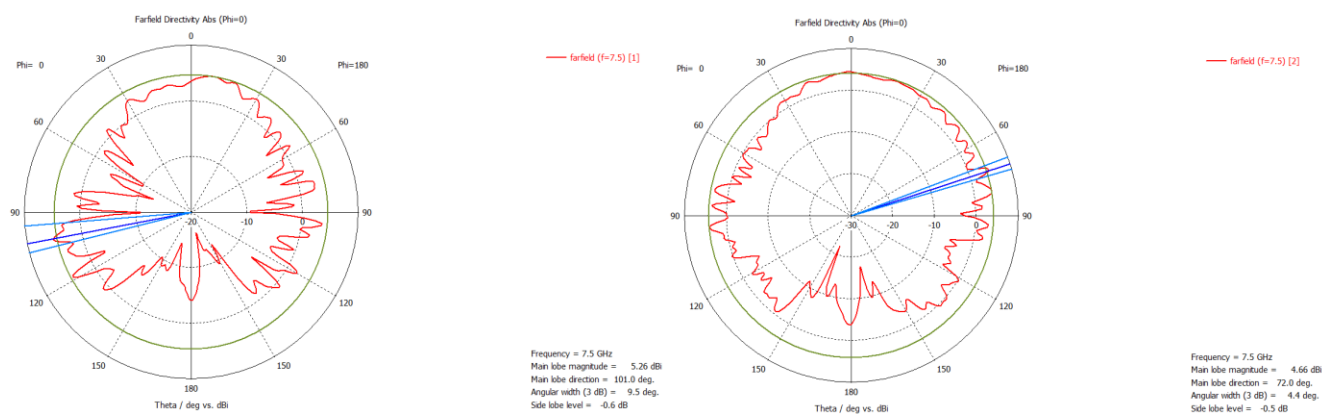


Рисунок 4.44 – ДС при $\varphi = 0$ на частоті 7.5 ГГц для двох входів антени

З діаграм видно, що ширина головного пелюстка по φ є наступною: для першого порта живлення 66.1 градусів у Н-площині та близько 60 градусів у Е-

площині, для другого порта живлення 55.8 градусів у Н-площині та близько 53 градусів у Е-площині.

Таблиця 4.3 – Ширина головного пелюстка, коефіцієнт підсилення та рівень бічних пелюсток для порта 1 та 2 при $\varphi = 90$ та $\varphi = 0$ в залежності від частоти

Частота , ГГц	$\varphi = 90$						$\varphi = 0$					
	Ширина головного пелюстка, °		Коефіцієнт підсилення, дБі		Рівень бічних пелюсток, дБ		Ширина головного пелюстка, °		Коефіцієнт підсилення, дБі		Рівень бічних пелюсток, дБ	
	Порт 1	Порт 2	Порт 1	Порт 2	Порт 1	Порт 2	Порт 1	Порт 2	Порт 1	Порт 2	Порт 1	Порт 2
0,45	74,9	104	6,72	6,71	-9,1	-9	104	75	6,72	6,71	-9,1	-9
0,7	81,6	115	6,44	6,43	-12	-9,1	114	81,8	6,44	6,42	-9,5	-11
1	61,8	72	7,98	7,97	-11	-3,8	71,7	62	7,98	7,96	-4	-11
1,5	71,7	81,4	6,44	6,84	-7,6	-2,5	82	71,4	6,81	6,44	-2,6	-7,3
2	54,8	67,2	9,17	9,19	-16	-5,3	67,6	54,5	9,17	9,17	-5,5	-14
3	49,9	90,6	6,19	6,34	-2,3	-1,1	91,1	63,7	6,26	6,19	-0,8	-2,5
4	83,1	104	5,02	5,11	-6,2	-1	103	83,3	5,37	4,91	-0,8	-5,5
5	28,8	43,5	7,56	6,97	-2,5	-1,9	29,1	43,6	7,56	6,98	-1,9	-3
6	47,8	53,6	6,93	7,29	-3	-3	55,5	48	6,92	7,29	-2,2	-4,5
7,5	66,1	55,8	4,65	4,89	-1,7	-1,4	60	53	5	4,8	-0,6	-0,5

Підсилення антени належить проміжку 4.65 – 9.19 дБ. Проаналізувавши дані з таблиці 4.3, варто зазначити, що ширина головного пелюстка та коефіцієнт підсилення 1 порта при $\varphi = 90$ майже аналогічна ширині головного пелюстка та коефіцієнту підсилення 2 порта при $\varphi = 0$.

Висновки до розділу 4

У даному розділі розглянуто процес проектування та оптимізації двополяризованої логіперіодичної дипольної антени, адаптованої для роботи з різними типами поляризації: вертикальною, горизонтальною та коловою. Запропонована конструкція базується на використанні друкованої плати з матеріалу RO4350B.

