

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра радіотехніки та телекомунікацій
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему **АНТЕНА ДЛЯ ПРИДУШЕННЯ СИСТЕМ РЕБ**

Виконав(ла): студент(ка) 2м курсу, групи БК-913М

Спеціальності _____

172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація) _____

«Інформаційні мережі зв'язку»

ВЕЛИЧКО В.О.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник БУГРОВА Т.І.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент _____

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

2024 рік

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри РТТ
 к.ф.-м.н., доц. Сергій САМОЙЛИК
 « » грудня 2024 року



ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА

ВЕЛИЧКУ Владиславу Олександровичу

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Антену для придушення систем 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 "15" жовтня 2024 року № 416

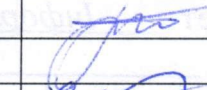
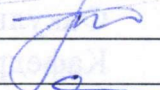
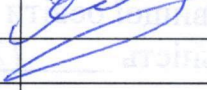
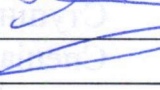
2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 15 грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Змоделювати в електродинамічному середовищі 3D моделювання HFSS широкосмугову антену для придушення РЕБ. Діапазон придушення 0,3...1,35 ГГц. Дослідити узгодження з коаксіальним кабелем живлення. Змоделювати діаграми спрямованості.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Удосконалити конструкцію логоперіодичної антени. Узгодити її з кабелем живлення. Дослідити основні характеристики спрямованості та елементи матриці розсіювання у робочій смузі частот. Вивчити вплив геометрії антени на її основні параметри.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів) презентація роботи в Microsoft PowerPoint

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-3	БУГРОВА Т.І., к.т.н., доцент		
Нормо-контроль	МОРОЗ Г.В., ст. викладач		

7. Дата видачі завдання «15» вересня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Літературний огляд	2 тижні	виконано
2	Проектування логоперіодичної антени в ANSYS HFSS	1 тиждень	виконано
3	Діаграми спрямованості, коефіцієнт відбиття, КСХ, вхідний опір антен	2 тижні	виконано
4	Проведення експерименту	1 тиждень	виконано
5	Розрахунки характеристик і параметрів	3 тижні	виконано
6	Оформлення ПЗ	1 тиждень	виконано
7	Рецензування	1 тиждень	виконано
8	Захист	1 день	

Студент(ка)

(підпис)

Владислав ВЕЛИЧКО

(ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Тетяна БУГРОВА

(ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 70 с., 7 табл., 48 рис., 10 джерел.

ЛОГОПЕРІОДИЧНА АНТЕНА, РЕБ, БПЛА, ДІАГРАМА СПРЯМОВАНОСТІ, ВХІДНИЙ ОПІР, КОЕФІЦІЄНТ ПІДСИЛЕННЯ, КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ, РОЗПОДІЛ БЛИЖНЬОГО ПОЛЯ, VSWR, HFSS.

Робота присвячена моделюванню широкосмугової логоперіодичної антени для застосування в засобах РЕБ.

Мета роботи – дослідження плоскої логоперіодичної антени в якості приймально-випромінювального компоненту в апаратурі протидії безпілотникам.

Наукова новизна полягає в моделюванні та дослідженні спрямованих властивостей та характеристик узгодження логоперіодичних антен різних модифікацій в середовищі електродинамічного моделювання НВЧ пристроїв HFSS в широкому діапазоні частот.

Практична цінність результатів роботи полягає в тому, що спроектована логоперіодична антена в режимі прийому може застосовуватись в якості елемента в детекторі місцезнаходження дрону, а в режимі випромінювання потужності – як елемент протидронового засобу.

