

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій
(повне найменування факультету)

Кафедра радіотехніки та телекомунікацій
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)
магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему ЛОГОПЕРІОДИЧНА АНТЕНА ДЛЯ ПРОТИДІЇ РЕБ

Виконав: студент 2 курсу, групи БК-912м

Спеціальності _____

172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація) _____

«Інформаційні мережі зв'язку»

РЕШЕТНИКОВ Олександр Олегович
(прізвище та ініціали)

Керівник БУГРОВА Тетяна Іванівна
(прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(прізвище та ініціали)

2023 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій
 Кафедра Радіотехніки та телекомунікацій
 Ступінь вищої освіти Магістр
 Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Інформаційні мережі зв'язку
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

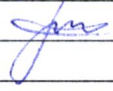
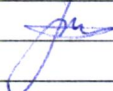
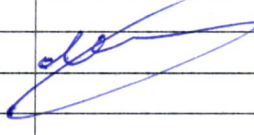
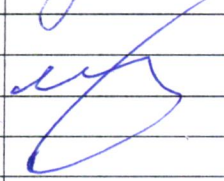
ТВО завідувача кафедри РТТ
 к.ф.-м.н., доц. Сергій САМОЙЛИК
 « » грудня 2023 року

СВ

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА
РЕШЕТНИКОВУ Олександр Олександровичу
 (ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Логоперіодична антена для протидії РЕБ
 керівник проєкту (роботи) к.т.н., доц. БУГРОВА Тетяна Іванівна
 (науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)
- затверджені наказом закладу вищої освіти від "14" листопада 2023 року № 443
2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 15 грудня 2023 року
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Здійснити електродинамічне моделювання логоперіодичних антен для протидії РЕБ на частотах від 360 МГц до 1,3 ГГц в середовищі HFSS. Оптимізувати антени для узгодження з портом живлення 50 Ом і для збільшення спрямованості.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Модернізувати конструкції логоперіодичних класичних та модифікованих для покращення показників їх узгодження (зниження коефіцієнта відбиття та коефіцієнта стоячої хвилі), і для поліпшення коефіцієнта підсилення. Дослідити ступінь впливу геометрії випромінювачів, місця розміщення екрану на вказані характеристики
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Презентація роботи в Microsoft PowerPoint

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

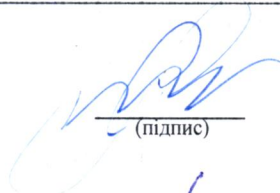
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-3	БУГРОВА Т.І., доцент каф. РТТ		
нормоконтроль	МОРОЗ Г.В., ст. викладач каф. РТТ		

7. Дата видачі завдання «20» жовтня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Огляд літератури та постановка задачі	2 тижні	виконано
2	Створення геометрії логоперіодичних антен в ansys hfss	1 тиждень	виконано
3	Дослідження характеристик спрямованості та узгодження логоперіодичних антен	2 тижні	виконано
4	Експериментальне дослідження спрямованих властивостей логоперіодичних антен	1 тиждень	виконано
5	Порівняння характеристик антен (розрахованих і виміряних)	3 тижні	виконано
7	Тестування розробки	1 тиждень	виконано
8	Оформлення ПЗ і презентації	1 тиждень	виконано
9	Захист роботи	1 день	виконано

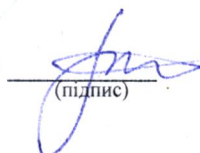
Студент(ка)



(підпис)

Олександр РЕШЕТНИКОВ
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)



(підпис)

Тетяна БУГРОВА
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 68 с., 5 табл., 45 рис., 13 джерел.

ЛОГОПЕРІОДИЧНА АНТЕНА, ДІАГРАМА СПРЯМОВАНOSTІ, МОДУЛЯ ВХІДНОГО ІМПЕДАНСУ, КОЕФІЦІЄНТ ПІДСИЛЕННЯ, КОЕФІЦІЄНТ СТОЯЧОЇ ХВИЛІ, HFSS, ВІБРАТОР, ПОРТ.

В роботі проводиться симуляція логоперіодичної антени з різними варіаціями модифікації для використання її в РЕБ та протидії РЕБ.

Метою роботи є проектування та дослідження широкосмугової планарної антени для її використання в РЕБ.

Наукова новизна полягає в тому, що за допомогою використання програмного пакету HFSS змодельовано логоперіодичні антени, які працюють в зазначених вище частотних діапазонах, досліджено їх діаграми спрямованості антени для резонаторів різних форм та частотні залежності КСХ, коефіцієнтів відбиття та комплексних імпедансів, що характеризують ступінь узгодження антен з пристроями живлення.

Практична цінність результатів роботи полягає в тому, що результати моделювання підтверджують можливість досягнення мети – використання однієї широкосмугової планарної антени. Зазначені властивості мають випромінюючі антени логоперіодичного типу.

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	9
1 Основні теоретичні відомості та постановка задач наукового дослідження....	11
1.1 Поняття радіоелектронної боротьби	11
1.2 Теоретичні відомості	22
1.3 Призначення антени.....	27
2 Аналіз логоперіодичних антен в середовищі HFSS та їх оптимізація	31
2.1 Моделювання логоперіодичних антен в середовищі Ansys HFSS	31
2.2 Поширення в площині підкладинки ближнього електромагнітного поля на різних частотах	34
2.2.1 Дослідження впливу екрану на формування ближнього поля класичної логоперіодичної антени в залежності від частоти	35
2.2.2 Дослідження впливу екрану на формування ближнього поля модифікованої логоперіодичної антени в залежності від частоти.....	37
2.2.3 Дослідження впливу розташування порту живлення на початку і на кінці антени на ефективність збудження ближнього поля	39
2.3 Дослідження ступеня узгодження антени з фідером в смузі частот	39
2.4 Діаграма спрямованості на різних частотах.....	43
2.4.1 Діаграма спрямованості класичної логоперіодичної антени	43
2.4.2 Діаграма спрямованості класичної логоперіодичної з екраном антени	43
2.4.3 Діаграма спрямованості модифікованої логоперіодичної антени ..	44
2.4.4 Діаграма спрямованості модифікованої логоперіодичної антени з екраном.....	44
2.4.5 Діаграма спрямованості модифікованої логоперіодичної антени зі змінним портом на частотах.....	45

2.5 Діаграма спрямованості в розрізі на різних частотах	45
2.5.1 Діаграма спрямованості в розрізі класичної логоперіодичної антени	45
2.5.2 Діаграма спрямованості в розрізі класичної логоперіодичної з екрану антени.....	46
2.5.3 Діаграма спрямованості в розрізі модифікованої логоперіодичної антени	46
2.5.4 Діаграма спрямованості в розрізі модифікованої логоперіодичної антени з екраном	47
2.5.5 Діаграма спрямованості в розрізі модифікованої логоперіодичної антени зі зміненим портом	47
2.6 Порівняння коефіцієнта підсилення	48
2.6.1 Класична логоперіодична антена	48
2.6.2 Класична логоперіодична антена з екраном	48
2.6.3 Модифікована логоперіодична антена	49
2.6.4 Модифікована логоперіодична антена зі зміненим портом підключення.....	50
2.6.5 Модифікована логоперіодична антена з екраном	51
2.6.6 Порівняння частотних характеристик антен.....	51
3 Фізичний експеримент. Макетування антени та її експериментальне дослідження	53
3.1 Опис ідеї дослідження та аналіз макету	53
3.2 Програмне забезпечення експерименту	54
3.3 Дослідження ДС	59
3.4 Порівняння експериментальних та розрахункових результатів для класичної логоперіодичної антени	60
3.5 Порівняння експериментальних та розрахункових результатів для модифікованої логоперіодичної антени.....	61

Висновки	66
Перелік джерел посилань	67

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

HFSS	–	High Frequency Structural Simulator
БПЛА	–	безпілотний літальний апарат
ДС	–	діаграма спрямованості
ЕМЕ	–	електромагнітної енергії
ЕМС	–	електромагнітного спектра
ЗС	–	Збройні Сили
КВ	–	коефіцієнт відбиття
КСХ	–	коефіцієнт стоячої хвилі
ЛПА	–	логоперіодична антена
РЕБ	–	радіоелектронна боротьба
РЕЗ	–	радіоелектронні засоби
РЕП	–	радіоелектронного придушення
СУ	–	системи управління
ЧНА	–	частотно-незалежна антена

ВСТУП

У сучасному світі, в якому технологічні інновації стрімко визначають наш спосіб життя та стають основою для вирішення великої кількості завдань, роль безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та систем радіоелектронної боротьби (РЕБ) вирішально зростає. За останні роки нам спостерігати вражаючий розвиток цих технологій, який перетворив спосіб, яким ми розуміємо і використовуємо аерокосмічні системи.

Одним із ключових аспектів ефективного функціонування БПЛА є висока якість зв'язку та надійність передачі даних. В той же час, РЕБ стає все більш важливим елементом для забезпечення захисту від сучасних технологічно орієнтованих загроз. Однак, незважаючи на досягнення, стоять перед викликами, пов'язаними з розширенням частотного спектру та електромагнітної інтерференції, що вимагає високотехнологічних рішень для подолання цих труднощів.

В цьому контексті логіперіодичні антени виступають як перспективне рішення для вирішення складних завдань забезпечення зв'язку та електронної захищеності. Здатність працювати в широкому частотному діапазоні робить їх особливо привабливими для використання у високотехнологічних системах, таких як БПЛА та РЕБ.

Мета даного дослідження полягає в проведенні обширної симуляції логіперіодичних антен з використанням різних видів вібраторів з метою подальшого вдосконалення систем керування БПЛА та РЕБ. Проєкт спрямований на вивчення та аналіз можливостей цих антен у плані оптимізації дальності передачі даних та забезпечення високого рівня захисту в умовах електромагнітної обстановки.

В даному контексті, застосування програмного пакету HFSS для моделювання логіперіодичних антен надає можливість глибокого аналізу їх характеристик, таких як діаграми спрямованості, частотні залежності коефіцієнтів

відбиття та комплексних імпедансів. Це дозволяє систематично вивчати вплив різних параметрів та конфігурацій на ефективність антен в різних частотних діапазонах.

Подальший аналіз результатів може виявити можливість використання логоперіодичних антен для вирішення реальних завдань у сферах РЕБ, надаючи нові можливості та переваги у високодинамічному військовому та цивільному середовищі.

В цій роботі важливо не лише розглянути технічні аспекти, але й визначити потенційні переваги застосування логоперіодичних антен в сучасних умовах. Збільшення дальності та ефективність зв'язку, а також забезпечення високого рівня захисту електронних систем – це ті завдання, які можуть бути вирішені завдяки використанню передових антенних технологій.

В подальших частинах цього дослідження будуть розглянуті деталі моделювання, отримані результати та їх можливі застосування для оптимізації системи РЕБ.

1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Поняття радіоелектронної боротьби

Відповідно до американської термінології, термін "РЕБ" використовується для опису радіоелектронної війни. Аналіз оперативних навчань, локальних воєн та збройних конфліктів у недавньому минулому свідчить про те, що РЕБ в армії США визнана ключовим інструментом інформаційного протистояння та основним компонентом інформаційних операцій.

Згідно з директивою Комітету начальників штабів США JP 3-13, РЕБ визначається як "... будь-які дії військ (сил), що включають використання електромагнітної енергії (ЕМЕ) і засобів спрямованої енергії для безпосереднього впливу на противника і використовуваним ним випромінюванням електромагнітного спектра (ЕМС) частот".

Досвід проведення навчань та участі ЗС США у збройних конфліктах підтвердив, що навіть володіння перевагами у сфері засобів військово-технічного забезпечення не гарантує успішного результату операції у випадку, коли системи управління (СУ) різного рівня залишаються непригніченими [1].

Об'єктами основного впливу систем РЕБ під час операцій є :

- елементи СУ військ (сил) та зброї;
- засоби розвідки та системи зберігання, обробки та розподілу інформації;
- радіоелектронні засоби (РЕЗ);
- інформаційні та автоматизовані системи, бази даних та мережі ЕОМ;
- системи підтримки прийняття рішень для командного складу.

Аналітики Пентагону вважають, що збільшення ролі радіоелектронної боротьби (РЕБ) у сучасних конфліктах має своєю основою ряд причин [2]:

- зростання факторів своєчасності та стійкості управління військами та зброєю під час бойових дій;
- розширення масштабів використання радіоелектронних засобів різних типів для передачі інформації на великі відстані з метою оперативного, безперервного та гнучкого управління військами та зброєю;
- можливість миттєвого дезорганізування процесів бойового управління противника за допомогою радіоелектронного придушення (РЕП), що призводить до кардинальних змін у співвідношенні сил на користь атакуючої сторони;
- збільшення маневреності Збройних Сил (ЗС), розширення масштабів операцій та автоматизація усіх аспектів управління (військами, бойовою технікою та зброєю);
- створення інтегрованих систем управління, розвідки, засобів РЕБ і військово-технічного забезпечення, що призводить до перерозподілу сил і ресурсів в операціях. За оцінками експертів, близько 60% військ, що беруть участь у бойових діях, виконують завдання забезпечення ударних сил, підкреслюючи важливість РЕБ у сфері інформаційного та військового протистояння;
- еволюція РЕБ призвела до змін у її змісті, складових елементах, характері, використовуваних засобах, об'єктах розвідки, впливу та захисту;
- підвищення універсальності зусиль і засобів РЕБ стосовно систем бойового управління противника, що дозволяє їм діяти на всю глибину театру війни, проводити розвідувально-інформаційне забезпечення операцій, використовувати нелетальні та летальні засоби, впливати на об'єкти, бойову техніку та зброю в будь-який момент і забезпечувати захист власних сил і засобів.

Засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ) можуть застосовуватися як у прихованому, так і відкритому режимах, входячи до складу різних багатофункціональних та автоматизованих інтегрованих систем багатосферного базування. Їх використання охоплює такі сфери, як бойове управління, зв'язок, розвідка, вогнева підтримка, боротьба з системами управління противника та захист власних систем. Засоби РЕБ можуть використовувати мережі електронно-

обчислювальних машин противоборчої сторони для впливу на них у власних інтересах.

Постійне підвищення вимог до систем розвідки та РЕБ, а також з'явлення нових стратегічних концепцій ведення сучасних конфліктів стали основою для революційного розвитку РЕБ з початку XXI століття. Це призвело до істотних змін у характері РЕБ, її змісті, складових, ролі, місця, мети та завдань у воєнних операціях. Ці тенденції визначили створення нових засобів РЕБ, зокрема для проведення прихованих радіоелектронних поперечних ударів (РЕП), використання летальних та нелетальних засобів, поразки за допомогою нових фізичних принципів, а також впровадження інформаційно-технічних впливів для атак на комп'ютерні мережі противника [3].

Розвиток сил і засобів РЕБ, які стали ключовим елементом боротьби із системами бойового управління, призвів до виникнення нових понять у стратегії та термінології інформаційної війни, таких як "війна в мережах" чи "мережева війна", "кібервійна", "ведення бойових дій та управління збройними силами в єдиному інформаційно-комунікаційному просторі". Ці терміни вказують на необхідність організації управління Збройними Силами в умовах ведення операцій із використанням сил і засобів боротьби із системами бойового управління для впливу на різні локальні, регіональні та глобальні мережі електронно-обчислювальних машин противника та захисту власних комп'ютерних мереж [6; 17].

На сьогоднішній день аналітики Пентагону вказують, що саме РЕБ є основою інформаційного протистояння [3].

Аналіз розвитку радіоелектронної боротьби (РЕБ) у Збройних Силах США виявив відмінності в характері, змісті заходів та ролі РЕБ в порівнянні з іншими країнами, що проявляються в наступному:

- РЕБ у ЗС США охоплює різні об'єкти впливу та захисту. У порівнянні з країнами НАТО, де заходи РЕБ пов'язані головним чином із впливом на радіоелектронні засоби (РЕЗ) супротивника, в ЗС США вони спрямовані на вплив

і захист РЕЗ, а також на бойову техніку, об'єкти ЗС та системи зброї. Заходи РЕБ включають використання різноманітної летальної та нелетальної зброї, заснованої на випромінюванні спрямованої енергії, з основною метою атаки – системами протиповітряної оборони противника;

- у ЗС США заходи РЕБ включають концепцію "радіоелектронного забезпечення операції" (бойових дій), яка відсутня в подібних заходах країн НАТО;
- РЕБ у ЗС США стала основою протидії системам бойового управління, виступаючи найважливішим елементом інформаційного протиборства. У інших країнах це може бути лише однією зі складових елементів оперативного забезпечення при дезорганізації управління військами противника.

Аналіз розвитку характеру, змісту та ролі РЕБ в операціях на початку XXI століття вказує на основні тенденції до 2025 року, які стали очевидними під час інтеграції розвідкових сил, РЕБ та боротьби з системами бойового управління [3]:

- часткова втрата самостійної ролі РЕБ, яка стає важливим елементом інформаційного протиборства, переважно в боротьбі з системами бойового управління під час інформаційних операцій;
- докорінна зміна характеру, змісту та ролі РЕБ в операціях. Від підтримки ударних сил у ході бойових дій, вона перетворилася на складову ведення бойових дій кожного виду Збройних Сил і, нарешті, на компонент синергетичної системи інформаційного протистояння;
- використання нових видів спрямованої енергії для проведення РЕБ, а також створення летальної та нелетальної зброї на нових фізичних принципах;
- перехід від переважної дії та захисту РЕЗ до комплексного вражаючого та пригніченого інформаційно-технічного впливу та захисту не лише РЕЗ, а й бойової техніки, об'єктів Збройних Сил, систем зброї, а також персоналу та органів державного управління;
- зміщення акценту протиборства в інформаційно-інтелектуальну область, сферу підготовки та прийняття рішень, планування та керівництва операцією. Розвиток РЕБ як основи інформаційного протистояння;

- забезпечення повної інформатизації та автоматизації процесу РЕБ.