Проведений аналіз показав, що для забезпечення колової поляризації важливим фактором є вибір коефіцієнта перекриття логіперіодичної антени, досяжним значенням якого є 2, що дозволяє досягти коефіцієнта еліптичності

близько 5 дБ. Забезпечення колової поляризації на всьому ультраширокопосмуговому діапазоні від 400 МГц до 6 ГГц (з коефіцієнтом перекриття 15) практично неможливе, оскільки існують обмеження, пов'язані з деградацією коефіцієнта еліптичності на вищих частотах.

Також у даному розділі було розглянуто проектування подвійно поляризованої логоперіодичної антени на друкованій платі, яка базується на принципі взаємно перпендикулярного розташування диполів. Робочий частотний діапазон антени охоплює спектр від 0.45 до 7.5 ГГц, забезпечуючи підсилення у межах 5 – 9.19 дБ для діапазону частот 0.45 – 6 ГГц.

Запропонована подвійно поляризована логоперіодична антена на РСВ має просту конструкцію, яка може бути реалізована за допомогою стандартних технологій виготовлення друкованих плат. Використання доступних матеріалів, таких як діелектричний матеріал Rogers і автоматизованих процесів забезпечує мінімальні витрати ресурсів при виробництві. Це робить антену перспективною для практичного застосування в широкому частотному діапазоні.

5. СТВОРЕННЯ ГЕРБЕР ФАЙЛІВ ДЛЯ ПОДВІЙНО ПОЛЯРИЗОВАНОЇ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ АНТЕНИ

5.1 Розробка гербер файлів для антени

У цьому розділі розглядаються процес розробки гербер-файлів для виготовлення подвійно поляризованої логоперіодичної антени (ЛПВА) на друкованій платі.

Формат Gerber є стандартом для опису конструкції друкованих плат і використовується для передачі інформації про мідні шари, паяльну маску, легенду, дані про свердління тощо. Цей формат є основою для виготовлення друкованих плат, оскільки забезпечує точність передачі конструкції плати на виробниче обладнання, зокрема фотоплотери, принтери та машини для автоматичного оптичного контролю [20]. Гербер-файли створюються за допомогою програмного забезпечення автоматизованого проектування (CAD) і містять дані для кожного шару плати, а також для виготовлення трафаретів і розміщення компонентів.

Антену буде використовуватись в помірному і холодному макрокліматичних районах. А особливо на відкритому повітрі, під навісом та в лабораторіях, капітальних житлових та інших, подібного типу приміщеннях.

Плати будуть двосторонніми, оскільки металізація буде присутня на обох їхніх сторонах. Як відомо з попередніх розділів, матеріалом для виготовлення обрано RO4350B товщиною 1.524 мм через його низькі втрати на високих частотах.

Провідникові доріжки проектувались з точністю до 0.1 мм, тому клас точності виготовлення – 5.

Послідовність етапів для розробки гербер-файлів:

1. Створення двох проектів CST Studio. В проектах знаходиться по одній платі (під час виготовлення вони будуть розташовуватись та з'єднуватись перпендикулярно одна відносно одної)

2. Готовий проект CST експортується у форматі DXF, при цьому здійснюється вивантаження вибраного шару відповідно до заданої системи координат (шарів декілька).

3. У програмному забезпеченні Altium Designer виконується імпорт наданого файлу DXF із дотриманням заданих розмірів. У процесі імпорту необхідно вибрати одиниці вимірювання (міліметри, мікрони тощо) та вказати шари, які слід включити.

4. На робочій панелі обирається шар Keep-Out Layer, після чого на панелі інструментів активується команда Place → Line для створення контуру плати. Перед виконанням цього кроку рекомендується налаштувати параметри ліній у вкладці Design → Rules.

5. Виділяються усі лінії, які утворюють контур антени на шарі Keep-Out Layer, і виконується команда Design → Board Shape → Define Board Shape from Selected Objects. Ця дія створить друковану плату з діелектрика.

6. Далі обираємо тип шару, на який було імпортовано файл DXF (антена складається з двох DXF-файлів: верхнього та нижнього шару). За основу використовується Top Layer. Після цього переходимо до Place → Solid Region і заповнюємо металізацією область всередині контуру антени.

7. Імпортуємо наступний DXF-файл на інший шар, вирівнюємо його відносно попереднього DXF, після чого повторюємо процедуру, описану в пункті 5.

8. Переходимо до File → Fabrication Outputs → Gerber Files для генерації гербер файлів. Потім вибираємо File → Fabrication Outputs → NC Drill Files для створення файлів свердління. У даному проєкті отвори для свердління відсутні, але цей крок виконується за їхньої наявності.