ЗМІСТ

	С.
Скорочення та умовні позначки	8
Вступ.....	9
1 Огляд літератури та формулювання задач дослідження	11
1.1 Основні відомості про РЕБ	11
1.2 Вибір типу антени для різних задач, які вирішує РЕБ.....	15
1.2.1 Клеверна антена (антена конюшина).....	16
1.2.2 Всеспрямована (Omnidirectional) антена	17
1.2.3 Квадрифілярна антена (Моксона)	20
1.2.4 Спрямована антена	21
1.3 Формування ДС логоперіодичної антени.....	24
1.4 Унікальність властивостей логоперіодичних антен.....	29
2 Побудова моделей логоперіодичних антен та їх дослідження в середовищі HFSS	32
2.1 Модель плоскої логоперіодичної антени в середовищі Ansys HFSS32	
2.2 Розподіл ближнього електромагнітного поля в площині підкладки на різних частотах	35
2.2.1 Вплив екрану на розподіл ближнього поля логоперіодичної антени на різних частотах	36
2.2.2 Вплив металевого екрану на формування ближнього поля компактної логоперіодичної антени на різних частотах.....	39
2.2.3 Вплив розміщення точки живлення антени на розподіл ближнього поля	41
2.3 Узгодження вхідного опору антени з лінією живлення в смузі частот.....	42
2.4 Діаграма спрямованості.....	47
2.4.1 ДС класичної логоперіодичної антени на частотах	47
2.4.2 ДС класичної логоперіодичної антени з металевим екраном	47

2.4.3 ДС модифікованої компактної логоперіодичної антени	48
2.4.4 ДС компактної логоперіодичної антени з екраном	49
2.4.5 ДС компактної логоперіодичної антени з живленням з боку найдовшого вібратора	49
2.5 Діаграма спрямованості на різних частотах в площинах основних перерізів	50
2.5.1 ДС класичної логоперіодичної антени в площинах основних перерізів	50
2.5.2 ДС класичної логоперіодичної антени з екраном в площинах основних перерізів	51
2.5.3 ДС в площинах основних перерізів модифікованої логоперіодичної антени	51
2.5.4 ДС в площинах основних перерізів компактної логоперіодичної антени з екраном	52
2.5.5 ДС в площинах основних перерізів компактної логоперіодичної антени зі зміщенням в бік найдовшого вібратора портом	52
2.6 Коефіцієнт підсилення логоперіодичної антени	53
2.6.1 Класична логоперіодична антена	53
2.6.2 Класична логоперіодична антена з алюмінієвим екраном	54
2.6.3 Компактна логоперіодична антена	55
2.6.4 Компактна логоперіодична антена зі зміщенням в бік найдовшого вібратора портом живлення	56
2.6.5 Компактна логоперіодична антена з металевим екраном	56
2.6.6 Порівняння частотних характеристик антен різних модифікацій	57
3 Експериментальне дослідження логоперіодичної антени	59
3.1 Основна мета експерименту	59
3.2 Програма для автоматизації вимірювань ДС антен	60
3.3 Вимірювання ДС	61
3.4 Порівняння експериментальних та розрахункових ДС класичної логоперіодичної антени	62

3.5 Порівняння експериментальних та розрахункових ДС для компактної логоперіодичної антени.....	63
Висновки	68
Перелік джерел посилань	70

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

HFSS	–	програма для моделювання пристроїв НВЧ та антен
VSWR	–	коефіцієнт стоячої хвилі
БП	–	бічна пелюстка
БПЛА	–	безпілотний літальний апарат
ДС	–	діаграма спрямованості
КВ	–	коефіцієнт відбиття
ККД	–	коефіцієнт корисної дії
КП	–	коефіцієнт підсилення
КСХ	–	коефіцієнт стоячої хвилі
ЛПА	–	логоперіодична антена
НВЧ	–	надзвичайно високі частоти
РЕБ	–	радіоелектронна боротьба
РЕЗ	–	радіоелектронні засоби
РЕП	–	радіоелектронне придушення
СУ	–	система управління

ВСТУП

Засоби ведення війни сучасними способами передбачає інтенсивне застосування різного роду безпілотників, особливо в умовах наступальних дій переважаючого за чисельністю і кількістю озброєнь та боєприпасів ворога. Роль безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та систем радіоелектронної боротьби (РЕБ) з ними є беззаперечною.

Вирішальним фактором ефективності застосування БПЛА на полі бою є високоякісний зв'язок та швидкість і надійність каналу передавання і приймання даних. Природньо, що удосконалення технології застосовуваних БПЛА викликає і відповідний розвиток технологій подавлення дронів ворога для захисту як особового складу, техніки та боєприпасів на полі бою, так і цивільних об'єктів в тилу, зокрема, для захисту об'єктів критичної інфраструктури.