У Збройних Силах США радіоелектронна боротьба (РЕБ) розглядається як не лише складова частина збройного протистояння та військового потенціалу, але й як самостійний вид бойових дій, і визнається її комплексність та тісний зв'язок з іншими видами бойової діяльності.

Основою нової концепції в ЗС США є "Боротьба з системами бойового управління", яка включає інтегровані спеціальні операції, такі як військова дезінформація, радіоелектронне придушення та фізичне знищення. Головна мета цієї концепції полягає в позбавленні противника інформації та здатності керувати своїми силами, а також у захисті власних систем бойового управління.

Цілі РЕБ у нових операціях включають дезорганізацію систем бойового управління противника, позбавлення його можливості використовувати інформацію про свої війська та дії протилежної сторони, а також підвищення ефективності бойових дій Збройних Сил США та зниження втрат [4].

Зміст РЕБ у ЗС США розширено, включаючи заходи з оперативного маскування, протидії технічним засобам розвідки противника, вогневого ураження його радіоелектронних засобів та захоплення їх диверсійними силами. Основні принципи ведення РЕБ в інформаційних операціях включають жорстке узгодження заходів РЕБ з загальним планом інформаційної операції, масоване комплексне застосування сил і засобів РЕБ, а також раптовість і нестандартність тактики їх використання.

Для впливу на об'єкти пригнічуваної системи бойового управління противника використовуються різноманітні методи та засоби. До них входять:

- масований вплив засобами ураження: Це означає використання масованих атак для пригнічення роботи систем бойового управління противника. Це може включати в себе вплив на командні пункти, вузли зв'язку та інші ключові об'єкти;

- захоплення командних пунктів і вузлів зв'язку: Захоплення або знищення ключових об'єктів бойового управління може суттєво пригнічити здатність противника до керування своїми силами;

- введення противника в оману через його засоби розвідки: Здійснення дезінформації та введення противника в оману може призвести до прийняття невірних рішень та помилкового розпорядження військами;

- радіоелектронна передавання (РЕП): Застосування засобів радіоелектронного придушення для виведення з ладу інформаційних систем та РЕЗ противника.

У сфері інформаційних операцій сили та засоби РЕБ використовуються для впливу на системи державного та військового управління противника, включаючи проведення спеціальних операцій з військової дезінформації та радіоелектронного придушення.

Для досягнення вирішальної військово-технічної переваги в галузі засобів РЕБ ЗС США вживають такі заходи:

- створення нових засобів "силового" РЕП: Розробка апаратури, яка спрямована на виведення з ладу інформаційних систем та РЕЗ противника, забезпечуючи перевагу за тимчасовими та енергетичними параметрами;

- розробка засобів РЕБ з високим ступенем адаптації: Створення засобів, які автоматично оцінюють радіоелектронну обстановку та вибирають оптимальні перешкоди для РЕЗ у реальному часі;

- удосконалення технічних характеристик засобів радіо- та радіотехнічної розвідки: Покращення чутливості приймачів, пропускної здатності та точності визначення частоти пригнічуваної РЕЗ;

- вдосконалення технічних характеристик засобів РЕП: Покращення технічних параметрів засобів радіоелектронного придушення для ефективнішого ведення боротьби з електронними системами противника.

Доктринальні документи ЗС США чітко визначають завдання радіоелектронної боротьби (РЕБ) в інформаційних операціях. Основними завданнями РЕБ є:

- дезорганізація систем управління (СУ) противника: Це включає в себе пригнічення та руйнування здатностей противника використовувати інформацію про свої війська та дії противника;
- створення хибної інформації: Реалізація заходів з руйнування, викривлення чи створення хибної інформації, яка може спричинити неправильні дії противника;
- підвищення ефективності ЗС США та їх союзників: Реалізація заходів для покращення ефективності ведення бойових дій та операцій ЗС США та їх союзників;
- зниження людських та матеріальних втрат: Мінімізація втрат серед особового складу та матеріальних ресурсів у процесі ведення інформаційних операцій.

Основні напрямки РЕБ в ЗС США включають:

- радіоелектронна атака (РЕА): Дії наступального характеру, що використовують електромагнітні ефекти та самонаводящія засоби для впливу на системи управління противника;
- радіоелектронний захист (РЗ): Заходи, спрямовані на захист власних систем від впливу противника та забезпечення їх працездатності;
- радіоелектронне забезпечення: Заходи, спрямовані на створення необхідної радіоелектронної обстановки та збору розвідданих.

РЕБ включає в себе використання різних методів та засобів, таких як радіоелектронна дезінформація, вогневі засоби, керована зброя та інші для досягнення своїх завдань у сфері інформаційних операцій.

Для впливу на інформаційні ресурси противника в рамках заходів радіоелектронної боротьби в Збройних Силах США, крім використання джерел випромінювання електромагнітної енергії та інших технічних засобів,

передбачається застосування таких методів, як використання хибних цілей та застосування летальної та нелетальної зброї, яка базується на випромінюванні інших видів спрямованої енергії, включаючи ті, що діють на нових фізичних принципах, таких як інфразвукові, лазерні, пучкові та інші [5].

До об'єктів (цілей) радіоелектронної боротьби, згідно з визначенням командування Збройних Сил США, відносяться:

- особовий склад, бойова техніка та системи зброї, а також різна радіоелектронна апаратура;
- пункти управління, вузли зв'язку та радіотехнічне забезпечення;
- системи та засоби бойового управління, зв'язку, розвідки, радіолокації та радіонавігації.

За думкою військових аналітиків США, різновидами форм проведення радіоелектронної боротьби є:

- радіоелектронний удар;
- вражаючий радіоелектронний удар;
- радіоелектронно-вогневий удар;
- радіоелектронна блокада;
- удар засобами нелетальної та летальної зброї.

Отже, заходи радіоелектронної боротьби, в залежності від використовуваних засобів, поділяються на непоражаючі і поражаючі [5].

До непоражаючих (нелетальних) засобів впливу відносяться: засоби радіоелектронних перешкод і засоби радіоелектронної дезінформації.

Поражаючими засобами впливу є: засоби випромінювання спрямованої енергії і високоточні боєприпаси з елементами радіоелектронного самонаведення. При цьому засоби випромінювання спрямованої енергії на великих площах можуть виступати як засоби перешкод, не завдаючи прямого ураження.

Завданнями непоражаючих засобів при проведенні радіоелектронної боротьби є:

- зрив, придушення або виведення з ладу радіоелектронних та оптико-електронних систем, а також засобів розвідки, спостереження, наведення, зв'язку, навігації та управління військами та зброєю.

- зміна режиму випромінювання радіоелектронних засобів;
- імітація та хибна робота радіоелектронних засобів, об'єктів та зброї власних військ та військ противника;

- імітація демонстративних дій військ;
- дезорганізація систем зв'язку та управління противника;
- введення противника в оману стосовно намірів власних військ;
- вплив на особовий склад противника, який обслуговує радіоелектронні засоби, системи розвідки, спостереження, засоби зв'язку, навігації та управління військами та зброєю, а також бере участь у аналізі отриманої розвідкової інформації, підготовці та ухваленні рішень, плануванні операцій чи бою;

Завданнями поражаючих засобів під час радіоелектронної боротьби можуть бути наступні [6]:

- наведення на ціль засобів високоточного зброї та засобів спрямованої енергії;

- знищення, руйнування та виведення з ладу засобів розвідки, навігації та спостереження;

- знищення, руйнування та виведення з ладу засобів, вузлів, центрів та органів зв'язку, управління військами та зброєю противника, а також його об'єктів, бойової техніки та систем зброї;

- поразка та виведення з ладу особового складу противника, що бере участь у підготовці, прийнятті оперативних (бойових) рішень та плануванні операцій.

Досвід локальних конфліктів підтверджує, що застосування радіоелектронних бойових засобів відбувається одночасно з використанням вогневого впливу і виявляється для противника несподіваним та короткочасним.

Це призвело до виокремлення окремої форми радіоелектронної боротьби, яку називають "радіоелектронним ударом".

Залежно від залучених сил і засобів, "радіоелектронні удари" можуть бути: одиночними і масованими. З урахуванням просторового розмаху, "радіоелектронні удари" можуть бути: зосередженими і розосередженими. Комбіноване застосування радіоелектронних засобів та вогневого впливу з метою порушення функціонування радіоелектронних систем противника називають "радіоелектронно-вогневим ударом". Такі удари можуть бути "роботизованими радіо-електронно-вогневими ударами" у зв'язку з розвитком військової робототехніки. Ймовірно, радіоелектронні та вогневі удари призведуть до формування нового виду бойового взаємодії – "радіоелектронного бою" [7].

Радіоелектронний захист (РЗ) охоплює різноманітні пасивні та активні заходи та спеціальні засоби для захисту від впливу противника та його радіоелектронних бойових засобів. Це включає управління використанням електромагнітного спектра (ЕМС), забезпечення електромагнітної сумісності, контроль за випромінюванням та інші заходи.

Управління використанням ЕМС передбачає планування, координацію, розподіл та керівництво спільним використанням ЕМС, забезпечення електромагнітної сумісності та перепрограмування сил, засобів та завдань радіоелектронного бою.

Засоби та методи радіоелектронного захисту поділяють на три типи:

- безпосередній захист радіоелектронних систем;
- забезпечення електромагнітної сумісності на пунктах управління та в бойових порядках військ;
- радіоелектронний захист під час проведення інформаційних операцій.

Завданнями сил та засобів радіоелектронного захисту можуть бути:

- захист радіоелектронних систем від радіоелектронних та оптикоелектронних перешкод;

- захист від атмосферних, промислових та цивільних радіоелектронних перешкод;
- захист від радіоелектронної дезінформації;
- захист від самонавідного зброї противника;
- захист від летальних та нелетальних засобів випромінювання спрямованої енергії;
- відстеження та рекомендації щодо використання радіочастот та режимів роботи РЕЗ;
- оцінка збитків та радіоелектронної обстановки;
- ведення радіоелектронної розвідки (РЕР).

Завданнями сил та засобів радіоелектронного захисту під час проведення інформаційних операцій є:

- захист інформаційних та радіоелектронних засобів розвідки та РЕП;
- радіоелектронний захист підрозділів та засобів РЕЗ;
- захист інформаційних ресурсів сил та засобів психологічних операцій;
- захист інформаційних ресурсів, які здійснюють збір, передачу та обробку інформації.

Радіоелектронне забезпечення включає дії з виявлення, ідентифікації та визначення місцезнаходження радіоелектронних систем противника, що можуть бути джерелами розвідки чи інформаційних загроз. Контроль радіовипромінювань, радіоелектронне маскування та програмування засобів РЕБ, хоча не є безпосередніми елементами РЕБ, важливі для забезпечення її ефективності.

Елементами сил радіоелектронного забезпечення ЗС США є [8]:

- радіорозвідка (збирання, обробка, аналіз та оцінка розвідувальних даних);
- розвідка електромагнітного спектра (збирання, обробка, аналіз та оцінка);

– забезпечення радіоелектронної безпеки та скритності використання рез, засобів та інформації.

Ці засоби можуть використовуватися для збору даних, необхідних для підтримки розвідки національного рівня.

1.2 Теоретичні відомості

Антени широкого діапазону з логоперіодичною структурою конструюються за принципом електродинамічної подібності, де дві антени, працюючи на хвилях з довжинами λ_1 і λ_2 , мають ідентичні електричні характеристики, якщо їхні геометричні розміри пропорційні відношенню довжин хвиль λ_1 і λ_2 . Важливо, щоб провідність навколишнього середовища і матеріалу, з якого виготовлені обидві антени, змінювалися відповідно до цього ж відношення. Останній критерій може бути не обов'язковим, якщо антени виготовлені з металу і розташовані в повітрі.

Принцип електродинамічної подібності відповідає антенам нескінченних розмірів, форма яких повністю визначається кутами. Для створення практично застосовних антен з частотно-незалежними характеристиками, структури повинні мати властивість "кінцевого відсічення струму". Це означає, що на кожній хвилі струм обмежується в межах конкретного фрагменту структури, розмір якого визначається довжиною хвилі. Поза цією областю (відомою як активна область антени) струм швидко висихає (відсікається).

Для пояснення цього явища можна звернутися до висновків теорії збудження періодичних структур. При збудженні таких структур можуть існувати два режими роботи. У першому режимі електромагнітна хвиля поширюється вздовж структури без випромінювання, тоді як у другому режимі спостерігається випромінювання електромагнітних хвиль в навколишній простір. Режим роботи періодичної структури залежить від співвідношення між коефіцієнтом фази живильної хвилі, що розповсюджується вздовж структури, і періодом структури. При малих розмірах порівняно з довжиною хвилі періоді випромінювання відсутнє, а при збігу

періоду структури з довжиною хвилі спостерігається інтенсивне резонансне випромінювання [9].

Якщо в періодичній структурі відбувається резонансне випромінювання, то енергія хвилі, що живить кінцевий відрізок структури, практично повністю перетворюється в енергію випромінюваних електромагнітних хвиль. При цьому збудження структури за областю випромінювання різко зменшується, і обрив структури не порушить її режиму роботи. Період структури у логоперіодичних антен є змінним, зростаючи в напрямку від точок живлення антени. Тому відсічення струму в цих антенах може пояснюватися тим, що для будь-якої хвилі (в разі нескінченної структури) завжди знайдеться обмежена область антени, в межах якої співвідношення між періодом структури і довжиною живильної хвилі відповідає режиму інтенсивного випромінювання.

Частотно-незалежна антена – це антена кінцевих розмірів, яка в певному діапазоні хвиль має всі властивості нескінченних антен. Максимальна та мінімальна хвилі її робочого діапазону визначаються максимальними розмірами антени та точністю виконання структури поблизу точок живлення антени.

Логоперіодична антена (ЛПА) (рисунки 1.1) являє собою сукупність елементів, розміри яких утворюють геометричну прогресію зі знаменником τ : $\frac{R_{i+1}}{R_i} = \frac{r_{i+1}}{r_i} = \tau$. Очевидно, що зміна всіх розмірів нескінченної структури в раз призведе до отримання структури, форма якої повністю збігається з вихідною. Тому електричні характеристики логоперіодичної антени повторюються лише на частотах, що утворюють геометричну прогресію зі знаменником τ : $f_0, f_0\tau, f_0\tau^2, \dots, f_0\tau^n \dots$

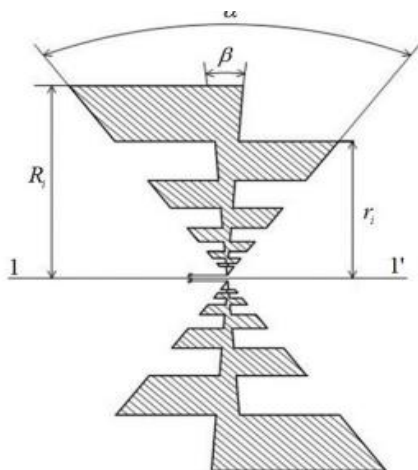


Рисунок 1.1 – Плоска логоперіодична структура

При зображенні на шкалі частот з логарифмічним масштабом ці частоти утворюють періодичну послідовність з постійним періодом, рівним $\ln \ln \tau$, що і визначило назву антен цього типу. Очевидно, що в межах одного періоду зміни частоти від $f_0 \tau^n$ до $f_0 \tau^{n+1}$, електричні характеристики логоперіодичних антен будуть змінюватися. Неодмінною умовою, при якому практично здійснення антена може вважатися частотно-незалежною, є досить мала зміна її електричних характеристик в межах одного періоду зміни частоти. Ця умова справедлива при такому конструктивному виконанні частотно-незалежної структури, при якому один період зміни частоти виявляється малим. При цьому слід зазначити, що виконання антен у вигляді структур, як це вказано на рисунку 1.1, є додатковою гарантією малості зміни електричних характеристик антени в межах одного періоду зміни частоти [10].

Сталість вхідного опору антени пояснюється таким чином. Короткі вібратори, що розташовані між точкою живлення і активною областю, слабо збуджуються, і їх вплив зводиться до деякої зміни еквівалентного хвильового опору лінії живлення і зміни фазової швидкості в ній. Вібратори активної області розташовані на відстані $\lambda/4$ один від одного, і відображені ними хвилі значною мірою взаємно компенсуються. Крім того, електрична відстань від точки живлення

до активної області постійна, тому перерахований до входу антени еквівалентний опір з частотою не змінюється.

Описаний принцип дії ЛПА зберігається і в тому випадку, коли обидві половинки структури утворюють деякий кут γ , а випромінюючі елементи мають трапеційдальну форму. Для виконання принципу електродинамічної подоби товщина виступів антени також повинна бути пропорційною відстані R ; проте досвід показує, що для значень коефіцієнтів перекриття до 20, сталість товщини випромінюючих елементів практично несуттєва.

Параметр τ визначає також частотну періодичність характеристик антени, так як:

$$\tau = \frac{f_i}{f_{i+1}},$$

де f_i та f_{i+1} – частоти, що відповідають резонансам i -го та $(i+1)$ -го виступів.