Гербер файл було розроблено з урахуванням вирізу по центру діелектрика на половину довжини діелектричної підкладки для надійного монтажу антени.

На рис. 5.1 можна побачити результат створення файлів для виготовлення двох половинок антен. Для збірки конструкції потрібно виконати наступні кроки:

1. Створити виріз в діелектрику по центру зверху на 305 мм (рис. 5.1 а, б) в першій платі, в наступній – знизу (рис. 5.1 в).

2. Вставити одну плату в іншу в спеціально підготовлені вирізи під кутом 90°.

3. З'єднати центральні провідникові доріжки плат за допомогою пайки для забезпечення більш надійного електричного контакту та підвищення механічної міцності конструкції.

4. Створити отвори та забезпечити підключення живлення до антени.

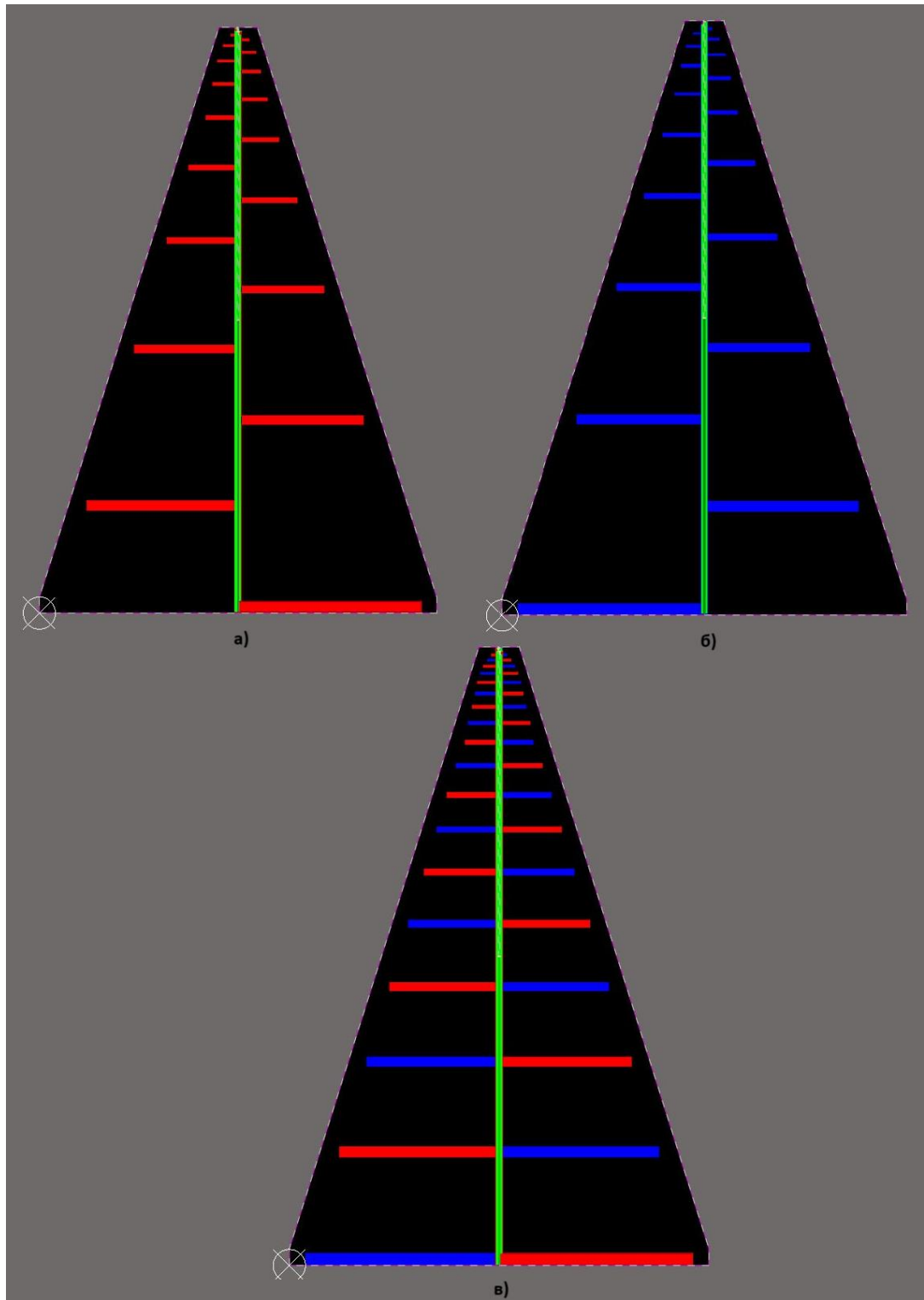


Рисунок 5.1 – Вигляд гербер файлів двох діелектричних підкладок з обох сторін (а, б) та комбіноване представлення обох сторін (в)

Висновки до розділу 5

У цьому розділі було детально розглянуто процес розробки гербер файлів для виготовлення подвійно поляризованої логоперіодичної антени на друкованій платі.