Антени як компонент систем радіоелектронної боротьби відіграють важливу роль у формуванні перешкод для сигналів навігації та зв'язку БПЛА або у придушенні сигналів ворога. Це важливо у випадку, коли йдеться про боротьбу з якісними безпілотниками і досвідченими операторами. РЕБ має два принципово різних сценарії. Один – більш поширений – полягає у створенні широкосмугових перешкод неспрямованої у просторі дії. Подібні системи РЕБ використовують такі слабоспрямовані антени, як штирі, квадрифіляри (антени Моксона), антени типу конюшина, тощо. Для таких систем неважливо, з якого саме напрямку прилетить дрон. Вони накривають певну територію захисним куполом подавлення сигналів дронів. Другий сценарій боротьби з дронами передбачає ідентифікацію кутового напрямку прильоту БПЛА і цілеспрямоване подавлення всіх його сигналів у цьому напрямку. Природньо, що в цьому сценарії використовуються спрямовані антени, які можуть створювати потік потужності великої щільності. Згаданим вимогам відповідають такі антени,

як панельні (різноманітні плоскі антенні решітки, які для розширення смуги робочих частот конструюють із груп елементів декількох електричних розмірів) або логоперіодичні антени. контексті логоперіодичні антени завдяки здатності однією антеною перекривати широкий частотний діапазон.

В зв'язку з цим проведення детального симулювання логоперіодичної антени є актуальною і практично корисною задачею. Задача полягає у вивченні і вдосконаленні можливостей цих антен для збільшення дальності передачі сигналу разом із збільшенням рівня захисту в умовах складної заводової обстановки.

Можливості програми електродинамічного симулювання НВЧ пристроїв та антен HFSS дозволяють всебічно дослідити логоперіодичні антени як з точки зору їх спрямованих властивостей в широкому діапазоні частот, так і з точки зору узгодження цих антен з лінією живлення у вигляді коаксіального кабелю. Дослідження полягає у вивченні впливу різних конструктивних та електрофізичних параметрів логоперіодичних антен на ефективність їх застосування в складі комплексів РЕБ.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Основні відомості про РЕБ

В останні роки у зв'язку із великою війною на території нашої країни і вогнищами озброєних конфліктів по всьому світу проти ворога, переважаючого за кількістю, територією, доступом до фінансів, запасом і номенклатурою озброєнь різних типів, надзвичайно великого значення набули безпілотники як ефективна і відносно дешева альтернатива класичним видам озброєнь. Це не тільки БПЛА, але і наземні та морські дрони. Причому в сучасній війні широко застосовуються найрізноманітніші їх види – як розвідувального та моніторингового спрямування, для коригування артилерійського вогню, для аудіо- і відеофіксації успішних вражень ворожих цілей, так і бойові дрони-камікадзе із вибухівкою на борту. І як завжди, разом із розвитком якоїсь ефективної дії, набуває паралельного розвитку і протидія – в нашому випадку, це засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ).

Ці засоби включають використання електромагнітної енергії і складаються фізично із пристроїв спрямованого випромінювання енергії спектра електромагнітних хвиль. Вони призначаються для безпосереднього впливу на противника і його засоби зв'язку, навігації, та здатність управляти керованими боєприпасами.

Переваги в військово-технічній галузі не забезпечує позитивного завершення операції, якщо системи управління (СУ) різного призначення і рівня керування не є пригніченими [1].

Системи РЕБ складаються з наступних класів:

- елементи систем керування військами та зброєю;
- радіорозвідка та засоби збереження, обробки та розподілу даних;

- радіоелектронні засоби боротьби з ворогом (РЕЗ);
- СУБД, самі по собі бази даних та комп'ютерні мережі;
- тактичні кімнати з системами аналітичної підтримки прийняття рішень для командирів різного рівня.