Чим менше τ , тим менше кількість зубців в антені при заданому R . Величина може лежати в межах від 0,5 до 0,9. Живлення плоскої логоперіодичної структури може бути здійснено за допомогою коаксіального кабелю. Однак узгодження при цьому виходить не дуже хорошим, через те, що вхідний опір антени великий.

Основними параметрами одного полотна дротяної антени з трапеційдальними виступами є τ і кут α . Центр випромінювання одного логоперіодичного полотна знаходиться в межах його активної області і, отже, зі зміною довжини хвилі переміщується по антені; проте його відносна відстань від вершини (виражена в довжинах хвиль) залишається для даної системи постійною. При кутах, що не перевищують 60° , величина параметра τ майже не впливає на положення фазового центру. Зменшення кута, природно, веде до збільшення відстані між центром випромінювання і вершиною структури.

У сучасній техніці існує логоперіодична антена «Rohde & Schwarz HL223» (рисунок 1.2).

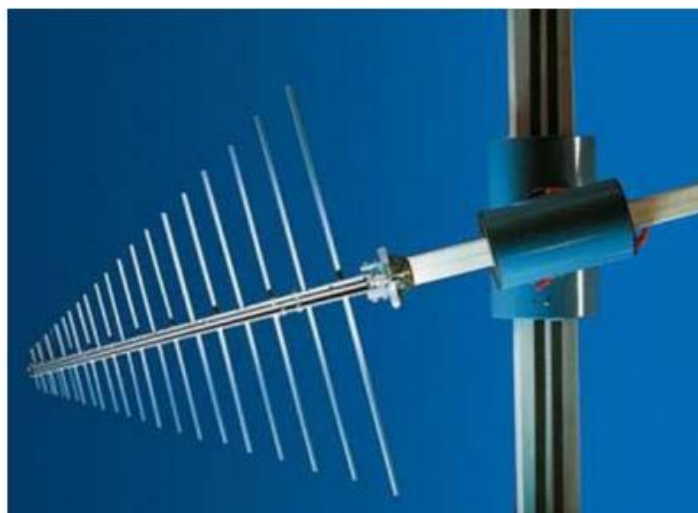


Рисунок 1.2 – Логоперіодична антена «Rohde & Schwarz HL223»

Діаграма спрямованості широкосмугової антени Rohde & Schwarz HL223 практично не змінюється в залежності від частоти. Завдяки міцній конструкції, ця антена може бути використана як в стаціонарних, так і в мобільних застосуваннях, ідеально підходить для передачі, радіомоніторингу та вимірювань [10].

Серед різних видів логоперіодичних антен розглянемо спрямовану логоперіодичну антену "Rohde & Schwarz HL050" (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Спрямована логоперіодична антена "Rohde & Schwarz HL050"

Завдяки широкому діапазону частот від 850 МГц до 26,5 ГГц, ця антена ідеально підходить для радіомоніторингу та вимірювань радіочастотних сигналів. Її діаграма спрямованості майже обертово-симетрична, що забезпечує оптимальну формування діаграми вторинного випромінювання при використанні як опромінювача для дзеркальних антен. Rohde & Schwarz HL050 може служити окремою антеною або в якості опромінювача для мікрохвильових антен AC008. Ця антена також має аналогічну конструкцію та може використовуватися як опромінювач для дзеркальних антен в діапазоні від AC090 до AC300.

1.3 Призначення антени

Логоперіодична антена є особливим типом антени, призначеним для передачі та прийому електромагнітних хвиль у широкому діапазоні частот (рисунки 1.4). Цей вид антени володіє кількома важливими перевагами:

- широкий діапазон робочих частот: логоперіодична антена здатна працювати на широкому спектрі частот, що дозволяє їй використовуватися в різноманітних комунікаційних системах;
- малі розміри: дизайн логоперіодичних антен дозволяє їм мати компактні розміри, що робить їх зручними для використання в областях з обмеженим простором;
- висока якість сигналу: завдяки своїй конструкції та принципу дії, логоперіодична антена забезпечує високу якість сигналу та мінімальні спотворення сигналів;
- ефективність: логоперіодична антена є ефективним інструментом для передачі та прийому сигналів у широкому діапазоні частот.

Ці характеристики роблять логоперіодичні антени популярними в різних застосуваннях, де важлива широка діапазонність, компактність та висока якість сигналу [11].



Рисунок 1.4 – Логоперіодична антена

Принцип дії логоперіодичної антени базується на явищі резонансу. Вона складається з послідовності елементів, розміри яких змінюються. Це дозволяє антені працювати на різних резонансних частотах та створює оптимальні умови для передачі та прийому сигналів.

Логоперіодичні антени знаходять широке застосування в різних сферах, зокрема:

- комунікаційні системи;
- радіозв'язок;
- медичне обладнання;
- електроніка;
- радіочастотна ідентифікація.

Завдяки своїм перевагам та високій ефективності, логоперіодичні антени стають все більш популярними у різних галузях, де потрібен надійний та ефективний зв'язок.

Принцип роботи логоперіодичної антени ґрунтується на логоперіодичності, що дозволяє їй мати широкосмугові характеристики. Вона складається з металевих стержнів, розташованих у певній послідовності, із різною довжиною (рисунок 1.5).

Ці стержні взаємодіють між собою, забезпечуючи стабільні радіаційні характеристики антени.



Рисунок 1.5 – Логоперіодична антена

Кожен відрізок логоперіодичної антени має свою власну довжину, яка змінюється від одного відрізка до іншого. Це дозволяє антені створювати електромагнітне випромінювання на різних частотах, що входять в заданий діапазон. Основна ідея логоперіодичних антен полягає в тому, щоб створити геометрію антени, яка забезпечить розподіл електромагнітного випромінювання на широкому спектрі частот. Це досягається вибором оптимальних розмірів і конфігурацій відрізків, які працюють на різних довжинах хвиль.

Логоперіодичні антени широко використовуються в різних галузях, таких як зв'язок, радіолокація, медичні пристрої і багато інших. Вони є надійними та ефективними засобами зв'язку і вимірювань, дозволяючи працювати на широкому діапазоні частот.

Логоперіодична антена виявляється ефективною для передачі та прийому радіохвиль і володіє такими характеристиками:

- багатодіапазонність: можливість працювати на різних частотах для різних типів комунікаційних систем;

- ефективність: висока ефективність передачі та прийому радіосигналів завдяки спеціальній конструкції;
- широкий зонування: можливість працювати в різних напрямках завдяки широкому зонуванню;
- стійкість до перешкод: висока стійкість до різних перешкод, таких як географічні обмеження чи електромагнітні впливи [12].

Загалом, логоперіодична антена є невід'ємним засобом для ефективного забезпечення зв'язку у різних системах телекомунікацій, і використовується в різних сферах, включаючи радіозв'язок, радіоспостереження та наукові дослідження.

Застосування логоперіодичних антен включає комунікаційні системи, телевізійні та радіостанції, медичну техніку, автомобільну промисловість та інші галузі, де необхідно передавати або отримувати сигнали на різних частотах. Завдяки своїм універсальним характеристикам та ефективності, логоперіодичні антени стають все більш популярними в різних індустріях, де потрібна надійна робота на різних частотах.

2 АНАЛІЗ ЛОГОПЕРІОДИЧНИХ АНТЕН В СЕРЕДОВИЩІ HFSS ТА ЇХ ОПТИМІЗАЦІЯ

2.1 Моделювання логоперіодичних антен в середовищі Ansys HFSS

Першим етапом при побудові антени було створити підкладку з матеріалу FR4 яка матиме зрізи з боків із сторони короткого вібратора. Перший етап зображено на рисунку 2.1.

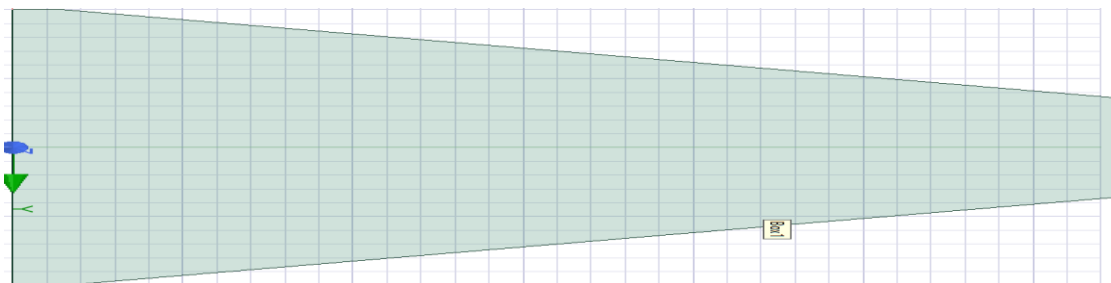
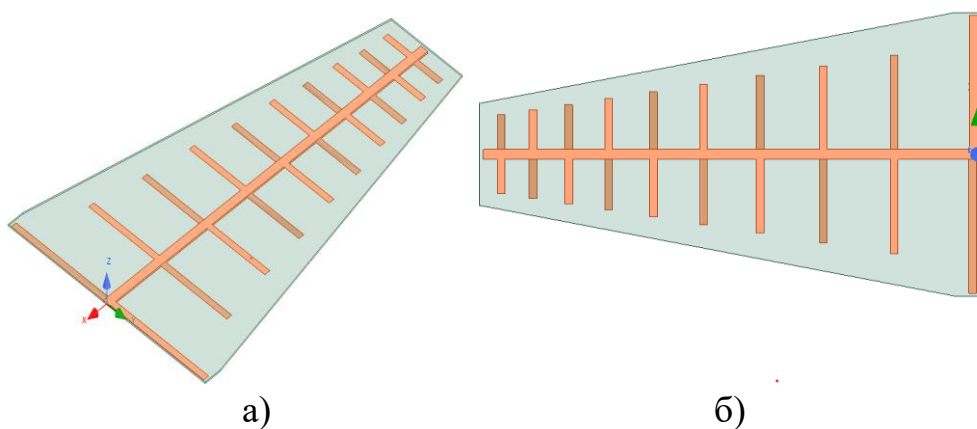


Рисунок 2.1 – Підкладинка з матеріалу FR4

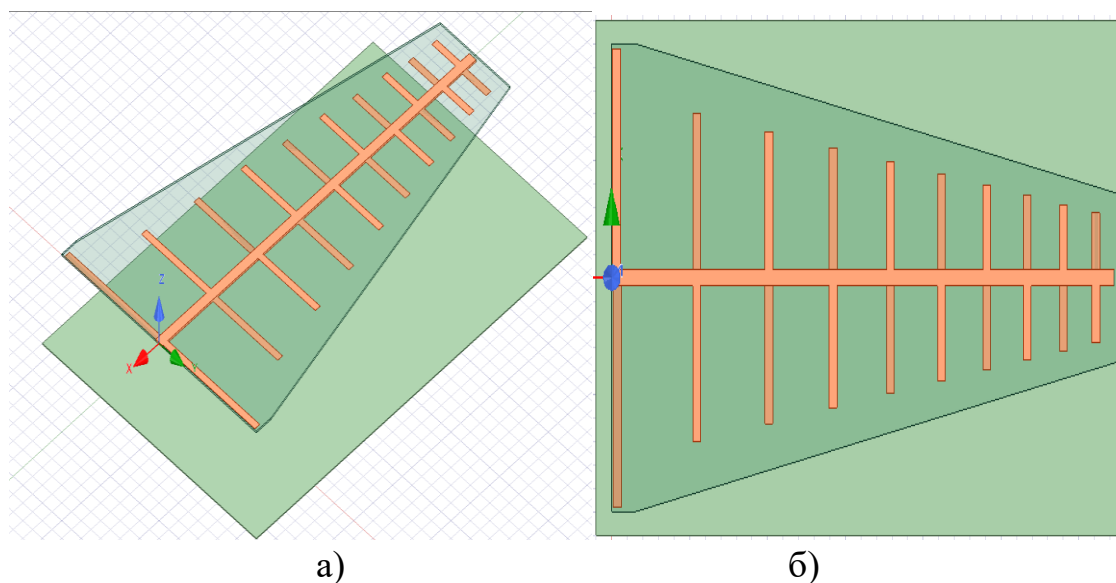
Наступним етапом було розташування десяти вібраторів з однієї сторони підкладинки та зі зворотньої. Зображення розташування на рисунку 2.2.



а – ізометрична проекція; б – вид зверху

Рисунок 2.2 – Класична логоперіодична антена

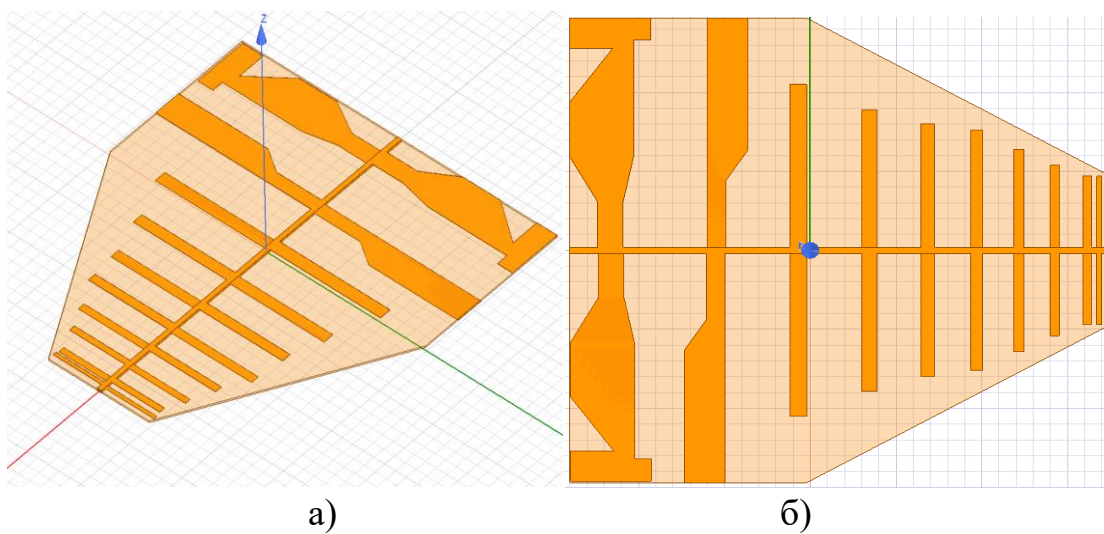
Після побудови класичної логоперіодичної антени було прийнято рішення додати до моделі алюмінієвий екран такої ж товщини, що й підкладка. Результат побудування зображено на рисунку 2.3



а – ізометрична проекція; б – вид зверху.

Рисунок 2.3 – Класична логоперіодична антена з екраном

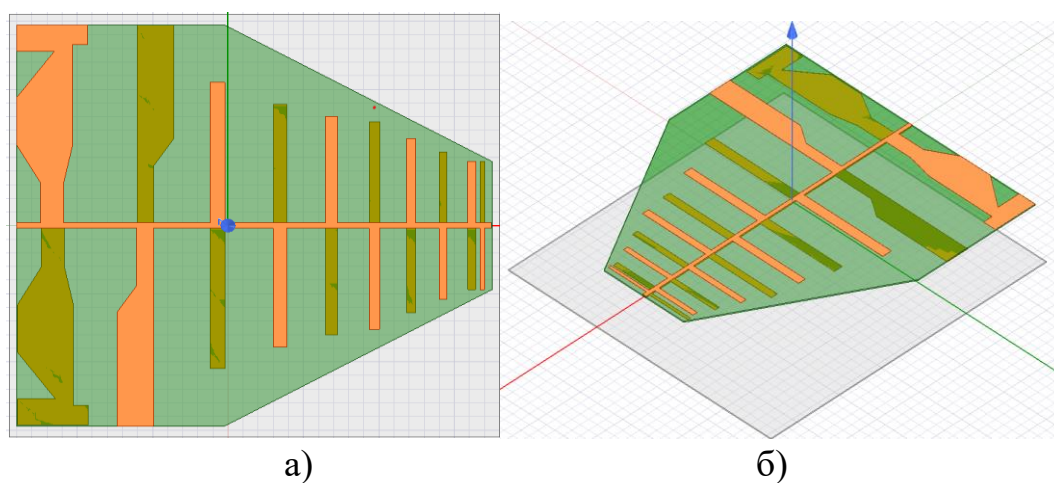
Після побудови класичної логоперіодичної антени настав етап побудови її модифікованої варіації. Першим етапом модифікації було зменшення товщини короткого вібратора та наближення його до другого вібратора. Дана модифікація не дала великих змін в характеристиках антени, тому наступним етапом було зміна геометрії дев'ятого та десятого вібраторів. Модифікована логоперіодична антена зображена на рисунку 2.4



а – ізометрична проекція; б – вид зверху.

Рисунок 2.4 – Модифікована логоперіодична антена

Після модифікації класичної логоперіодичної антени було прийнято рішення додати до моделі алюмінієвий екран такої ж товщини, що й підкладка. Результат побудування зображено на рисунку 2.5



а – ізометрична проекція; б – вид зверху.