У процесі роботи були виконані ключові етапи, серед яких: імпорт моделі антени з CST Studio до Altium Designer, визначення шарів та контурів плати, заповнення металізацією, генерація гербер файлів і створення документації (файлів) для виготовлення.

Результатом є створення готового комплекту гербер файлів для двосторонніх плат на основі діелектрика RO4350B. Зважаючи на те, що розмір плати для виготовлення становить 610x414 мм, вибір діелектричного матеріалу RO4350B із розміром 610x457 мм є оптимальним рішенням. Це пояснюється мінімізацією відходів матеріалу при різанні, що забезпечує економічну ефективність. Крім того, стандартний розмір матеріалу відповідає вимогам технологічного процесу виготовлення друкованих плат, що робить його зручним для одиничного або дрібносерійного виробництва.

Таким чином, розробка гербер файлів успішно завершена, а отримані результати готові до практичної реалізації та подальшого тестування антени в реальних умовах експлуатації.

6. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

6.1 Опис ідеї проекту

Ідея проекту полягає у розробці подвійно поляризованої логоперіодичної антени на друкованій платі для застосувань у сфері бездротового зв'язку та радіолокації. На ринку представлено багато таких антен, але вони громіздкі та мають меншу робочу смугу частот. Деякі дешевші моделі не забезпечують стабільних характеристик, що обмежує їх використання.

Метою цього проекту є створення ефективного та універсального рішення, яке матиме високі технічні характеристики, водночас залишаючись економічно доступним.

Таблиця 6.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка подвійно поляризованої логоперіодичної антени на РСВ, що забезпечує високу ефективність роботи	1. РР 2. Системи бездротової передачі даних (5G, 4G, 3G, 2G)	1. Компактні розміри 2. Мала вага

Оцінка потенційних техніко-економічних переваг ідеї у порівнянні з конкурентними пропозиціями включає:

Таблиця 6.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ n/ n	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
1.	Діапазон частот	0.45 – 7.5 ГГц	0.3 – 3 ГГц	0.1 – 0.5 ГГц	0.8 – 3 ГГц	Підсилення антени	Схильна до механічних пошкоджень	Широкий діапазон частот

2.	Вага антени, кг	0.5	1.2	16	0.8	Аеродинамічний опір	Прийнятна для стаціонарних або напівмобільних систем	Оптимальна для забезпечення стабільності та міцності конструкції
----	-----------------	-----	-----	----	-----	---------------------	--	--

6.2 Технологічний аудит проекту

Таблиця 6.3 Технологічна реалізованість проектної ідеї

№ n/n	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Антенa	Хімічний метод	Наявна	Доступна
2	Антенa	Електрохімічний метод	Наявна	Доступна
3	Антенa	Комбінований метод	Наявна	Доступна
4	Антенa	Адаптивний метод	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Для реалізації проекту найбільш доцільно використовувати комбінований метод.				

6.3 Аналіз ринкових можливостей стартап проекту

Аналіз ринкових можливостей, які можна використати для впровадження проекту, та загроз, що можуть завадити його реалізації, допомагає визначити напрями розвитку проекту з урахуванням поточного стану ринкового середовища, потреб потенційних споживачів і конкурентних пропозицій.

Спершу здійснюється аналіз попиту, який включає оцінку його наявності, обсягу та динаміки розвитку ринку (таблиця 6.4).

Таблиця 6.4 Попередній аналіз характеристик потенційного ринку стартап-проекту

№ n/n	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість основних учасників ринку, од.	>4
2	Загальний обсяг реалізації, грн/ум. од	2500
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає

4	Бар'єри для входу на ринок	Немає
5	Особливі вимоги до стандартизації та сертифікації	Продукція має відповідати визначеним стандартам
6	Середній рівень рентабельності в галузі (або на ринку), %	79

Середній показник рентабельності в галузі вищий, ніж банківський відсоток тому інвестувати кошти в даний проєкт доцільно.

На основі аналізу наведеної таблиці можна зробити попередній висновок, що ринок є перспективним і привабливим для входження.

На наступному етапі визначаються потенційні категорії клієнтів, їх особливості, а також складається попередній список вимог до товару для кожної групи (таблиця 6.5).

Таблиця 6.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

№ n/n	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Бездротова передача даних	Оборонні компанії, національні військові сили, телекомунікаційні компанії	Усі клієнти приділяють увагу технічним і механічним характеристикам продукту.	Підсилення антен, частотний діапазон, розміри, вага, міцність Своєчасне виконання замовлення та оперативна доставка клієнту.