Зростання впливу радіоелектронної боротьби (РЕБ) у військових конфліктах має місце з ряду наступних причин [2]:

- необхідність забезпечення оперативного і стійкого керування контингентом і зброєю на театрі військових дій;

- зростання застосування РЕЗ найрізноманітніших видів для передавання інформації на значні дистанції для своєчасного, миттєвого та гнучкого керування особовим складом і зброєю;

- необхідність миттєвого руйнування засобів бойового керування ворога шляхом застосування апаратури радіоелектронного придушення, що змінює радикально співвідношення сил у бік ініціативної сторони;

- зростання мобільності контингенту, збільшення масовості тактичних операцій, а також автоматизація всіх ланок керування (контингентом, технікою, зброєю);

- здійснення систем інтегрованого керування, розвідки, апаратури РЕБ та іншого забезпечення, що надає перевагу ресурсів на полі бою. Відомо, що понад 60% учасників бойових дій забезпечують функціонування ударних сил з застосуванням РЕБ в інформаційній та бойовій роботі;

- революційні зміни суті РЕБ змінили її зміст, технічну реалізацію, сценарії використання, роботу засобів радіорозвідки, постановки завад та захисту від них;

- зростання ступеню універсальності засобів РЕБ які спрямовано на протидію системам бойового керування противника тепер дає можливість сягати всієї глибини театру військових дій, здійснювати розвідувально - інформаційне забезпечення бойових дій, застосовувати як нелетальні, так і

летальні способи, виводити з ладу системи керування, техніку і озброєння будь-коли та захисити власні війська.

Техніка РЕБ використовується в прихованому та відкритому вигляді. Вона працює в складі багатьох систем у найрізноманітніших місцях розміщення: це і бойове керування, і радіозв'язок, і розвідка, і коригування вогню артилерії, і протидія системам керування ворога та захист власних систем. Техніка РЕБ застосовує комп'ютерні мережі ворога для здійснення впливу на нього у власних інтересах.

Війна сприяла вибуховому розвитку РЕБ за останні роки. Створюються нові засоби РЕБ, наприклад для нанесення таємних ударів радіоелектронної протидії (РЕП) на основі нових фізичних явищ, проведення інформаційно-технічних втручань і атак на комп'ютерні мережі ворога [3].

Велику роль відіграє інформаційна війна, наприклад, війна в соціальних мережах, кібервійна, керування військовим контингентом в об'єднаному інфо-комунікаційному просторі. Підвищується значення засобів впливу на комп'ютерні мережі ворога всіх рівнів – локальні, регіональні глобальні і, природньо, зростає значення захисту власних комп'ютерних мереж [6, 17]. Саме РЕБ зараз і є сучасною базою інформаційної війни [3].

Перерахуємо відмінності в організації РЕБ, які з'явилися в останні роки:

- широке охоплення об'єктів, причому, це не тільки вплив на РЕЗ ворога, але і захист РЕЗ, бойової техніки, військових об'єктів і зброї. Засоби РЕБ протидіють видам зброї, яка функціонує на основі випромінювання зосередженої в просторі потужності. Ціль – системи ППО ворога;

- при застосуванні РЕБ використовується доктрина радіоелектронного забезпечення дій на полі бою;

- РЕБ у ЗСУ протидіє системам бойового керування як основний елемент інформаційної боротьби з ворогом.

Перспективи розвитку в найближчому майбутньому можна сформулювати наступним чином [3]:

- зменшення самостійності засобів РЕБ, як частини інформвійни, які далі використовуватимуться як засоби протидії системам бойового керування в ході інформаційних операцій;

- змінюється роль засобів радіоелектронної боротьби у проведенні військових операцій від супроводження ударних контингентів на театрі бойових дій до ведення боїв окремого виду військ і до елемента інтегрованого у загальну систему інформаційного протиборства ворогові;

- застосовуються нові види енергії для використання їх у РЕБ, створюється на основі нових фізичних явищ як летальні, так і нелетальні види зброї;

- заміна захисної дії на дію враження або пригнічення впливу і захисту не тільки РЕЗ, але і техніки, військових об'єктів інфраструктури, зброї, особового складу військових підрозділів і органів цивільного керування;

- перехід війни в інформаційно-інтелектуальну сферу, втручання у процес підготовки і прийняття стратегічних рішень, у систему планування і управління військовою операцією, вдосконалення засобів РЕБ;

- інформаційне забезпечення та автоматизація процедури створення нових РЕБ.

РЕБ давно вже стала самостійним видом бойових дій.

Тому важливими є маскувальні міроприємства, розробка протидії технічним пристроям розвідування ворога, пристроям вогневого враження його РЕЗ та запобігання захвату їх диверсійними групами. Велику роль відіграє тактична нестандартність алгоритму використання та раптовість.