Рисунок 2.5 – Модифікована логоперіодична антена з екраном

2.2 Поширення в площині підкладинки ближнього електромагнітного поля на різних частотах

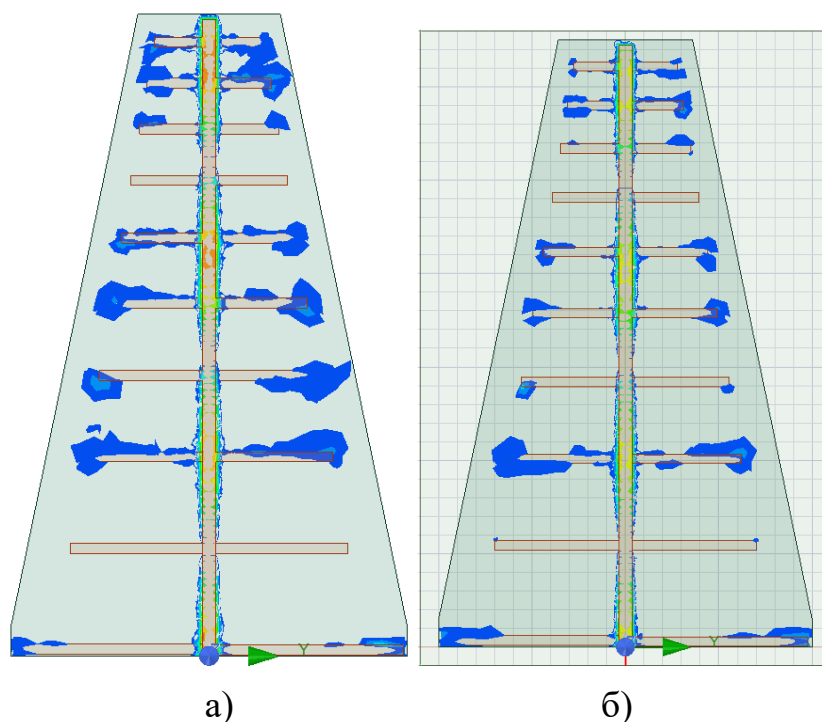
Аналіз ближнього електромагнітного поля на різних частотах антени є важливим етапом при розробці, налаштуванні та експлуатації антенних систем. Основні причини проведення такого аналізу включають:

- оптимізація ефективності антени: різні частоти мають різні характеристики поширення електромагнітних хвиль. для досягнення максимальної ефективності антени необхідно враховувати ці характеристики та оптимізувати конструкцію антени для конкретної частоти;
- уникнення взаємовпливу: при використанні різних антенних систем чи пристроїв на одній території може виникати взаємовплив між ними через розподіл інтенсивності електромагнітного поля. аналіз ближнього поля дозволяє визначити, як ці системи взаємодіють і як уникнути або зменшити цей вплив;
- врахування змін у середовищі: характеристики поширення електромагнітних хвиль можуть змінюватися в залежності від властивостей навколишнього середовища. проведення аналізу ближнього поля допомагає врахувати ці зміни та адаптувати антенну систему для оптимальної працездатності;
- уникнення перешкоджань: аналіз ближнього поля допомагає ідентифікувати можливі джерела перешкоджань, такі як електромагнітні сторонні сигнали чи електромагнітна інтерференція. це дозволяє приймати заходи для мінімізації впливу цих перешкоджань на роботу антенної системи;
- визначення радіочутливості: деякі пристрої чутливі до електромагнітних полів. аналіз ближнього поля дозволяє визначити, наскільки сильним може бути вплив антени на навколишні пристрої і визначити необхідні заходи для зниження радіочутливості.

Враховуючи ці аспекти, проведення аналізу ближнього електромагнітного поля на різних частотах дозволяє досягти оптимальної працездатності та надійності антенних систем в різноманітних умовах експлуатації.

2.2.1 Дослідження впливу екрану на формування ближнього поля класичної логоперіодичної антени в залежності від частоти

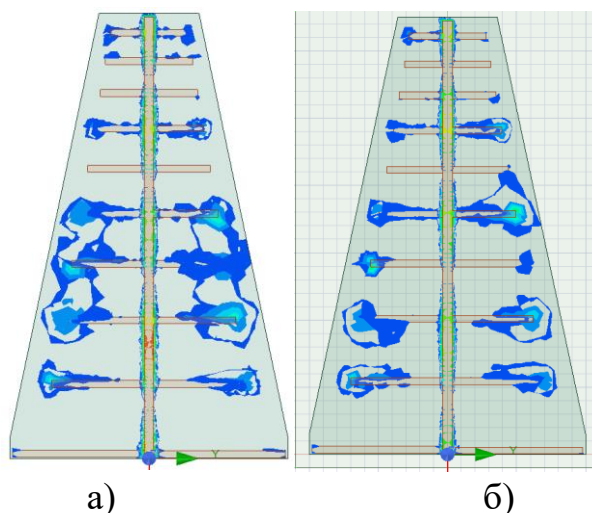
З рисунку 2.6 видно, що на частоті 360 МГц збудження ближнього електромагнітного поля на певних вібраторах однакова. Різницею є тільки те, що при використанні екрану потужність поширення менше ніж без екрану.



а – класична без екрану; б – класична з екраном.

Рисунок 2.6 – Поширення в площині підкладинки ближнього електромагнітного поля на частоті 360 МГц

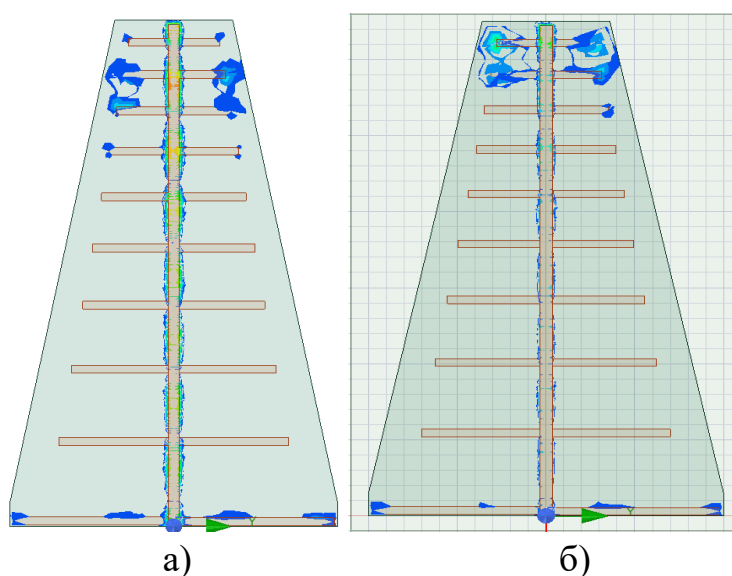
З рисунку 2.7 видно, що на частоті 460 МГц збудження ближнього електромагнітного поля на певних вібраторах однакова. На конструкції без використання екрану збудження потужніше.



а – класична без екрану; б – класична з екраном.

Рисунок 2.7 – Поширення в площині підкладки ближнього електромагнітного поля на частоті 460 МГц

З рисунку 2.8 видно, що на частоті 920 МГц збудження ближнього електромагнітного поля на певних вібраторах однакова. Різниця на цих вібраторах майже не спостерігається.



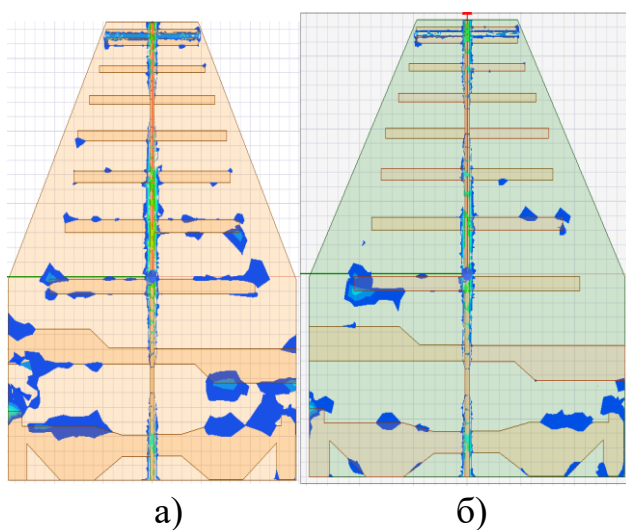
а – класична без екрану; б – класична з екраном.

Рисунок 2.8 – Поширення в площині підкладки ближнього електромагнітного поля на частоті 920 МГц

Отже, всіх частотах збуджуються різна кількість вібраторів. Це пояснюється резонансними явищами в антені. Зі зміною місця розташування порту живлення різко погіршуються характеристики узгодження антени та рівномірність збудження ближнього електромагнітного поля по всій площині антени.

2.2.2 Дослідження впливу екрану на формування ближнього поля модифікованої логоперіодичної антени в залежності від частоти

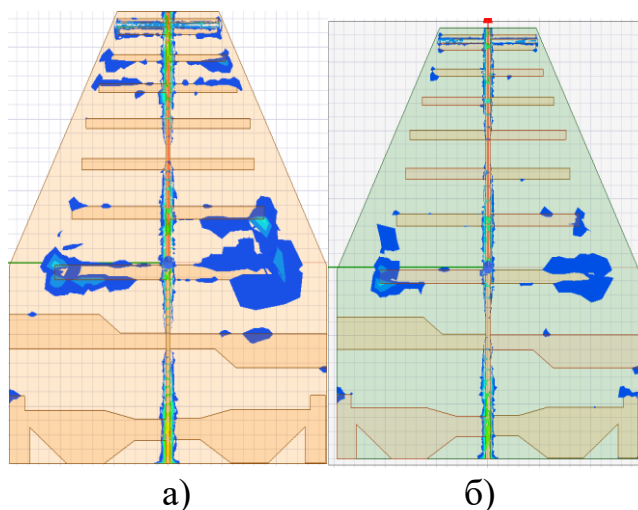
З рисунку 2.9 видно, що на частоті 360 МГц збудження ближнього електромагнітного поля на певних вібраторах однакова. На конструкції без використання екрану збудження потужніше.



а – модифікована без екрану; б – модифікована з екраном.

Рисунок 2.9 – Поширення в площині підкладинки ближнього електромагнітного поля на різних частоті 360 МГц

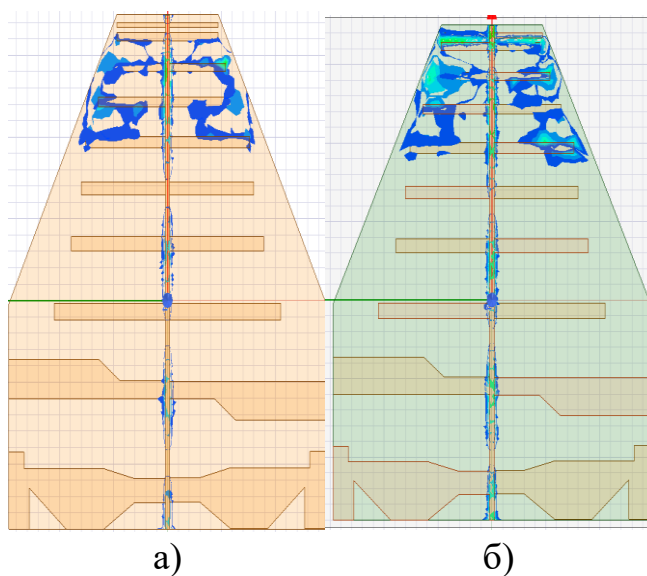
З рисунку 2.10 видно, що на частоті 460 МГц збудження ближнього електромагнітного поля на певних вібраторах однакова. На конструкції без використання екрану збудження потужніше.



а – модифікована без екрану; б – модифікована з екраном.

Рисунок 2.10 – Поширення в площині підкладки ближнього електромагнітного поля на різних частоті 460 МГц

З рисунку 2.11 видно, що на частоті 920 МГц збудження ближнього електромагнітного поля на певних вібраторах однакова. На конструкції з використання екрану збудження потужніше.

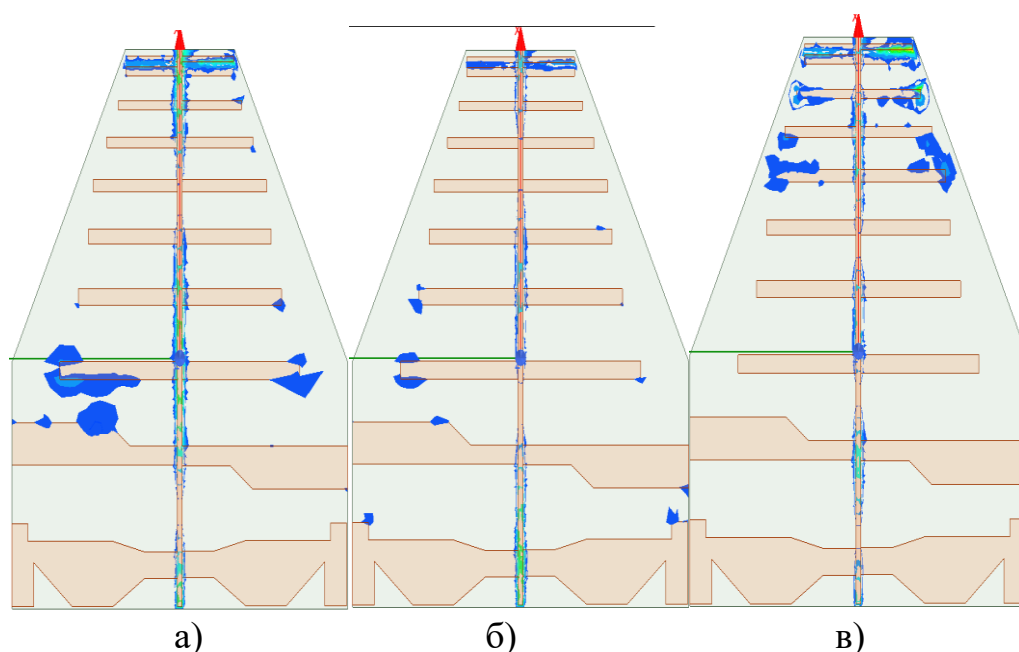


а – модифікована без екрану; б – модифікована з екраном

Рисунок 2.11 – Поширення в площині підкладки ближнього електромагнітного поля на різних частоті 920 МГц

2.2.3 Дослідження впливу розташування порту живлення на початку і на кінці антени на ефективність збудження ближнього поля

Порівнюючи рисунок 2.9 (а) та рисунок 2.11 бачимо, що підключення живлення з боку найдовшого вібратора не є ефективним на всіх розглянутих вище частотах. Тому зупинимось на підключенні порту живлення з боку найкоротшого вібратора та візьмемо цей варіант модифікованої логоперіодичної антени за основу.



а – частота 360 МГц; б – частота 460 МГц; в – частота 920 МГц.

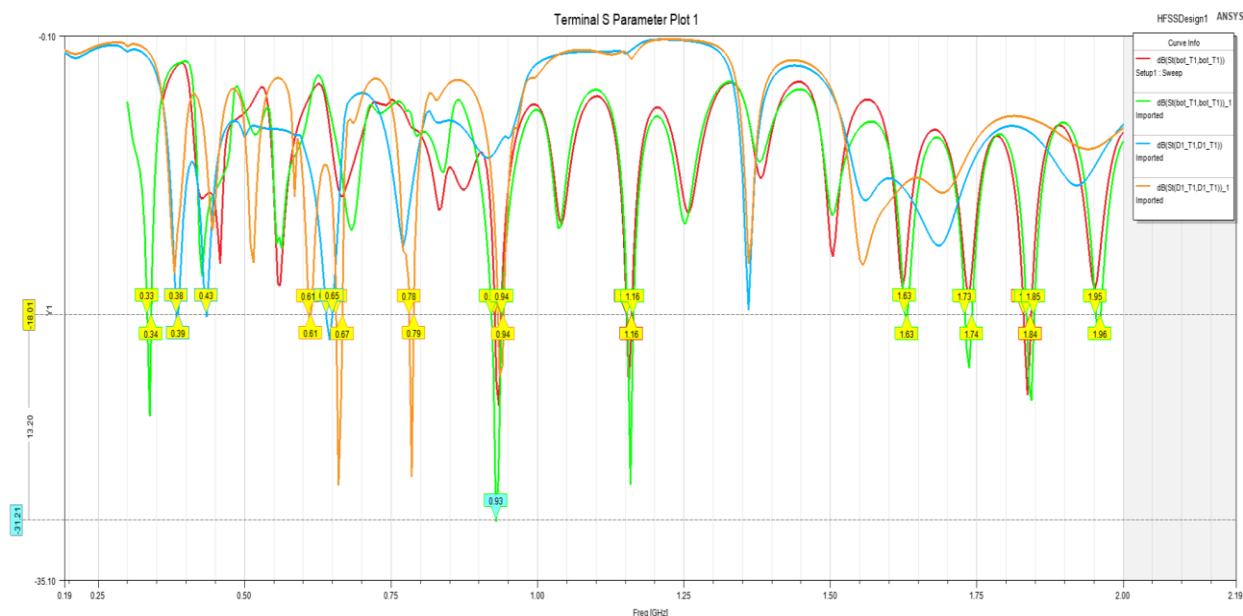
Рисунок 2.11 – Розташування порту живлення з боку найдовшого вібратора.

2.3 Дослідження ступеня узгодження антени з фідером в смузі частот

Ступінь узгодження антени з фідером є важливим параметром, оскільки від нього залежить ефективність передачі та прийому сигналів. Узгодження визначає те, наскільки добре антена передає сигнал від фідера до самої антени, або, у випадку прийому, як ефективно антена збирає сигнали з фідера.

Порівняння класичної(з екраном та без), модифікованої (з екраном та без).

Почнемо дослідження частотної залежності коефіцієнта відбиття від входу антени (рисунок 2.12).