Після ідентифікації потенційних груп клієнтів здійснюється аналіз ринкового середовища. Для цього складаються таблиці, які містять фактори, що сприяють ринковому впровадженню проєкту та фактори, які можуть створювати перешкоди (таблиця 6.6 - 6.7). Фактори у таблицях розташовуються за ступенем зменшення їх значущості.

Таблиця 6.6 Фактори загроз

№ n/n	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Надійність механізмів	Виріб схильний до механічних пошкоджень	Вдосконалення виробу/умов експлуатації

2	Новий гравець на ринку	Недовіра до виробника, який тільки виходить на ринок	Пояснення покупцям за переваги антени, завоювання довіри
3	Високі витрати на виробництво	Виробничі витрати можуть зробити продукт менш конкурентоспроможним	Оптимізація виробничого процесу та пошук дешевших матеріалів

Таблиця 6.7 Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Попит на багатофункціональні антени	Клієнти шукають антени з широким діапазоном частот і подвійною поляризацією	Розробляти універсальні антени для задоволення різних потреб
2	Зростання ринку бездротових технологій	Розширення мереж 5G,4G та IoT	Орієнтуватися на нові ринки
3	Розширення застосування антен	Зростає попит на антени для радіолокації, зв'язку та телеметрії	Розширювати асортимент продукції для різних напрямків

Далі здійснюється аналіз пропозиції, який включає визначення загальних характеристик конкуренції на ринку.

Таблиця 6.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Тип конкуренції - чиста	Цей ринок не привабливий для великих компаній, тому менші виробники можуть легко зайти на ринок	Підвищувати якість продукції та пропонувати унікальні особливості антен
2. За рівнем конкурентної боротьби - міжнародний, локальний	Широка географія потенційних клієнтів	Шукати клієнтів у різних країнах і розвивати партнерства на світовому рівні
3. За галузевою ознакою - міжгалузева	Потенційні клієнти представлені у різних галузях	Співпрацювати з компаніями в різних галузях, таких як телекомунікації, оборона, IoT
4. Конкуренція за видами товарів - товарно-видова	Продукт конкурує з іншими антенами того ж виду, але має унікальні особливості	Пропонувати різноманітні конфігурації антен (наприклад, різні розміри або діапазони частот)
5. За характером конкурентних переваг - цінова/нецінова	Баланс між доступною ціною та перевагами	Використовувати низьку собівартість виробництва в Україні, щоб пропонувати доступні ціни

6. За інтенсивністю - не марочна	Створення впізнаваного бренду може стати перевагою в довгостроковій перспективі	Розробити потужний бренд і просувати його на ринку
----------------------------------	---	--

Після проведення аналізу конкурентів здійснюється глибоке дослідження умов конкурентної боротьби.

Таблиця 6.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
Складові аналізу	SCHWARZBEC K	ALARIS	Своєчасна доставка та висока якість матеріалів	Оборонні компанії, національні військові сили, телекомунікаційні компанії	Не існує
Аналіз	Конкуренти вже мають стабільну клієнтську базу та високий рівень довіри на ринку, що створює складнощі для нових гравців	Потенційні конкуренти з'являються рідко, проте їх не можна виключати з уваги	Умови співпраці з постачальниками значною мірою визначаються вимогами ринку	Клієнти зацікавлені в антенах, які можуть відповідати різноманітним задачам, що вимагає широкого асортименту	Товарів-замінників у цій категорії не існує

Вихід на ринок зі своїми антенами цілком можливий, але компанія повинна мати достатнє фінансування для проведення нових досліджень і впровадження інноваційних функцій у свої вироби.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в таблиці 6.9, а також з урахуванням характеристик проектної ідеї (таблиця 6.2), вимог споживачів до продукту (таблиця 6.5) і впливу факторів маркетингового середовища (таблиця 6.6 – 6.7), формується та обґрунтовується перелік ключових факторів конкурентоспроможності. Результати аналізу подаються у таблиці 6.10.

Таблиця 6.10 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
1	Ціна	Виробництво антен в Україні дозволяє запропонувати вироби за нижчою ціною порівняно з конкурентами.
2	Технологічність	Антену повинна бути простою у виробництві та монтажі, забезпечуючи стабільну роботу без відмов.
3	Якість	Високі експлуатаційні характеристики забезпечують надійність навіть у складних умовах.
4	Адаптивність	Можливість налаштування антени для різних задач, що розширює спектр застосувань.

На основі визначених факторів конкурентоспроможності (таблиця 6.10) здійснюється аналіз сильних і слабких сторін стартап-проекту, таблиця 6.11.