Перерахуємо основні методи пригнічування роботи РЕЗ:

- засоби масового враження з використанням масованих атак на системи бойового керування ворога, а саме вплив на командні пункти, пункти зв'язку;

- фізичне захоплення цих пунктів і їх знищення зменшує для ворога здатність керувати особовим складом;
- дезорієнтація ворога і обман шляхом підміни даних розвідки ворога з подальшим прийняттям хибних розпоряджень для особового складу;
- радіоелектронне придушення виводить з робочого стану інформсистеми і РЕЗ ворога.

Щоб спотворити результат роботи інформаційних ресурсів ворога формуються хибні цілі та засоби випромінення потужності на основі інфразвукових, лазерних, пучкових сигналів [5].

З'явився новий вид радіоелектронної боротьби під назвою радіоелектронний удар.

Наостанок перерахуємо тут цілі РЕБ [8]:

- отримання, аналіз, оцінка розвідувальних даних радіозасобами;
- визначення енергетичного спектру та обробка і аналіз;
- здійснення засобів радіоелектронної безпеки та скритності застосування РЕЗ.

Системи РЕБ використовуються для збору розвідданих.

1.2 Вибір типу антени для різних задач, які вирішує РЕБ

Антени для систем РЕБ сприяють створенню перешкод і придушуванню сигналів ворога, зокрема, коли мова йде про боротьбу з якісними БПЛА і підготовленими операторами. Антена РЕБ безпосередньо формує дальність, час роботи, виборчі просторові властивості, ступінь захисту.

Сучасні тактичні РЕБ-установки зазвичай комплектуються чотирма основними типами антен: конюшина (клеверна), всеспрямована (Omnidirectional), квадрофілярна (Mokson) та спрямована (панельна).

Перераховані типи антен мають особливості, що варто враховувати, щоб вибрати оптимальну антену у відповідності до умов застосування.

Врахуємо плюси і мінуси цих антен для того, щоб зрозуміти, який вид антен краще підходить для конкретних завдань в межах радіоелектронної боротьби.

1.2.1 Клеверна антена (антена конюшина)

Клеверна антена (рис. 1.1) є достатньо поширеним типом антен для РЕБ тактичного типу для створення перешкод засобам ворога, зокрема БПЛА, шляхом застосування поляризації обертання. Вона створює рівномірний за потужністю «купол» завади у всій верхній напівплощині. Такий спосіб є ефективним у випадку, коли треба покрити широку просторову зону.



Рисунок 1.1 – Антени типу конюшина (клеверного типу)

Розглянемо переваги антен типу конюшина. Першою перевагою є колова поляризація, яка забезпечує зменшення ймовірності підльоту дрона

під кутом, зручним для нього. Це збільшує загальну ефективність дії системи РЕБ.

Другою перевагою цих антен є рівномірне енергетичне покриття простору: антена створює рівномірний куполоподібний розподіл потужності завади в просторі. Це ідеально підходить для відносно рівномірного розподілу сигналу по всій зоні і запобігає проникненню дрона у прорани або отвори в просторі куполу РЕБ.

Третьою перевагою є велика гнучкість антен конюшинного типу. Особливо це є важливим у випадку, коли напрямок атак безпілотників безперервно змінюється, тому що антена конюшинного типу не сфокусовує випромінювану в просторі потужність в жодному конкретному напрямку.

Тепер зупинимось на недоліках антен конюшинного типу. Це, насамперед, втрата потужності, що випромінюється у неробочому (задньому по відношенню до основного) напрямку. Такий хвіст ДС – не є критичним недоліком, але наявність його зменшує потенційну дальність дії РЕБ на 10%.

А от надійність конструкції конюшинних антен невелика, зокрема, вони є нестійкими до механічних ушкоджень. Внаслідок порушень їх геометрії збільшується коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ), а далі це потенційно може призвести до виведення РЕБ із ладу, особливо у випадку, якщо джамер не облаштований циркулятором.

Антена типу конюшина найкраще пристосована для РЕБ, де необхідно використовувати широке охоплення простору з рівномірним розподілом потужності завади в цьому просторі. Проте, використовувати її слід обережно внаслідок деякої конструктивної нестійкості.