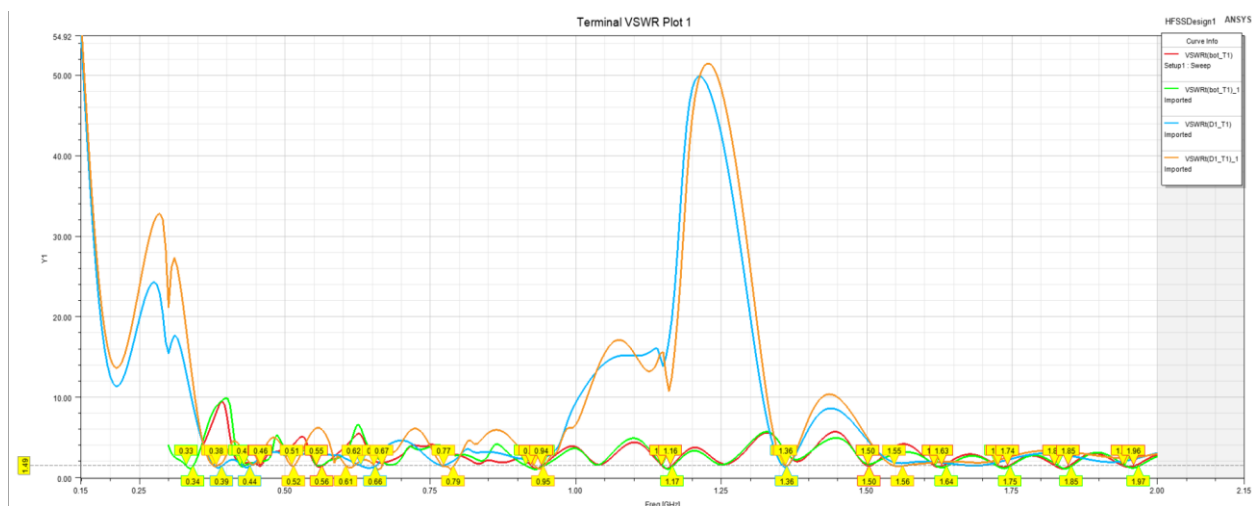


червоний – класична антена без екрану; зелений – класична антена з екраном; синій – модифікована антена без екрану; помаранчевий – модифікована антена з екраном.

Рисунок 2.12 – Порівняння частотної залежності коефіцієнта відбиття для класичної(з екраном та без), модифікованої (з екраном та без) антен

З рисунка 2.12 очевидно, що найкраще узгодженим на частоті 930 МГц з коефіцієнтом відбиття -31.21 дБ демонструє модифікована антена без екрану. На рівні коефіцієнта відбиття -18.01 дБ ми бачимо велику кількість резонансів. На частотах 940 МГц, 1.16 ГГц та 1.85 ГГц бачимо співпадіння резонансів більшості антен. На частотах від 190 МГц до 330 МГц, від 1 ГГц до 1.3 ГГц, від 1.4 ГГц до 1.55 ГГц ми бачимо три смуги майже повного розлаштування модифікованої антени як з екраном, так і без нього, з лінією живлення.

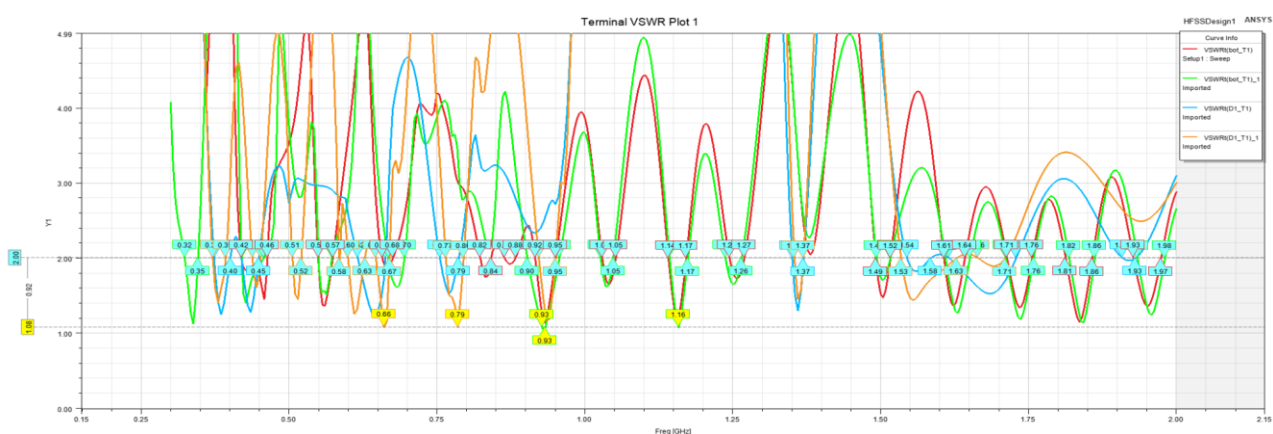
Далі розглянемо VSWR всіх чотирьох досліджуваних конструкцій антен (рисунок 2.13).



червоний – класична антена без екрану; зелений – класична антена з екраном;
синій – модифікована антена без екрану; помаранчевий – модифікована антена з екраном.

Рисунок 2.13 – VSWR всіх чотирьох досліджуваних конструкцій антен в діапазоні значень від 1 до 55

Розглянемо докладніше значення VSWR в околиці двійки (рисунок 2.14).

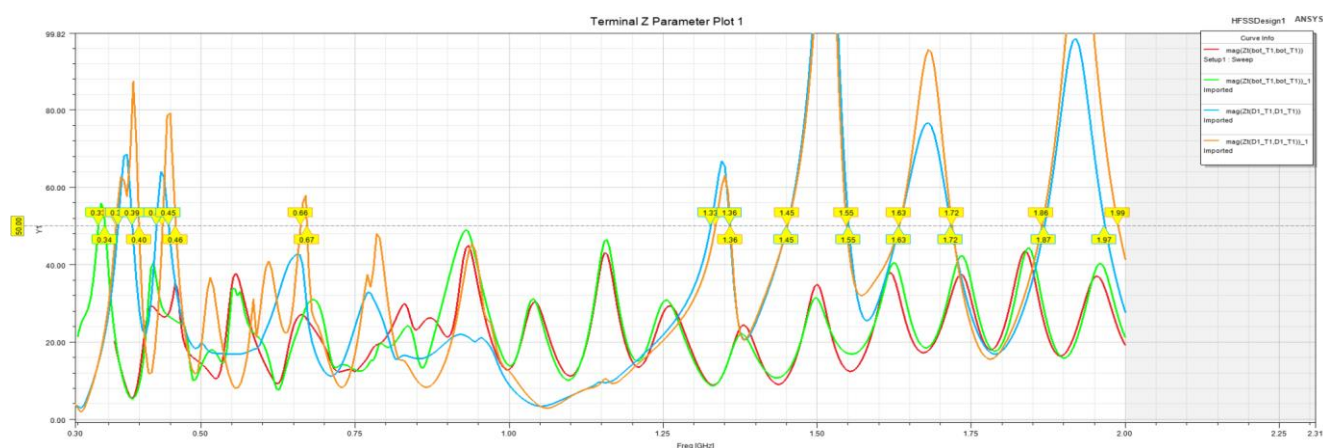


червоний – класична антена без екрану; зелений – класична антена з екраном;
синій – модифікована антена без екрану; помаранчевий – модифікована антена з екраном.

Рисунок 2.14 – VSWR всіх чотирьох досліджуваних конструкцій антен в діапазоні значень від 1 до 5

Згідно до правил узгодження в антенній техніці вважається, що $VSWR < 2$ є прийнятним рівнем. Тому на рисунку 2.14 на рівні $VSWR = 2$ проведено верхній маркер (синя пунктирна горизонтальна лінія). Узгодженими вважаються конструкції, $VSWR$ яких лежить нижче цього маркера. Найкраще узгодженою є модифікована антена з екраном на частоті 930 МГц з $VSWR = 1,08$, і це відповідає коефіцієнту відбиття -31,21 дБ. Це означає, що 99,92% потужності передавача йде в антену, тобто, відбивається 0,08% потужності. Це відповідає високій енергетичній ефективності цієї антени на даній частоті.

Далі розглянемо частотні залежності модуля вхідного імпедансу Z_{11} антен всіх чотирьох досліджуваних конструкцій (рисунок 2.15).



червоний – класична антена без екрану; зелений – класична антена з екраном;
синій – модифікована антена без екрану; помаранчевий – модифікована антена з екраном.

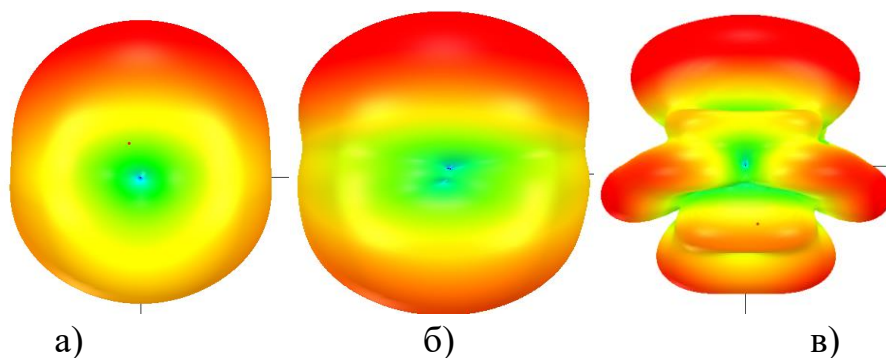
Рисунок 2.15– Z_{11} всіх чотирьох досліджуваних конструкцій антен

При суттєвих відмінностях значення вхідного імпедансу від 50 Ом (не важливо, в бік зменшення або збільшення) відбувається суттєве розлаштування антени з усіма його наслідками. При цьому зменшується коефіцієнт підсилення та збільшується рівень відбиття потужності від входу антени.

2.4 Діаграма спрямованості на різних частотах

2.4.1 Діаграма спрямованості класичної логоперіодичної антени

Діаграми спрямованості класичної логоперіодичної антени зображено на рисунку 2.16.

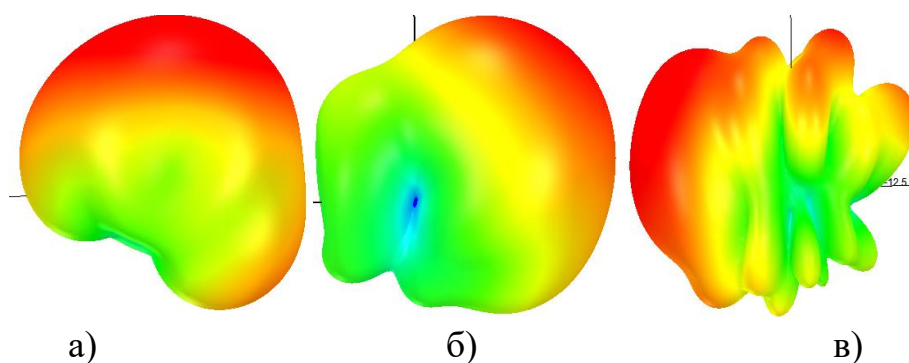


а – на частоті 360 МГц; б – на частоті 460 МГц; в – на частоті 920 МГц.

Рисунок 2.16 – Діаграма спрямованості

2.4.2 Діаграма спрямованості класичної логоперіодичної з екраном антени

Діаграми спрямованості класичної логоперіодичної з екраном антени зображено на рисунку 2.17.

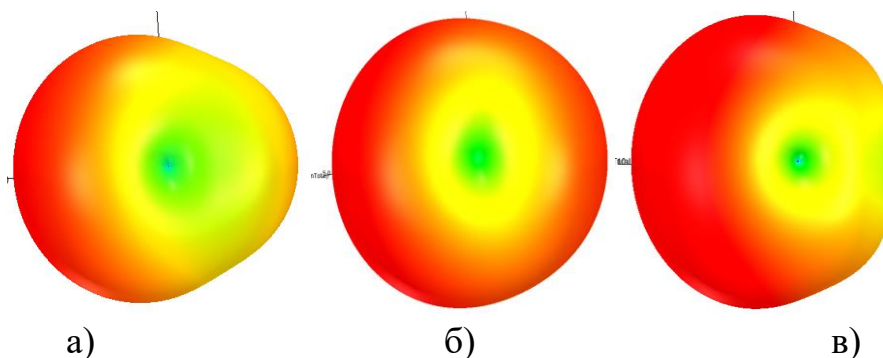


а – на частоті 360 МГц; б – на частоті 460 МГц; в – на частоті 920 МГц.

Рисунок 2.17 – Діаграма спрямованості

2.4.3 Діаграма спрямованості модифікованої логоперіодичної антени

Діаграми спрямованості модифікованої логоперіодичної антени зображено на рисунку 2.18.

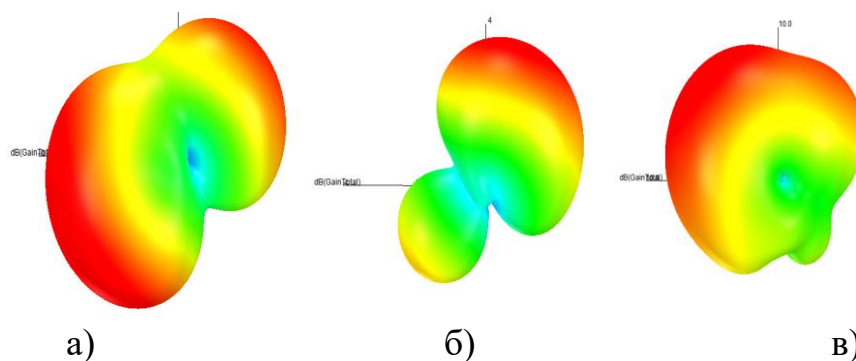


а – на частоті 360 МГц; б – на частоті 460 МГц; в – на частоті 920 МГц.

Рисунок 2.18 – Діаграма спрямованості

2.4.4 Діаграма спрямованості модифікованої логоперіодичної антени з екраном

Діаграми спрямованості модифікованої логоперіодичної антени з екраном зображено на рисунку 2.19.

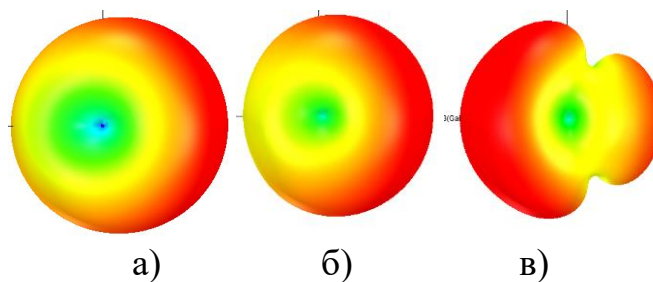


а – на частоті 360 МГц; б – на частоті 460 МГц; в – на частоті 920 МГц.

Рисунок 2.19 – Діаграма спрямованості

2.4.5 Діаграма спрямованості модифікованої логоперіодичної антени зі зміненим портом на частотах

Діаграми спрямованості модифікованої логоперіодичної антени зі зміненим портом зображено на рисунку 2.20.



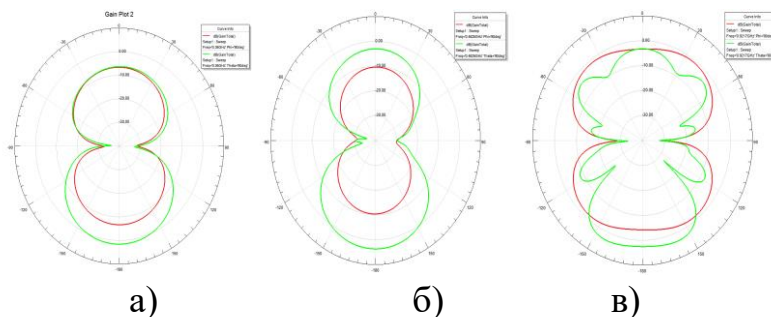
а – на частоті 360 МГц; б – на частоті 460 МГц; в – на частоті 920 МГц.

Рисунок 2.20 – Діаграма спрямованості

2.5 Діаграма спрямованості в розрізі на різних частотах

2.5.1 Діаграма спрямованості в розрізі класичної логоперіодичної антени

Діаграми спрямованості в розрізі класичної логоперіодичної антени зображено на рисунку 2.21.

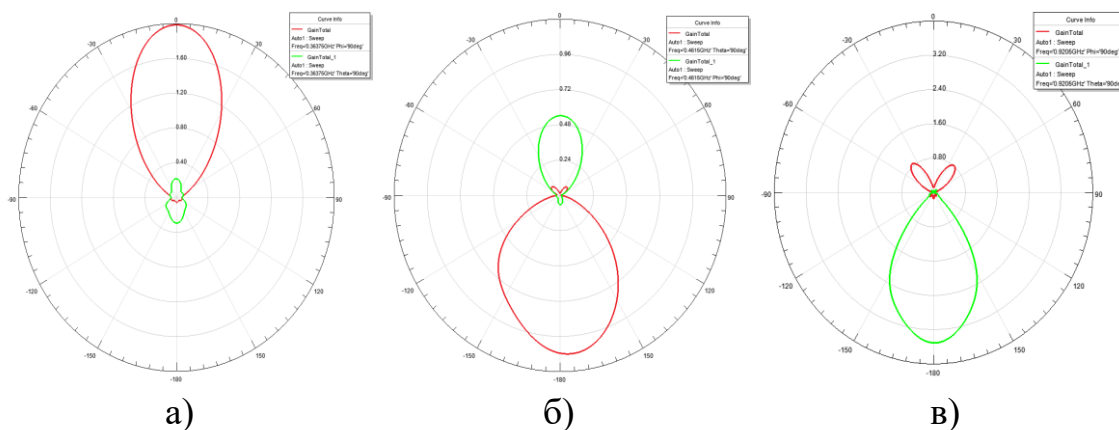


а – на частоті 360 МГц; б – на частоті 460 МГц; в – на частоті 920 МГц.