Таблиця 6.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Бали 1-20</i>	<i>Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з SCHWARZBECK</i>						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Ціна	15						1	
2	Технологічність	16					2		
3	Особливості	16						1	

Завершальним етапом ринкового аналізу можливостей реалізації проекту подвійно поляризованої логоперіодичної антени є проведення SWOT-аналізу. Ця матриця аналізує сильні та слабкі сторони, можливості та загрози (таблиця 6.12), спираючись на визначені ринкові загрози та можливості, а також сильні і слабкі сторони проекту (таблиця 6.11).

Ринкові загрози та можливості формуються на основі аналізу факторів загроз і можливостей маркетингового середовища. Вони є прогнозованими наслідками впливу цих факторів і ще не реалізовані на ринку, а отже, мають певну ймовірність виникнення.

Наприклад, орієнтація клієнтів на антенні системи з інноваційними характеристиками виступає фактором можливості, який може стимулювати зростання попиту на продукт. Водночас, відсутність репутації серед споживачів є фактором загрози, що може ускладнити швидке завоювання ринку. SWOT-аналіз дозволяє врахувати ці аспекти, визначити ключові виклики та розробити стратегії для ефективного виходу на ринок.

Таблиця 6.12 SWOT- аналіз стартап-проекту

<i>Сильні сторони</i>	<i>Слабкі сторони</i>	<i>Можливості</i>	<i>Загрози</i>
Висока конкурентоспроможна ціна	Система потребує додаткового доопрацювання та модернізації	Залучення нових клієнтів завдяки доступній ціні, широкому частотному діапазону та надійності	Можливість не сформувати достатню клієнтську базу
Широкий частотний діапазон	Обмежена впізнаваність бренду на ринку	Розширення застосувань, наприклад, у сфері IoT, телекомунікацій та оборонних технологій	Висока конкуренція на ринку
Технологічність та простота виробництва	Недостатня довіра до нового виробника	Створення репутації через надання якісних та інноваційних рішень	Вплив економічних умов на попит

На основі проведеного SWOT-аналізу формуються альтернативні стратегії ринкової поведінки (перелік заходів) для успішного виведення стартап-проекту на ринок. Також визначається орієнтовний оптимальний час реалізації цих заходів з урахуванням можливих дій конкурентів і їхніх потенційних проектів, які можуть бути представлені на ринку (див. таблицю 6.9, аналіз конкурентів).

Розроблені альтернативи оцінюються з урахуванням строків реалізації та ймовірності доступу до необхідних ресурсів (таблиця 6.13).

Таблиця 6.13 Альтернативні стратегії ринкового впровадження стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Залучення спонсорів	Невисока	До 5 років
2	Отримання державного фінансування	Невисока	До 10 років
3	Краудфандинг	Середня	До 2 років
4	Партнерство з комерційними компаніями	Висока	До 2 років

Найвірогіднішим способом залучення фінансування є краудфандинг, який може забезпечити сприятливі умови для розвитку.

6.4 Створення ринкової стратегії

Першим етапом у створенні ринкової стратегії є визначення підходу до охоплення ринку, що включає опис цільових груп потенційних клієнтів.

Таблиця 6.14 Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ n/n</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1	Вищі навчальні заклади	Середня	Середній	Помірна	Проста
2	Приватні компанії	Висока	Високий	Висока	Проста
3	Державні організації, включаючи оборонні підприємства	Висока	Середній	Висока	Складна
Цільовими групами обрано державні організації та приватні телекомунікаційні компанії.					

Для діяльності в обраних сегментах ринку потрібно розробити основну стратегію розвитку, таблиця 6.15.

Таблиця 6.15 Формулювання основної стратегії розвитку

<i>№ n/n</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>
1	Краудфандинг	Диференційований маркетинг	Технологічність, інновації, ціна	Стратегія диференціації

Наступним етапом є визначення стратегії конкурентної поведінки.

Таблиця 6.16 Формування основної стратегії конкурентної поведінки

<i>№ n/n</i>	<i>Чи є проект «періопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки*</i>
1	Ні	Так	Так, частково, адаптація перевірених рішень конкурентів під специфіку ринку.	Стратегія наслідування лідера

На основі вимог споживачів з обраних ринкових сегментів до постачальника (стартап-компанії) та продукту (див. таблиця 6.5), а також з урахуванням обраної базової стратегії розвитку, таблиця 6.15, та стратегії конкурентної поведінки (таблиця 6.16) формується стратегія позиціонування (таблиця 6.17). Вона передбачає створення ринкової позиції (комплексу асоціацій), за якими споживачі будуть ідентифікувати торговельну марку або проект.

Таблиця 6.17 Визначення стратегії позиціонування

<i>№ n/n</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1	Компактність, надійність, ціна	Стратегія диференціації	Компактність, надійність	Надійність, компактність, інноваційність

Результатом роботи цього підрозділу є розроблена узгоджена система рішень щодо ринкової стратегії стартап-компанії, яка окреслюватиме основні напрями її діяльності на ринку.