1.2.2 Всеспрямована (Omnidirectional) антена

Всеспрямована антена – це всебічний захист за рахунок розподілу потужності згенерованої завади в усіх напрямках відносно вертикальної осі антени (рис. 1.2). Це чудовий варіант для ситуацій, де необхідно створити

захисне поле, яке охоплює усі боки водночас, окрім єдиного напрямку – згори. Це важливо для захисту об'єктів з низькою ймовірністю атаки зверху і з високою ймовірністю прильоту БПЛА в будь-якому з інших напрямків.



Рисунок 1.2 – Штирьові антени

Перевагами штирьових антен є простір охоплення у 360° . Омнідіретна антена поширює сигнал у всіх напрямках, таким чином забезпечуючи однакову ймовірність подавлення ворожих дронів і високий рівень захисту об'єкта. Такого роду антени зручно застосовувати для захисту позицій від атак наземних дронів.

Перевагою штирьових антен також є просторова стабільність завади внаслідок створення рівномірного за потужністю у всьому просторі випромінення сигналу завади, окрім строгої вертикалі, що зменшує вірогідність безперешкодного проходження дронів до захищеного системою РЕБ об'єкта.

Все можна зламати. Але саме ці антени найбільш надійні серед інших антен завдяки їх конструктивній простоті.

До основних недоліків можна віднести зниження дальності внаслідок низького коефіцієнту підсилення через рівномірний розподіл потужності

сигналу в просторі. При цьому система РЕБ може створювати перешкоди власним радіозасобам, які розташовані в тилу.

Недоліком є також незахищеність строго вертикального напрямку. Це створює вразливість до атак згори і скидів вертикально падаючих боєприпасів. Ця колізія виникає внаслідок того, у вертикальному напрямку потужність подавлення ворожого дрону є мінімальною. Тому ці антени самостійно не захищають від великих дронів-камікадзе, коли вони підлітають і зависають вертикально над ціллю скиду боєприпасу. В цьому випадку всі спрямовані антени комбінують з іншими випромінювачами завади у вертикальному напрямку, таким чином латаючи цю дірку в куполі радіозахисту.

Недоліком (некритичним) можна вважати лінійну поляризацію штирьових антен, бо досвідчений пілот FPV-дрону може підвести до об'єкту враження під зручним для себе просторовим кутом орієнтації власної випромінювальної антени, де дія РЕБ на його БПЛА буде мінімальною.

Одним із способів подолання цих критичних мінусів є застосування в складі РЕБ двох штирьових антен на одній робочій частоті, але взаємно зорієнтованих під кутом у 120^0 . Таке взаємне розташування двох вібраторів зменшує недоліки поляризації лінійного типу і накриває вертикальний напрямок над об'єктом захисту полем випромінювання засобу РЕБ.

Узагальнюючи сказане вище, можна зробити остаточний наступний висновок по штирьових антенах РЕБ та їх застосуванню на полі бою. Ця антена є хорошим вибором для штурмів і подібних до них активних дій в умовах, коли інші антени внаслідок великої ймовірності деформації можуть зробити дію РЕБ неефективною.

Наостанок, характеризуючи штирьові антени, треба зазначити, що саме ці дві на кожен канал РЕБ антени, що розташовані під кутом 120^0 одна відносно одної у випадку їх розміщення на даху транспортного засобу здатні захистити від безпілотників, які стоять на старті на поверхні землі і злітають тільки в момент наближення транспортного засобу для його подальшого

враження. В той же час, ні клеверна антена, ні антена Моксона не формують заваду під кутом -10 - -20° до земної поверхні.

1.2.3 Квадрифілярна антена (Моксона)

Квадрифілярна антена насправді ніяка не квадрифілярна, бо не відноситься до чотирьохзаходних спіральних антен, а є турнікетною антеною з металевим екраном і складною конфігурацією плечей вібраторів (рис.1.3). Це об'ємна порівняно геометрично не проста антена створює потужну заваду у майже всій верхній напівплощині, окрім ковзаючих кутів, тобто напрямків, близьких до поверхні землі. За формою діаграма спрямованості нагадує купольну або скоріше слабо видовжену еліптичну ДС із невеликим асиметричним хвостиком, спрямованим у тилловий бік.



Рисунок 1.3 – Антени Моксона

Переваги антени Моксона стосуються можливості точно спрямувати заваду на ціль завдяки створенню сфокусованого, витягнутого вздовж напрямку цілі подавлення, куполу випромінювання, який ефективно глушить сигнали БПЛА на певній відстані від засобу РЕБ.