Рисунок 2.21 – Діаграма спрямованості в розрізі

2.5.2 Діаграма спрямованості в розрізі класичної логоперіодичної з екрану антени

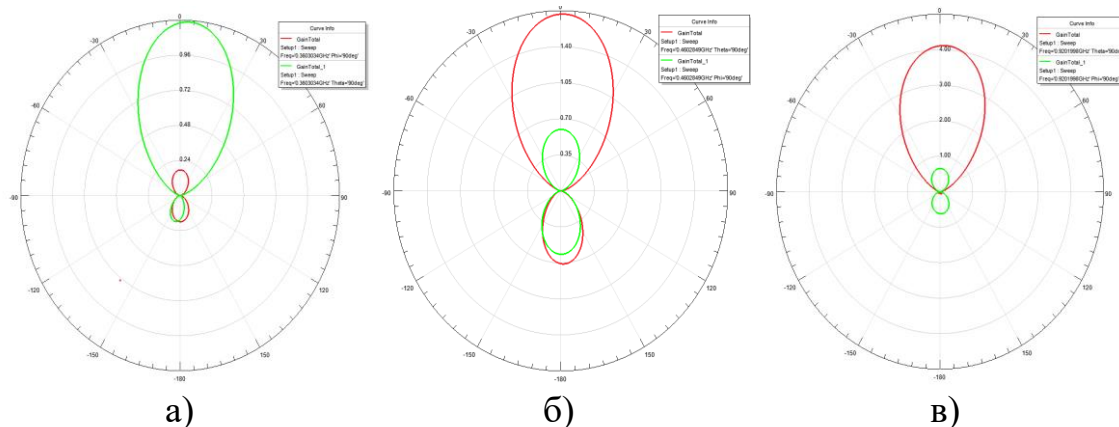
Діаграми спрямованості в розрізі класичної логоперіодичної антени з екраном зображено на рисунку 2.22.



а – на частоті 360 МГц; б – на частоті 460 МГц; в – на частоті 920 МГц.

Рисунок 2.22 – Діаграма спрямованості в розрізі

2.5.3 Діаграма спрямованості в розрізі модифікованої логоперіодичної антени

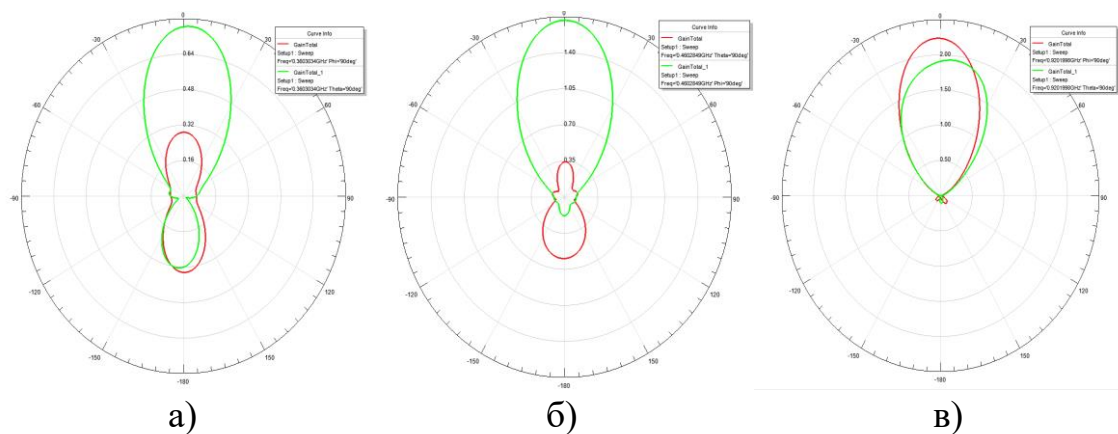


а – на частоті 360 МГц; б – на частоті 460 МГц; в – на частоті 920 МГц.

Рисунок 2.23 – Діаграма спрямованості в розрізі

2.5.4 Діаграма спрямованості в розрізі модифікованої логоперіодичної антени з екраном

Діаграми спрямованості в розрізі модифікованої логоперіодичної антени з екраном зображено на рисунку 2.22.

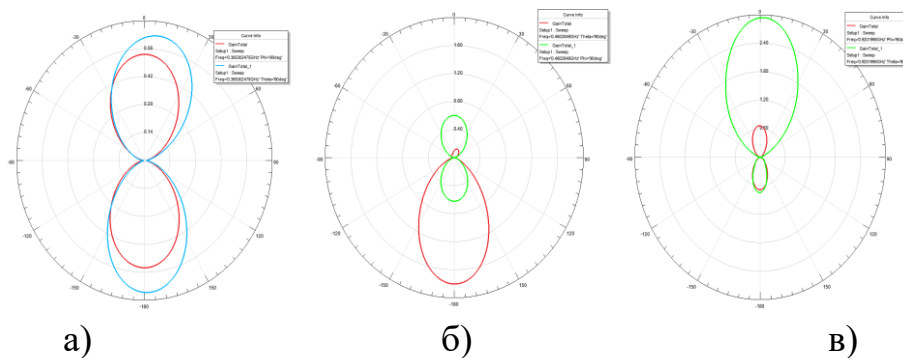


а – на частоті 360 МГц; б – на частоті 460 МГц; в – на частоті 920 МГц.

Рисунок 2.24 – Діаграма спрямованості в розрізі

2.5.5 Діаграма спрямованості в розрізі модифікованої логоперіодичної антени зі зміненим портом

Діаграми спрямованості в розрізі модифікованої логоперіодичної антени зі зміненим портом зображено на рисунку 2.25.



а – на частоті 360 МГц; б – на частоті 460 МГц; в – на частоті 920 МГц.

Рисунок 2.25 – Діаграма спрямованості в розрізі

2.6 Порівняння коефіцієнта підсилення

2.6.1 Класична логоперіодична антена

На рисунку 2.26 зображена ДН відносно макету класичної логоперіодичної антени.

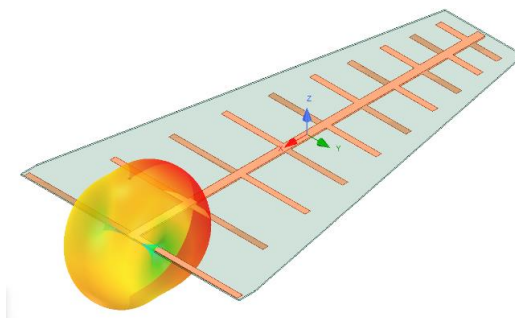


Рисунок 2.26 – Орієнтація в просторі об’ємної діаграми спрямованості відносно макету

В таблиці 2.1 вказано на яке значення коефіцієнту підсилення на відповідних частотах.

Таблиця 2.1 – Значення коефіцієнтів підсилення на відповідних частот

Частота	360 МГц	460 МГц	920 МГц
Коефіцієнт підсилення	1,60	3,70	4,20

2.6.2 Класична логоперіодична антена з екраном

На рисунку 2.27 зображена ДН відносно макету класичної логоперіодичної антени з екраном.

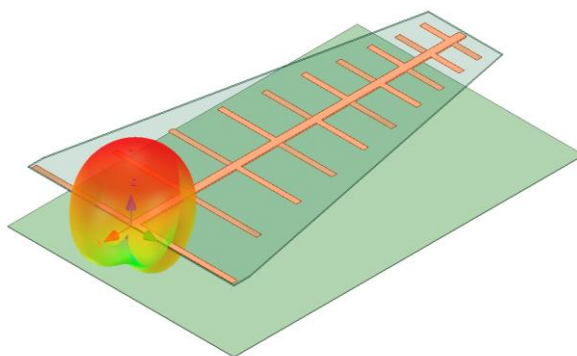


Рисунок 2.27 – Орієнтація в просторі об’ємної діаграми спрямованості відносно макету

В таблиці 2.2 вказано на яке значення коефіцієнту підсилення на відповідних частотах.

Таблиця 2.2 – Значення коефіцієнтів підсилення на відповідних частот

Частота	360 МГц	460 МГц	920 МГц
Коефіцієнт підсилення	3,20	5,30	9,00

2.6.3 Модифікована логоперіодична антена

На рисунку 2.28 зображена ДН відносно макету модифікованої логоперіодичної антени.

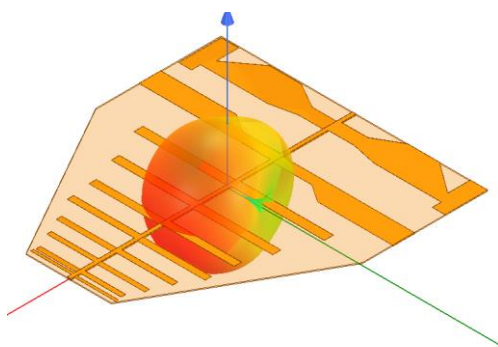


Рисунок 2.28 – Орієнтація в просторі об’ємної діаграми спрямованості відносно макету

В таблиці 2.3 вказано на яке значення коефіцієнту підсилення на відповідних частотах

Таблиця 2.3 – Значення коефіцієнтів підсилення на відповідних частот

Частота	360 МГц	460 МГц	920 МГц
Коефіцієнт підсилення	0,80	2,30	6,15

2.6.4 Модифікована логоперіодична антена зі змінним портом підключення

На рисунку 2.29 зображена ДН відносно макету модифікованої логоперіодичної антени з екраном.

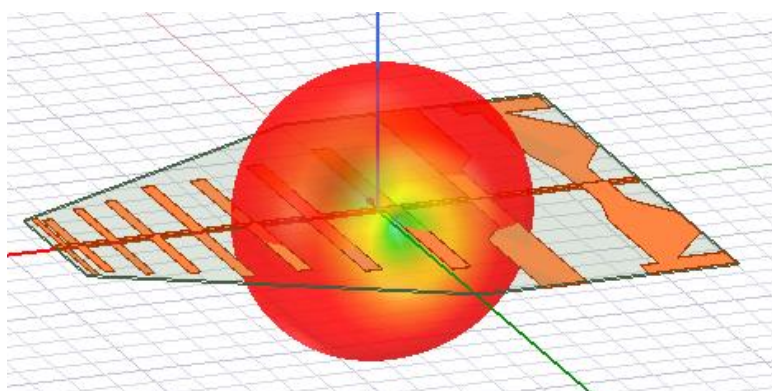


Рисунок 2.30 – Орієнтація в просторі об'ємної діаграми спрямованості відносно макету

В таблиці 2.5 вказано на яке значення коефіцієнту підсилення на відповідних частотах

Таблиця 2.5 – Значення коефіцієнтів підсилення на відповідних частот

Частота	360 МГц	460 МГц	920 МГц
Коефіцієнт підсилення	0,70	1,80	2,90

2.6.5 Модифікована логоперіодична антена з екраном

На рисунку 2.30 зображена ДН відносно макету модифікованої логоперіодичної антени з екраном.

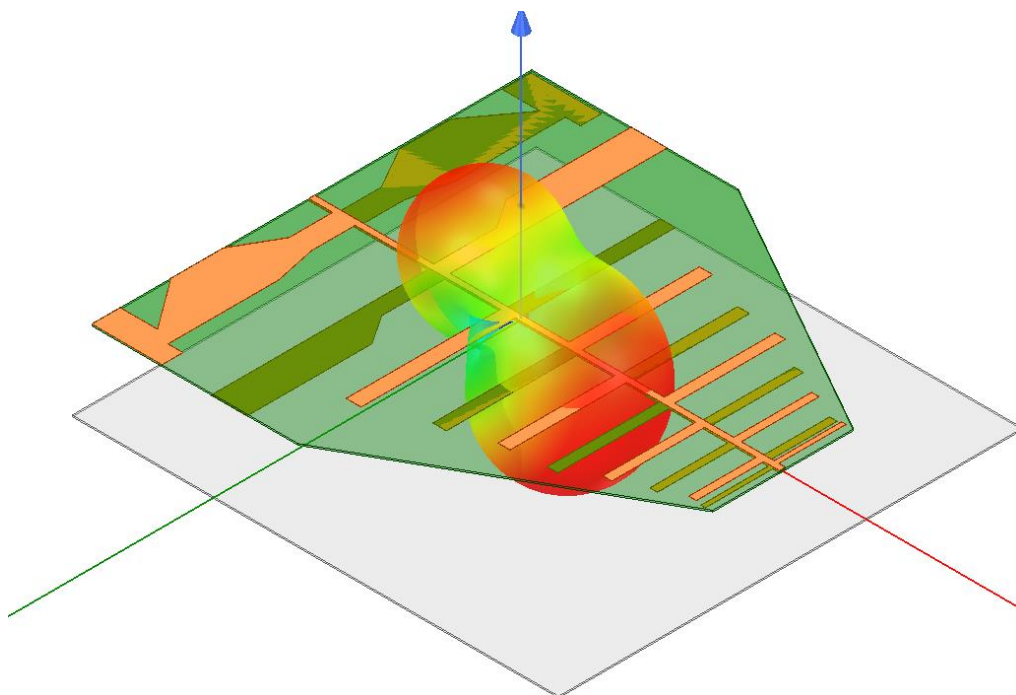


Рисунок 2.30 – Орієнтація в просторі об’ємної діаграми спрямованості відносно макету

В таблиці 2.5 вказано на яке значення коефіцієнту підсилення на відповідних частотах

Таблиця 2.5 – Значення коефіцієнтів підсилення на відповідних частот

Частота	360 МГц	460 МГц	920 МГц
Коефіцієнт підсилення	0,20	2,80	7,80

2.6.6 Порівняння частотних характеристик антен

На рисунку 2.31 показано, як змінюється коефіцієнт підсилення при різних видах логоперіодичної антени.

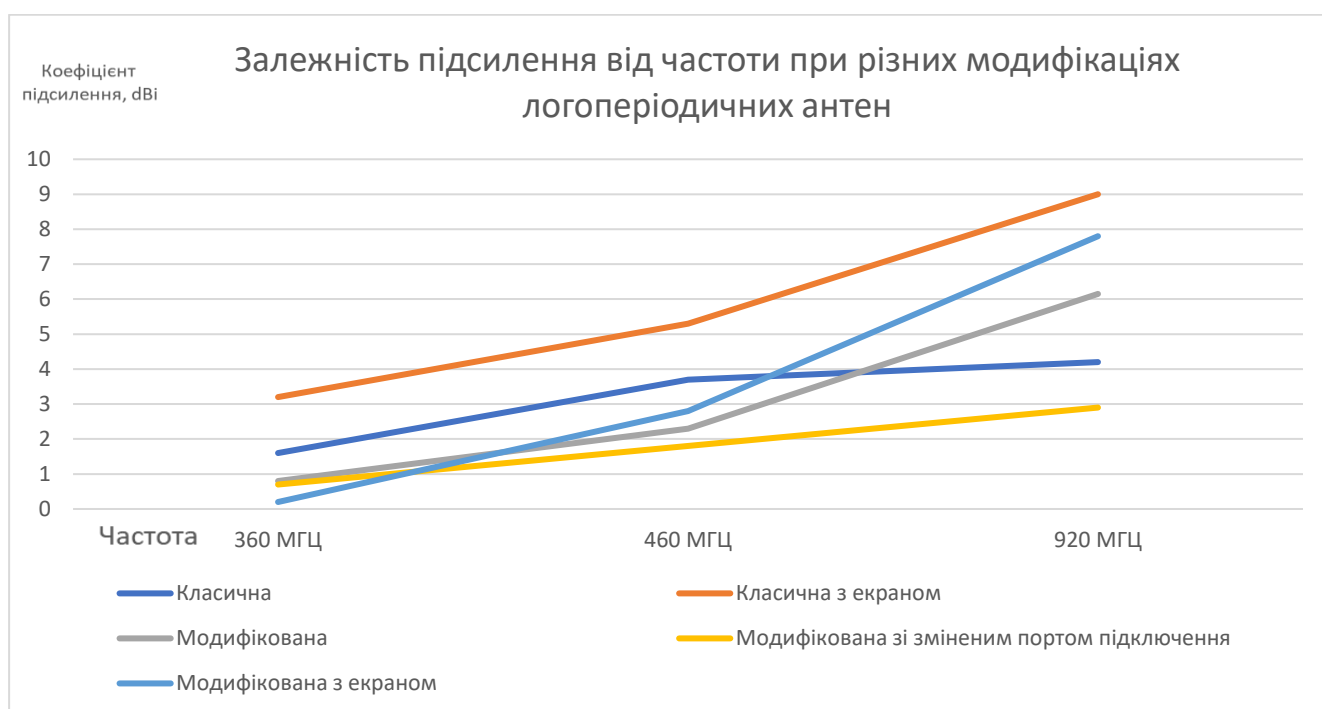


Рисунок 2.31 – Залежність підсилення від частоти при різних модифікаціях логоперіодичних антен змодельованих антен в середовищі HFSS

З рисунку 2.31 бачимо, що підсилення не лінійно збільшується при зростанні частоти.

3 ФІЗИЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ. МАКЕТУВАННЯ АНТЕНИ ТА ЇЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Опис ідеї дослідження та аналіз макету

Ідея дослідження полягає в верифікації даних моделювання в HFSS за допомогою фізичного експериментального дослідження макету антени. Почнемо з класичної логоперіодичної антени (рисунок 3.1).