6.5 Розроблення маркетингової концепції стартап-проекту

Першим етапом є розробка маркетингової концепції продукту, який буде запропонований споживачам. Для цього у таблиці 6.18 слід узагальнити результати проведеного аналізу конкурентоспроможності продукту.

Таблиця 6.18 Визначення основних переваг концепції майбутнього продукту

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	Забезпечити стабільну бездротову передачу даних	Подвійна поляризація та надширокий частотний діапазон	Подвійна поляризація, надширокий частотний діапазон, доступна ціна

Наступним етапом є визначення цінових меж, які слід враховувати при встановленні вартості майбутнього продукту (остаточна ціна визначається під час фінансово-економічного аналізу проекту). Це включає аналіз цін на аналогічні

товари або замінники, а також оцінку рівня доходів цільової аудиторії споживачів (таблиця 6.20). Аналіз здійснюється за допомогою експертного методу.

Таблиця 6.20 Визначення меж встановлення ціни

<i>№ n/n</i>	<i>Рівень цін на товари-замінники</i>	<i>Рівень цін на товари-аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
1	Антени компанії SCHWARZBECK	700-900 у.о.	Від 1000-15000 у.о.	600-750 у.о.

Наступним етапом є розробка оптимальної системи збуту, що включає прийняття рішень (таблиця 6.21):

- здійснювати збут самостійно або залучати сторонніх посередників (власна чи зовнішня система збуту);
- визначення та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування типу посередників.

Таблиця 6.21 Формування системи збуту

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Клієнти надають перевагу прямим контактам із виробником	Доставка, технічна підтримка, персоналізовані консультації	Виробник та логістична компанія	Інтернет- магазин та пряма співпраця

Останнім етапом маркетингової програми є створення концепції маркетингових комунікацій, яка базується на раніше визначеній основі позиціонування та специфіці поведінки клієнтів.

Таблиця 6.22 Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
1	Орієнтовані на функціональність і надійність	Соцмережі, професійні платформи, email- розсилки	Технологічність і надійність	Зацікавити потенційних клієнтів	Надійність і технології за розумною ціною

Результатом є маркетингова програма, яка охоплює концепції товару, збуту, просування та попередній аналіз можливостей ціноутворення.

Висновки до розділу 6

Розробка стартап-проекту подвійно поляризованої логоперіодичної антени демонструє високий потенціал завдяки її унікальним характеристикам, таким як надширокий частотний діапазон, подвійна поляризація, компактність і доступна ціна. Ці переваги дозволяють задовольнити потреби різних ринкових сегментів, зокрема телекомунікаційних компаній, оборонних підприємств.

Проведений SWOT-аналіз показав, що головними сильними сторонами проекту є технологічність, інноваційність та конкурентна ціна, тоді як основними викликами залишаються необхідність подолання бар'єрів довіри до нового бренду та конкуренція на ринку. Водночас ринкові можливості включають приваблення нових клієнтів завдяки гнучкості в адаптації продукту до різних завдань і розширенню сфер застосування антени.

Маркетингова програма, розроблена для стартапу, передбачає акцент на прямих комунікаціях із клієнтами через онлайн-канали, що дозволяє мінімізувати витрати на збут і забезпечити швидке отримання зворотного зв'язку.

Стартап має значний потенціал для виходу на міжнародний ринок завдяки високій універсальності продукту та його конкурентним характеристикам. Успіх проекту залежатиме від правильної стратегії позиціонування, акценту на унікальні переваги продукту та ефективної реалізації маркетингових комунікацій. Загалом, стартап має всі необхідні передумови для успішної реалізації та подальшого зростання.

ВИСНОВКИ

В ході роботи було досліджено способи розробки логоперіодичних антен на діелектричній підкладці та їх спосіб виготовлення. Також проведено аналіз існуючих аналогів подвійно поляризованих антен та розроблено стартап-проект для впровадження цих антен у сучасні РР і системи зв'язку. У процесі електродинамічного моделювання для оптимізації характеристик логоперіодичних антен на діелектричній підкладці ключовими параметрами є: ϵ , τ і σ (враховуючи задану смугу пропускання та коефіцієнт підсилення), ширина несучого полотна, довжина продовження несучого полотна, також для двопортової подвійно поляризованої антени – відстань між портами живлення. Особливу увагу також слід приділяти характеристикам діелектричної підкладки, зокрема її втратам на робочих частотах.

У рамках роботи було розроблено та спроектовано кілька типів логоперіодичних антен із різними характеристиками.

Штиркова логоперіодична антена:

- Робочий діапазон частот: 0,4 – 6 ГГц.
- Підсилення: 7,5 – 8,86 дБ.
- Узгодження: $S_{11} < -10$ дБ.
- Розміри: 687×380×13 мм.