Другою перевагою антени Моксона є її збільшена стійкість до спрямованих атак. Через форму своєї ДС така антена може забезпечити кращий захист від дронів, які намагаються пробити заваду з визначеного наперед напрямку.

З точки зору надійності, завдяки своїй конструкції, антени Моксона є стійкішими до механічних пошкоджень та надійнішими за антену типу конюшина алепри цьому є менш надійними у порівнянні зі штирьовими антенами.

До недоліків слід віднести складність процесу установки і налаштування у порівнянні із штирьовими антенами завдяки більшим розмірам і наявності діелектричного купольного обтікача, який повинен бути герметичним, щоб якісно захищати антену від атмосферної вологи.

На низьких робочих частотах $f < 500$ МГц антени Моксона стають занадто великими за розмірами і тому їх складно закріпити на даху автомобіля.

В діапазоні більш високих частот 800-1000 МГц, де не виникає труднощів через надмірні розміри, антена Моксона є оптимальною для створення потужних завад.

1.2.4 Спрямована антена

Один з різновидів спрямованої антени є панельна антена (рис. 1.4) та логоперіодична антена (рис. 1.5). Вона забезпечує досить вузький у просторі промінь та відповідно, потужну за рівнем сигналу заваду. Це створює ідеальні умови для атаки на конкретний дрон у визначеному напрямку.



Рисунок 1.4 – Панельна антена



Рисунок 1.5 – Логоперіодична антена

Перевагами антен обох згаданих вище типів є їх висока ефективність у процесі створення потужної завади для глушіння дронів у певному напрямку, що є наслідком гострої спрямованості ДС панельної антени і трохи меншої спрямованості антени логоперіодичного типу.

Спрямовані антени дозволяють економити енергію акумуляторів живлення РЕБ за рахунок їх більш ефективного використання гостроспрямованою антеною, оскільки потужність випромінюється у потрібному напрямку, а не розпоршується на всі боки.

Спрямовані антени дозволяють здійснювати розширення дальності атак внаслідок високій спрямованості випромінюваної потужності завади, що є важливим не тільки для запобігання атакам ударних дронів, а й для блокування сигналів дронів розвідувальним і дронам наведення артилерійських та ракетних засобів.

До недоліків спрямованих антен можна віднести обмеженість області дії у просторі завдяки вузькій ДС, тобто, для роботи з цими антенами потрібна людина-навідник РЕБ, який буде змінювати орієнтацію її у просторі і направляти на дрон.

Вимогу ж точного визначення напрямку на дрон не завжди можна здійснити, це складно зробити під час ведення бойових дій і при великій кількості дронів, які рухаються з різних напрямків одночасно.

Спрямована антена є найкращим варіантом захисту об'єкту і визначеному обмеженому секторі простору, і не забезпечує широкого купольного захисту позицій Збройних Сил.

З огляду на специфіку різних типів антен з певними перевагами і недоліками для кожного виду, вибір оптимального типу антени РЕБ не є тривіальною задачею. Він у великому ступені залежить від умов та мети використання РЕБ. У випадку необхідності створення всебічного покриття простору захистом, кращим випромінювачем буде або два вібратори під кутом 120° , або купольна антена Моксона.

В умовах окопів найкраще показала себе антена типу конюшина.

Спрямована антена буде корисною, коли вже є купольна РЕБ для захисту з усіх боків і РЕБ із спрямованою антеною додатково застосовується для знешкодження дронів, які прилітають з окремих напрямків.

Залежно від типу загрози, напрямку прильоту та умов застосування, доцільно здійснювати комбінування антен між собою і таким чином, забезпечувати комплексний захист, взважаючи на перераховані тут недоліки і переваги кожного з видів антен.

То ж, зупинимо свій вибір на логоперіодичних широкосмугових спрямованих антенах (рис. 1.5), які будуть основними в подальшому науковому дослідженні.

1.3 Формування ДС логоперіодичної антени

Будемо використовувати принцип електродинамічної подібності, де дві антени, працюючи на хвилях λ_1 і λ_2 , мають подібні електричні характеристики в разі однаковості відношень геометричних розмірів до довжин хвиль λ_1 і λ_2 . Логоперіодичні антени також конструюються за цим принципом. При цьому важливо, щоб не тільки розміри антен, але і електрофізичні параметри конструктивних матеріалів та навколишнього середовища, змінювались у цьому ж масштабі.