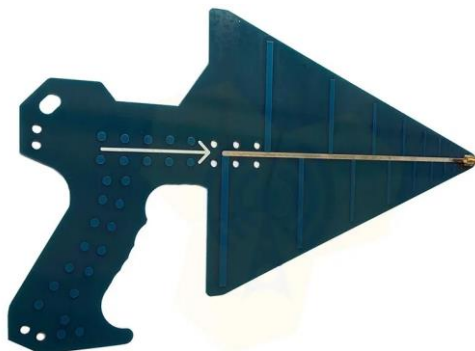


Рисунок 3.1 – Фото класичної логоперіодичної антени

Дослідимо модифіковану логоперіодичну антену (рисунок 3.2).

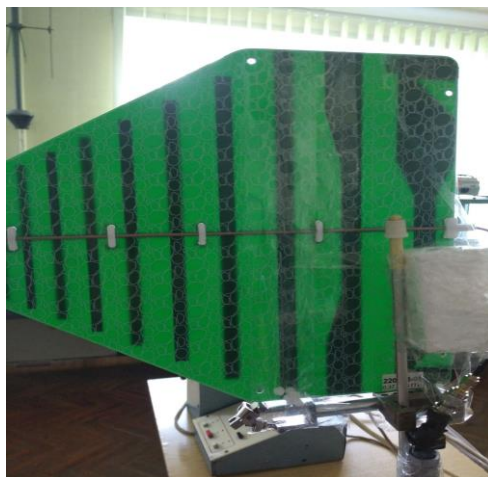


Рисунок 3.2 – Фото модифікованої логоперіодичної антени

3.2 Програмне забезпечення експерименту

При виконанні експерименту використовувалась програма PolarPlot. Зображення головного меню програми (рисунок 3.3).

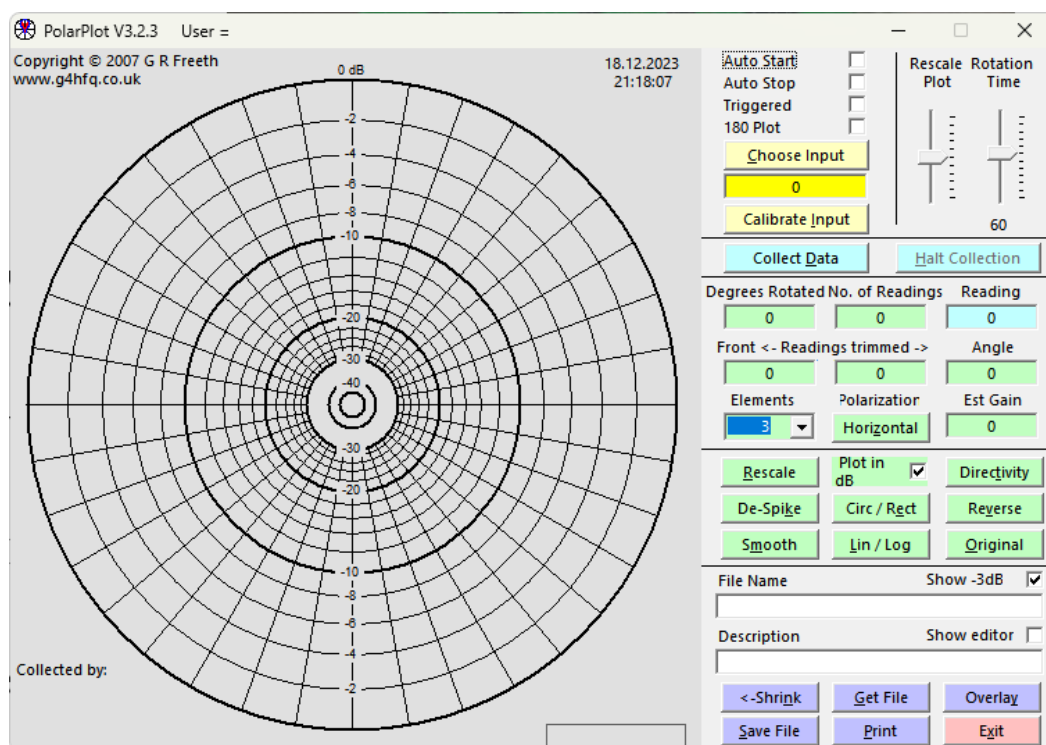


Рисунок 3.3 – Головне меню програми PolarPlot

Опис структурної схеми експерименту:

– приймаюча частина: детектор та підсилювач низькочастотної потужності, досліджувана антена, аналогово-цифровий перетворювач на вході звукової карти комп'ютера, комп'ютер з програмою яка виконує функцію запису та накладання, що дозволяє порівняти безліч варіантів досліджень, опорно рухаючий пристрій;

– передаюча частини: генератор та антена (аналогічна досліджуваній).

PolarPlot дозволяє змінювати час обертання за допомогою повзунка «Rotation Time»(Часу Обертання) у верхній частині головного екрана, щоб встановити час за який потрібно завершити. Для більш детального отримати діаграму необхідно

встановити час обертання трохи більше ніж час обертання буму антени, що гарантуватиме закінчення його обертання, перш ніж програма досягає завершення побудова діаграми. Час змінний від 20 до 120 секунд (або більше, якщо Ви збільшили максимальний час обертання) [13].

Програма дозволяє отримати результати:

- кругла/прямокутна та лінійна/логарифмічна – зняти діаграму на сітку, що є круговою або прямокутною, та (або) з лінійним масштабом або з логарифмічним масштабом;
- 360 градусна або 180 градусна – можете розглянути ці 360 зчитувань, взятих як розповсюджується більш ніж 360 градусів або 180 градусів. Достатньо було б вимірювань, які дасть поворот буму на 360 градусів, але є випадки, коли цього може бути замало.
- розрахунок діаграми – за це відповідає налаштування "Triggered" на панелі вибору. Програма має додаткову автоматичну особливість, яка може відчувати початок і кінець діаграми відповідно до присутності або відсутності сигналу сигналу.

Збереження діаграми спрямованості. Для того щоб зберегти зняті показання у вигляді файлу, клацніть на кнопку «Save File...». З'явиться стандартне вікно діалогу Windows. Зверніть увагу, що ці значення, що зберігаються, не дані зображення. Самі зчитування, будь-які додаткові описи, які Ви дали діаграмі, надрукувавши у вікні «Description», також зберігаються, разом із вашим ім'ям користувача, датою та часом. Також зберігаються установки параметрів, які Ви зробили для відношення "вперед-назад", градуси обертання і тощо. Коли Ви згодом перезавантажуєте діаграму, використовуючи кнопку "Get File...", ці параметри відновлюються так, щоб діаграма з'явилася на екрані у тому вигляді, в якому вона була збережена.

Для перерахування попередньо збереженої діаграми, треба клацнути по кнопці «Get File...». Перед Вами з'явиться стандартне діалогове вікно Windows. Виберіть файл, який Ви бажаєте перезапустити. Початкові призначення урізаних

зчитувань, градуси повороту і тощо. відновлюються разом зі знятими показаннями, тепер вони будуть доступні для подальшої модифікації, якщо є необхідність. Якщо Ви хочете подивитися на початкові значення, натисніть на кнопку «Original Data». Якщо ви отримуєте повідомлення PLP030, ви намагаєтеся вивести на екран діаграму, яка містить показання з більшими ніж ваші установки за замовчуванням для звукового входу. Якщо Ви хочете побачити діаграму належним чином, тимчасово повторно встановіть значення Peak input level from sound card рівному числу, показаному в повідомленні PLP030. Після завершення роботи з файлом знову встановіть значення назад.

Програма надає можливість накладення однієї діаграми поверх іншої. Це можливо натиснувши на кнопку «Overlay ...» та обрати файл з діаграмою яку бажаємо накласти. Це працює так само, як і Get File ..., але без першого клірингу екран. Коли виконуємо накладення, повинні розуміти, що є деякі відмінності у формі діаграми згідно з тим, чи зняли показання за годинниковою стрілкою або проти годинникової стрілки обертання. Рекомендується, щоб для полегшення порівняння, стандартизувати зняття своїх діаграм або за годинниковою стрілкою або проти годинникової стрілки обертання антени. Ви можете повністю змінити показане обертання будь-якої діаграми, клацнувши на кнопці «Reverse» і зберегти знову.

Видалення небажаних звукових сплесків. Якщо з'являються електрично шумний QTH, очистити їх можна, клацнувши по кнопці «De-Spike». Програма перегляне всі читання, що з'явилися раптові зміни вхідного рівня. Якщо ці зміни між двома послідовними зчитуваннями перевищує "Audio spike trigger level"-звуковий рівень спускового механізму, тоді визначається характер знака більше або менше цього показання, воно замінюється значенням попереднього зчитування плюс різницю між тим читанням та його безпосереднім попередником. Таким чином, якщо попереднє зчитування за тенденцією у рівні збільшувалося, то більш високе показання замінюватиметься, заміна буде зроблена, якщо тенденція зменшиться. Цей процес «прибирання» головним чином успішний, якщо не має

різкої послідовності показань, що швидко змінюються. Значення "Audio spike trigger level" змінюється на екрані "Settings", який з'явиться після того, як Ви двічі клацніть по діаграмі [13].

Програма дозволяє вказати та змінити такі параметри, як:

- кількість елементів, натиснувши по вікну "drop down". Зміна числа елементів змушує потік обчислень застосовувати різні відношення до горизонтальної та вертикальної ширини променя. Точні відносини будуть чудово налаштовані, оскільки велика робота зроблена для розуміння цих відносин;
- поляризація, яка використовувалася при вимірах, може бути визначена, клацнувши по кнопці Horizontal. Це – перемикач, який змінюється з горизонтального положення вертикальне і навпаки;
- оцінку посилення відображається після натискання кнопкою «Rescale», воно розраховується шляхом вимірювання кута між точками половинної потужності -3dB;
- доступний інший метод оцінки посилення, натисніть на кнопку «Integrate». Це поєднується показаннями, які прийняті з усієї діаграми, таким чином беруться до уваги потужність у бічних пелюстках. Очікуйте, що посилення буде трохи нижчим, ніж за методом «-3dB», особливо якщо Ви маєте місцеві відображення сигналу, які можуть виявитися як «криві» бічні пелюстки.

В програмі є можливість зміни перегляду діаграми: кругова, прямокутна та логарифмічна, лінійна шкала. Якщо використовується «Plot in dB» у вікні, діаграми відображають відносну потужність децибелах. Є можливість вивести діаграму відносної field strength (лінійний масштаб), не перемикаючи Plot in dB у вікні вибору. Це зробить промінь дійсно нагадує промінь, але це все ще та сама антена. Щоб побачити різницю між круговою і прямокутною діаграмою, необхідно натиснути по кнопці «Rectangular». Вигляд кнопки тоді зміниться на "Circular". Прямокутна діаграма корисніша при перегляді на бічних пелюсток. Аналогічно, можливо змінити масштаб будь-якої діаграми, клацнувши по кнопці Lin Scale. Вигляд кнопки тоді зміниться на Log Scale. Зняті показання щодо потужності - все

ще в децибелах, якщо у вікні вибору "Plot in dB" не прибрано галочка, тоді це – відносна field strength. Прямокутна діаграма спрямованості покаже чорне коло в районі точки початку та кінця збору даних, і вертикальні лінії у 10 градусному інтервалі.

Щоб швидко виявити точки рівня -3dB (зазвичай вони в головному пелюстці) у прямокутній діаграмі, перш за все, переходимо до кругового відображення, потім натискаємо по кнопці «Rescale», потім повертаємося до прямокутного відображення діаграми. Будь-яке бажане положення старту може бути вибрано вручну, змінюючи значення Degrees Rotated.

Не менш значущою функцією програм є Згладжування. Іноді спочатку зібрані показання з деяких причин трохи підстрибувати за рівнем. Шуми в сигналі, або вітрі, що качає антену, може спотворити зняття показань. Є можливість відтворити на екрані гладкішу діаграму, засоби програми дозволяють. Щоб видаляти великі «сплески» на негладкій діаграмі, використовуйте засіб «Despike». Згладжування сплесків складатиме певний процес за підготовленими точками, порівнюючи в них миттєві значення в попередній і наступній точці. Цей досить елементарний процес, виконаний двічі від дасть хороший результат побудови у результаті. Клацнути по кнопці «Smooth» декілька разів можливо побачити зміни в бачитимете жодної зміни в діаграмі.

PolarPlot має такі налаштування, як:

- колір. Маємо можливість змінити кольори. Двічі натиснувши по області діаграми на екрані та з'явиться екран «Polar Plot Settings»;
- авто старт/стоп. Може виникнути неправильний збір даних через некоректну синхронізацію старту/стоупу з початком та зупинкою при обертанні антени. Є засіб, який дозволить виявити PolarPlot присутність або відсутність сигналу, покаже початок та кінець збору даних. Вгорі, зліва області екрана управління є два вікна вибору, одне для Авто-старту та одне для Авто-стоупу. Можемо активувати або зробити неактивними ці функції, клацнувши у вікні. Авто-старт та Авто-стоп мають рівень спускового механізму, який є доступним на екрані

«Polar Plot Settings», який з'явиться по подвійному натисканні на екранній області діаграми. Авто-старт має два параметри – вхідний рівень спускового механізму, нижче якого будь-який отриманий сигнал ігнорується для того, щоб повідомити початок збору даних, і затримки між рівнем спускового механізму, що досягається, і початком збору. Маємо можливість використовувати ці параметри, щоб блокувати шум фону, якщо умови ефіру погані, і затримки включення передавача, якщо такі взагалі є. Авто-стоп також має два параметри – вхідний рівень спускового механізму, нижче за який будь-який отриманий сигнал розглядають як потенційний імпульс кінця збору даних, і число послідовних показань нижче рівня спускового механізму, яке повинен бути отриманий перш ніж збірка даних припинена. Це дозволяє продовжити збирати показання, навіть якщо з'явиться глибокий провал за рівнем. Якщо Авто-стоп використовується, тоді ці надлишкові показання автоматично урізаються на задній стороні [13];

- калібрування вхідного рівня. Програма передбачає, що звукова карта – близька за лінійністю у всьому її діапазоні. Це дозволить обчислювати відносну потужність, засновану на найвищому допустимому вхідному рівні сигналу, який перебувати на лінійній частині характеристики кривої, легкочитається звуковою картою. Точність діаграми залежить від лінійності системи в цілому, від рівня RF до вхідного рівня, що подається на звукову карту до PolarPlot драйверу. При виборі ВЧ та НЧ рівнів уникайте комбінації, яка виходить під час роботи на мінімальних або максимальних рівнях. Робота близько до цих точок має більш високий шанс з'явитися на нелінійній частині огинаючої характеристики, що може дати діаграму, що дивно виглядає.

3.3 Дослідження ДС

В ході дослідження було зроблено такі етапи підготовки:

- оцентрування передаючої та передавальної антени;

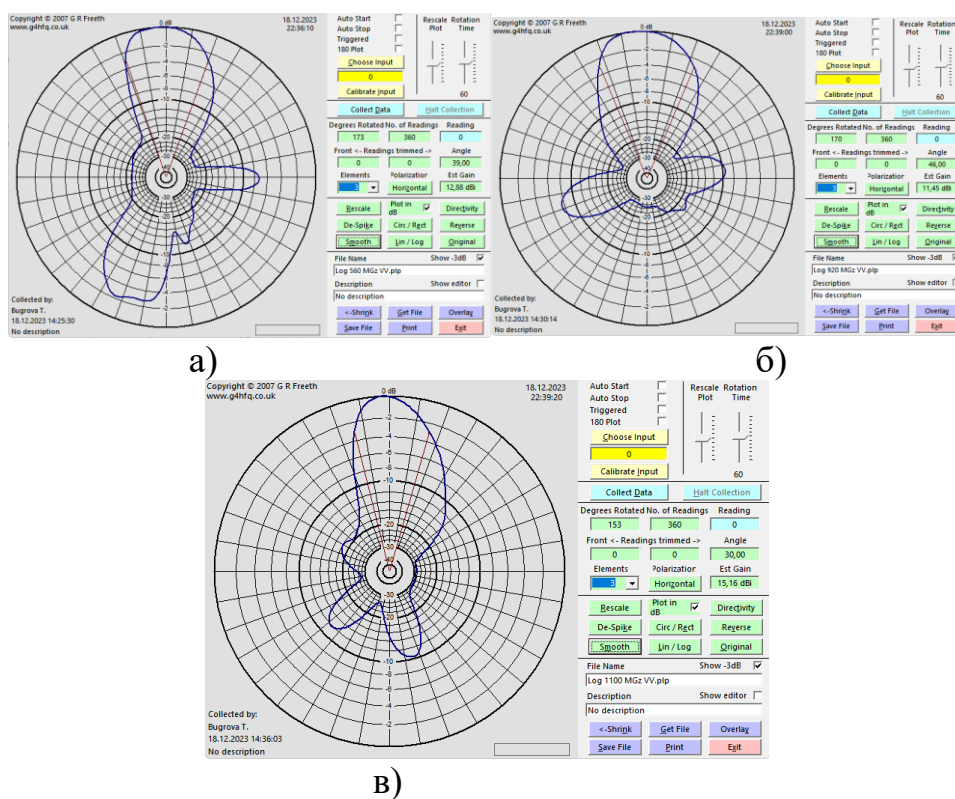
– вимірювання швидкості обертання валу опорно рухомого пристрою та швидкість розгортки в програмі PolarPlot. Це було необхідно для їх синхронізації;

– безпосередні вимірювання.