Логоперіодична антена на діелектричній підкладці:

- Робочий діапазон частот: 0,35 – 6 ГГц.
- Підсилення: 6 – 7,78 дБ.
- Узгодження: $S_{11} < -10$ дБ.
- Розміри: 617×400×1,524 мм.

Однопортова логоперіодична антена з коловою поляризацією на РСВ:

- Робочий діапазон частот: 0,4 – 6 ГГц.
- Підсилення: 5,96 – 7,25 дБ.
- Коефіцієнт еліптичності: 5 – 7 дБ у діапазоні 400–700 МГц.

- Узгодження: $S_{11} < -10$ дБ (погіршення до -7 дБ при 4.44 ГГц, -8 дБ при 1.53 ГГц).
- Розміри: 615×414×414 мм.

Ультраширокосмугова подвійно поляризована логоперіодична антена на РСВ:

- Робочий діапазон частот: 0,45 – 6 ГГц.
- Підсилення: 5 – 9,19 дБ.
- Розміри: 610×414×414 мм.
- Узгодження: $S_{11} < -10$ дБ (для другого входу живлення погіршення до -6.5 дБ при 5.56 ГГц)
- Для даної антени були розроблені гербер-файли для її виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. LPDA-92 technical specifications [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://poynnting.tech/antennas/lpda-92/>.
2. Антени для радіомоніторингу та радіорозвідки [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://infozahyst.com/product/anteny/>.
3. C. Peixeiro, “Analise da antena log-periódica de dipolos,” Master’s thesis, Instituto Superior Técnico, February 1985.
4. T. Limpiti and A. Chantaveerod, “Design of a Printed Log-Periodic Dipole Antenna (LPDA) for 0.8-2.5 GHz Band Applications, electrical engineering/electronics, computer, telecommunications and information technology (ecti-con), 2016 13th international conference,” September 2016.
5. Guilherme Conde Vieira. Log-Periodic Dipole Antennas in Printed Circuit Technology / Guilherme Conde Vieira., 2018. – 128 с.
6. Z. Yang, H. Jingjian, W. Weiwei, and Y. Naichang, “A printed lpda antenna fed by a microstrip line to double sided parallel strip line from backside,” College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan, China, vol. 17, 2017.
7. G. Casula, P. Maxia, G. Mazzarella, and G. Montisci, “Design of a printed log-periodic dipole array for ultra-wideband applications,” Progress In Electromagnetics Research C, vol. 38, pp. 15–26, 2013.
8. Design and Optimization of Compact Printed Log-Periodic Dipole Array Antennas with Extended Low-Frequency Response / Keyur K. Mistry, Pavlos I. Lazaridis, Zaharias D. Zaharis, Tian Hong Loh. – 2021.
9. Almalkawi, M.J.; Cross, L.W.; Alshamaileh, K.A. A transmission line circuit-oriented approach for miniaturization of a logperiodic dipole array (LPDA) antenna. In Proceedings of the 2014 IEEE 57th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), College Station, TX, USA, 3–6 August 2014; pp. 73–76.

10. Anim, K.; Jung, Y.-B. Shortened Log-Periodic Dipole Antenna Using Printed Dual-Band Dipole Elements. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2018, 66, 6762–6771.
11. Chang, L.; He, S.; Zhang, J.Q.; Li, D. A Compact Dielectric-Loaded Log-Periodic Dipole Array (LPDA) Antenna. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2017, 16, 2759–2762.
12. Step-by-Step Guide to the Printed Circuit Board Manufacturing Process [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://jlcpcb.com/blog/step-by-step-guide-to-the-printed-circuit-board-manufacturing-process>.
13. О. М. Купрій. АНТЕНИ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ / О. М. Купрій, С. Є. Мартинюк, С. М. Літвінцев. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 42 с.
14. Rogers Printed Circuit Boards [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.pcbuniverse.com/pcbu-tech-tips.php?a=11>.
15. XSLP 9142 Dual Polarized UHF-SHF Broadband Log.-Per. Test-Antenna [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.schwarzbeck.com/Datenblatt/manx9142.pdf>.
16. XSLP 9143 Dual Polarized UHF-SHF Broadband Log.-Per. Test-Antenna [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://schwarzbeck.de/Datenblatt/kX9143.pdf>.
17. LPDA-A0157 Dual-Polarised LPDA Antenna [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://products.alaris.tech/storage/products/antennas/datasheets/325_LPDA0157Version1.2.pdf.
18. Yi Wang. Design of a Dual-polarization Log-periodic Antenna (LPDA) in PCB / Yi Wang, Linya Zhou. – 2019.
19. Fatma Müge Tanyer. Design of log-periodic dipole array feed and wide band reflector antenna system / Fatma Müge Tanyer., 2005.
20. Gerber format [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Gerber_format.