Дослідження виконувались на частотах 408 МГц, 460 МГц, 920 МГц. Ці частоти було обрано через лакуарність спектру генеруючого елементу (клістрона).

3.4 Порівняння експериментальних та розрахункових результатів для класичної логоперіодичної антени

На рисунку 3.4 зображена діаграма спрямованості експериментальної класичної логоперіодичної антени.



а – частота 560 МГц; б – частота 920 МГц; в – частота 1100 МГц.

Рисунок 3.4 – Діаграма спрямованості класична логоперіодичної антени

На рисунку 3.5 зображено експериментальний графік залежності підсилення від частоти класичної логоперіодичної антени.

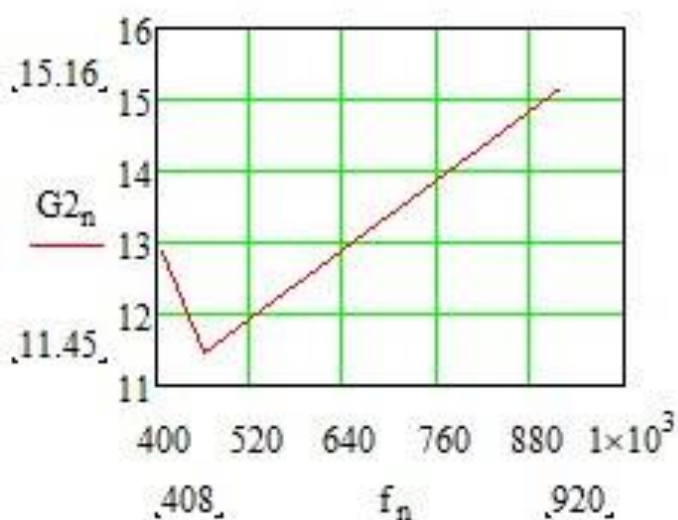
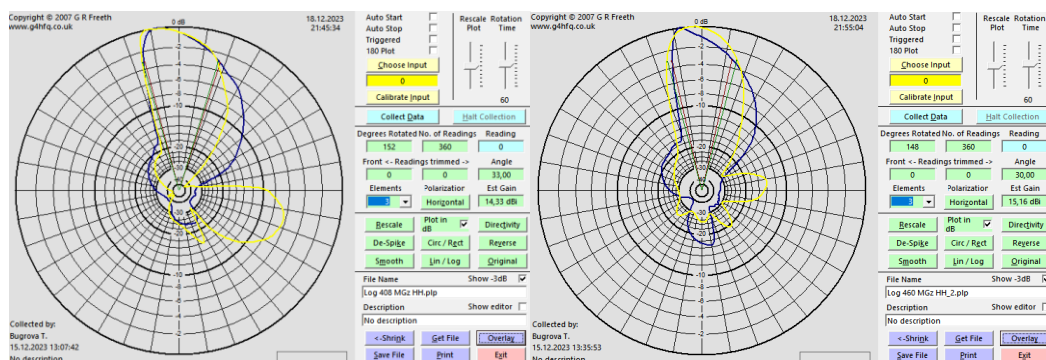


Рисунок 3.5 – Експериментальний графік залежності підсилення від частоти класичної логоперіодичної антени

З рисунку 3.5 виходить, що на частотах 560 МГц – 12,88 дБ, 920 МГц – 11,45 дБ та 1100 МГц – 15,16 дБ, тобто підсилення нелінійно збільшується при зростанні частоти.

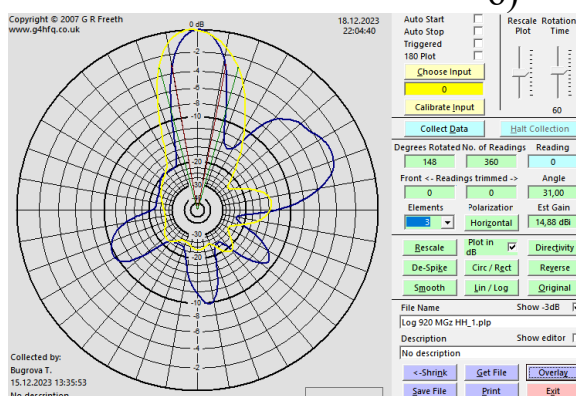
3.5 Порівняння експериментальних та розрахункових результатів для модифікованої логоперіодичної антени

Вимірювання проводились на вертикальній, горизонтальній та кросполяризації (вертикальна – передавач, горизонтальна – приймач) (Рисунок 3.6).



a)

б)



в)

а – частота 560 МГц; б – частота 920 МГц; в – частота 1100 МГц;
синя крива – переріз у вертикальній площині; жовта крива – переріз у
горизонтальній площині.

Рисунок 3.6 – Діаграма спрямованості модифікованої логоперіодичної антени

На рисунку 3.7 зображено експериментальний графік залежності підсилення від частоти модифікованої логоперіодичної антени.

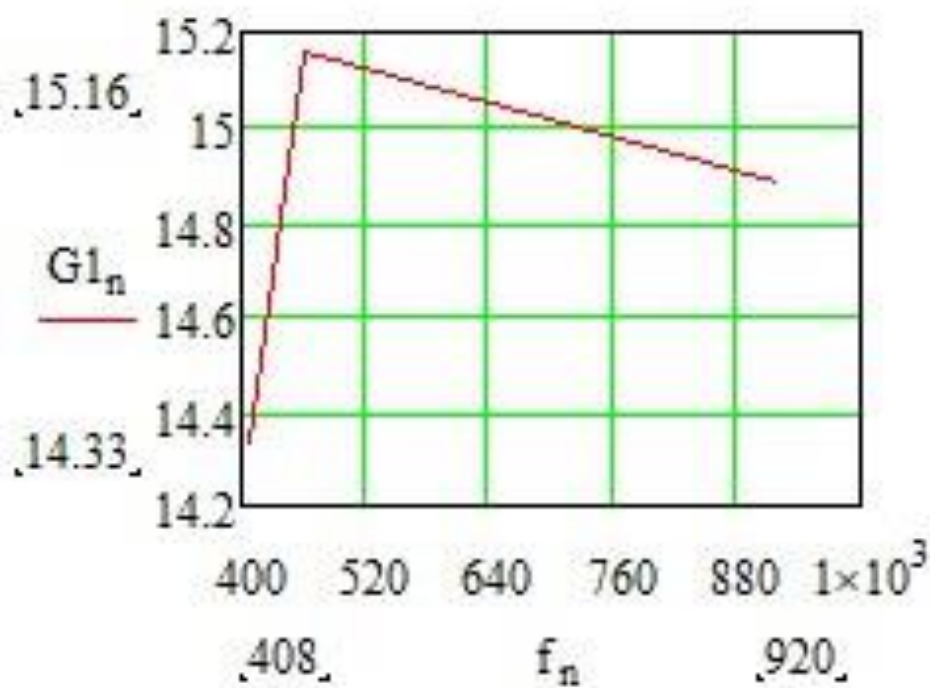
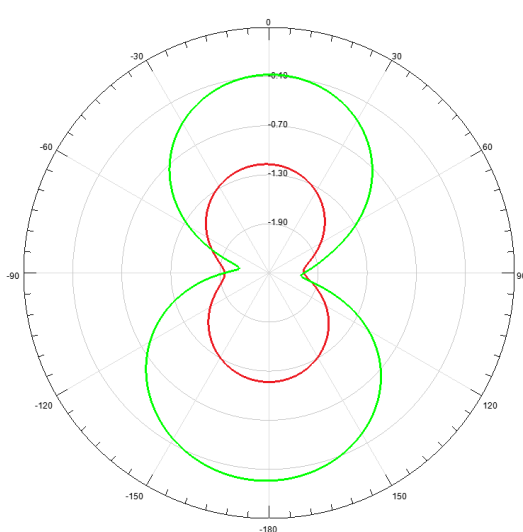
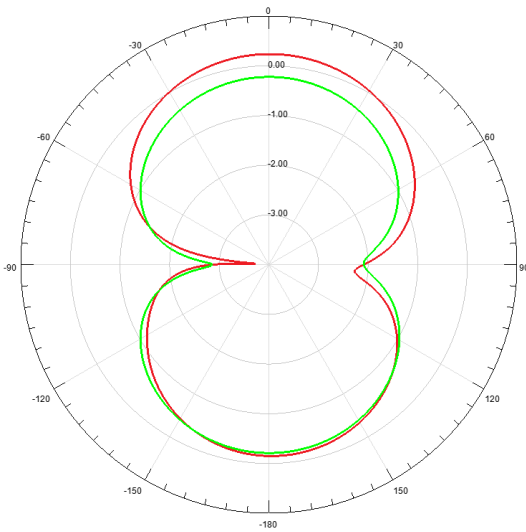


Рисунок 3.7 – Експериментальний графік залежності підсилення від частоти модифікованої логоперіодичної антени

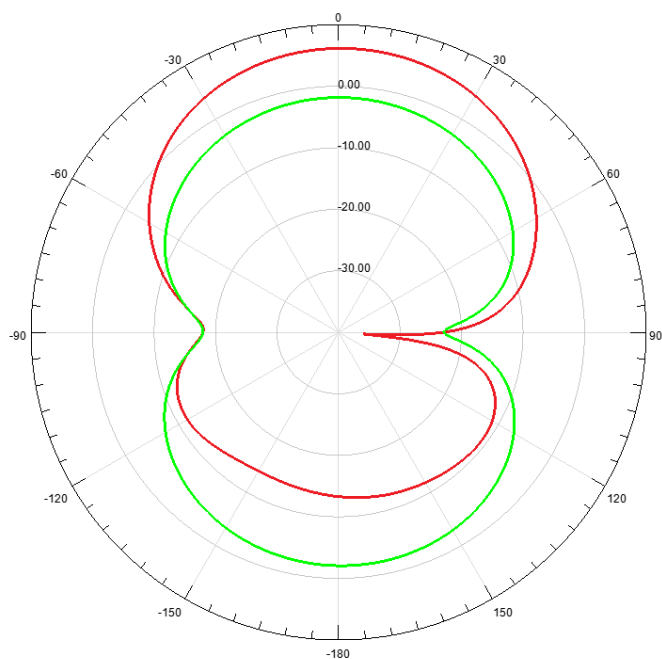
На частотах 408 МГц – 14,33 дБ, 460 МГц – 15,16 дБ та 920 МГц – 14,88 дБ, тобто підсилення не лінійно збільшується при зростанні частоти.



а)



б)



в)

а – частота 560 МГц; б – частота 920 МГц; в – частота 1100 МГц;
червона крива – переріз у вертикальній площині; зелена крива – переріз у
горизонтальній площині.

Рисунок 3.8 – Розрахункова діаграма спрямованості модифікованої
логоперіодичної антени в програмі HFSS

На рисунку 3.9 зображено графік залежності підсилення від модифікованої
логоперіодичної антени в HFSS.

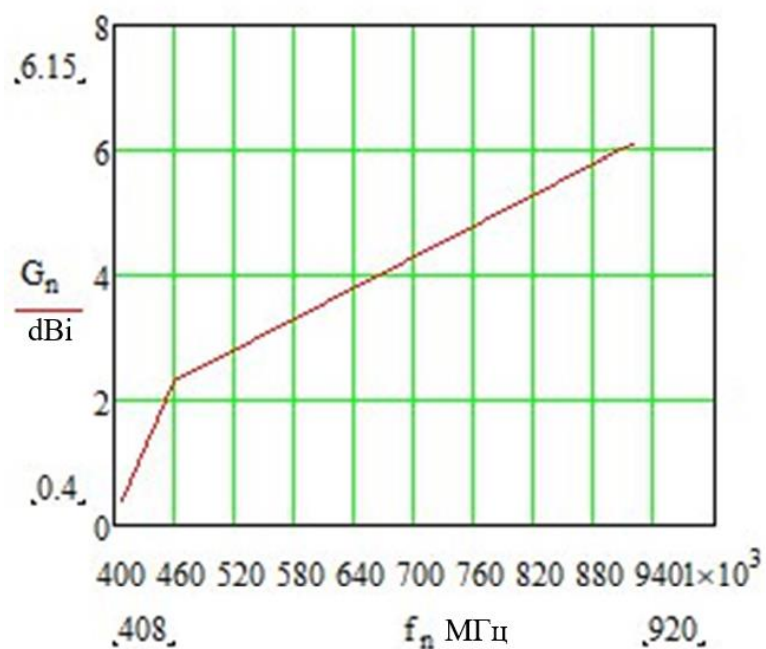


Рисунок 3.9 – Графік залежності підсилення від частоти змодельованої модифікованої логоперіодичної антени в HFSS

На рисунку 3.9 бачимо на частотах 408 МГц – 0,4 дБ, 460 МГц – 2,3 дБ та 920 МГц – 6,15 дБ, тобто підсилення не лінійно збільшується при зростанні частоти.

ВИСНОВКИ

В ході моделювання проєктів та дослідження їх параметрів і характеристик ми отримали наступні результати:

- в результаті дослідження антени у діапазоні 0,3-1,3 ГГц було розраховано параметри логоперіодичної антени яка складається з десяти вібраторів. Шляхом моделювання було отримано якісні і кількісні характеристики роботи логоперіодичної антени;

- коефіцієнт стоячої хвилі запропонованої антени нижче 2 (1,08) в робочій смузі частот, що дає гарне узгодження з лінією живлення в 50 Ом. Коефіцієнт підсилення сягає 6,15 dBi;

- додавання металевого екрану не значно впливає на характеристики антени, злегка порушуючи симетрію діаграми спрямованості, яка віджимається від екрану;

- шляхом дослідження та модернізації логоперіодичної антени для частот 0,3-1,3 ГГц шляхом зміни геометрії вібраторів отримано кращий ступінь узгодження на частоті 920 МГц (було $K_{CX} = 2$, стало $K_{CX} = 1.19$);

- завдяки усім проведеним змінам коефіцієнт підсилення збільшився з 4,20 dBi до 6,15 dBi. Можливо було і збільшити цей показник до 7,80 dBi, але при цьому погіршуються показники узгодження в смузі частот.

Таким чином, отримані характеристики і параметри підтверджують можливість використання даної модифікації антени в якості антени для РЕБ та в системах окупних РЕР та РЕБ для збереження життів особового складу підрозділів на передовій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Молодцов В.А. Необхідність реформування воєнного управління відповідно до концепції мережецентричної війни. Актуальні проблеми будівництва та службово-бойової діяльності сил охорони правопорядку / В.А. Молодцов, А.В. Писарєв, І.О. Радченко // Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції. Харків: НАНГУ. – 2021. – С. 31-32.
2. Молодцов В.О. Головні фактори, що визначають зміну форм і способів військових дій. Актуальні проблеми будівництва та службово-бойової діяльності сил охорони правопорядку / В.О. Молодцов, А.В. Писарєв // Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції. Харків: НАНГУ, – 2021. – С. 2627.
3. Молодцов В.О. Основні слабкі сторони і протиріччя концепції мережецентричної війни. Участь правоохоронних органів та військових формувань держави у забезпеченні безпеки України / В.О. Молодцов, А.В. Писарєв, І.О. Радченко // Збірник тез доповідей VI Всеукраїнської науково-практичної конференції. Харків: НАНГУ, – 2021. – С. 56-59.
4. Молодцов В.О. Можливості асиметричної протидії у мережецентричній війні. Участь правоохоронних органів та військових формувань держави у забезпеченні безпеки України / В.О. Молодцов, А.В. Писарєв, І.О. Радченко // Збірник тез доповідей VI Всеукраїнської науково-практичної конференції. Харків: НАНГУ, – 2021. – С. 52-59.
5. Іванов І. Зміст та роль радіоелектронної боротьби в операціях XXI століття / І. Іванов, І. Чадов // Зарубіжний військовий огляд. – 2011. – №1. – С. 14-20.
6. Антонович П.І. Перспективні методи деструктивного впливу на системи військового управління у єдиному інформаційному просторі / П.І. Антонович, С.І. Макаренко, Р.Л. Михайлов, К.В. Ушань // Вісник Академії військових наук. – 2014. – №3(48). – С. 93-101.

7. Донсков Ю.Є. До питання про дезорганізацію управління військами (силами) та зброєю / Ю.Є. Донсков, О.Л. Морареску, В.В. Панасюк // Військова думка. – 2017. – №8. – С. 19-25.
8. Ємельянов Ю. Погляди керівництва ЗС США на ведення електронної війни в операціях ХХІ століття з використанням сил повітряно-космічного нападу / Ю. Ємельянов // Зарубіжний військовий огляд. – 2015. – № 9. – С. 63-72.
9. Логоперіодична антена: принцип дії, використання і особливості [Електронний ресурс] – Режим доступу: siteMasters.com.ua (дата звернення 09.10.2023) – Назва з екрану.
10. Матьє М. Радіорелейні системи передачі / – М. Матьє. – М: Радіо та зв'язок, – 1982. – 280 с.
11. Шифрин Я.С. Антенны / Я.С. Шифрин. – Харьков: ВИРТА, – 1976. – 408 с.
12. Бененсон Л.С. Сверхширокополосные антенны / Л.С. Бененсон.– М.: «Мир», – 1964. – 416 с.
13. Polar Plot Version 1.60.5, програма для просмотра диаграммы направленности вращающейся антенны [Електронний ресурс] – Режим доступу: Pandia.ru (дата звернення 18.12.2023) – Назва з екрану.