Наведений вище принцип електродинамічної подібності справедливий для нескінченних антен, з формою, що повністю визначається кутовими розмірами. Логоперіодичні антени масштабуються до будь-якого широкого діапазону робочих частот. Але великим недоліком цих антен є нездатність сформувати гостроспрямоване випромінювання, тому що на кожній довжині хвилі струм збудження дальнього поля обмежується резонансною до цієї довжини хвилі конкретною ділянкою структури, розмір якої визначається довжиною хвилі. Поза цією активною областю спостерігається відсічення струму збудження антени.

Добре пояснює подібне явище теорія збудження періодичних структур. Існує 2 режими роботи. В першому – ЕМХ розповсюджується вздовж структури без випромінювання, в другому – ЕМХ випромінюються в навколишній простір. При цьому режим роботи сповільнювальної структури залежить від співвідношення між повздовжнім коефіцієнтом фази повільної хвилі і та періодом структури. У випадку малих порівняно з довжиною хвилі розмірах періоду структури випромінювання немає. Коли ж період структури

і довжина хвилі зрівнюються між собою, починається потужне резонансне випромінювання [9].

В режимі резонансного випромінювання з періодичної структури потужність хвилі, яка збуджує прикінцевий відтинок цієї імпедансної структури, практично цілком переходить у потужність випромінюваних у навколишній простір електромагнітних хвиль. Напрямок випромінювання співпадає із напрямом поширення поверхневої хвилі у імпедансній структурі. Збудження періодичної структури за межами ділянки випромінювання різко спадає, тому раптовий обрив імпедансної структури не порушує режиму її функціонування на границі двох електродинамічно різних середовищ. У логоперіодичних антен період структури є змінною величиною, яка залежить від лінійного повздовжнього її розміру і зростає в напрямку віддалення від точки живлення цієї антени.

Діапазонна, або, що означає те ж саме, частотно-незалежна антена – це насправді антена кінцевих розмірів, але вона в певному частотному діапазоні володіє всіма властивостями нескінченних антен. Якими саме будуть її граничні частоти – залежить від максимальних і мінімальних поперечних розмірів антени і допускми на точність дотримання розмірів сповільнювальної структури в околиці точки живлення антени.

Розглянемо деякі приклади побудови логоперіодичних антен (ЛПА). Показана на рисунку 1.6 ЛПА конструктивно є сукупністю елементів з розмірами, що утворюють геометричну прогресію, знаменник якої дорівнює τ : $\frac{R_{i+1}}{R_i} = \frac{r_{i+1}}{r_i} = \tau$. Пропорційно змінюючи всі розміри нескінченної сповільнювальної структури, отримуємо повністю подібну до висхідної структуру. Саме тому електричні властивості логоперіодичної антени будуть повторюватися на частотах, які утворюють геометричну прогресію, знаменник якої дорівнює τ : $f_0, f_0\tau, f_0\tau^2, \dots, f_0\tau^n \dots$

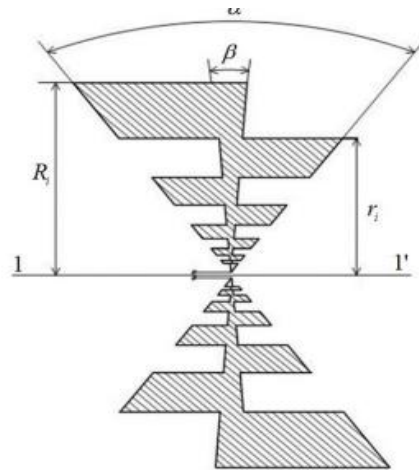


Рисунок 1.6 – Плоска логоперіодична двоспрямована антена

На логарифмічній шкалі частот значення частотних точок утворюють періодичну послідовність з періодом, що дорівнює $\ln \tau$. Цей факт визначив назву таких антен – логоперіодичні. В межах одного періоду вздовж частотної осі, від $f_0 \tau^n$ до $f_0 \tau^{n+1}$, електричні характеристики логоперіодичних антен набувають певних змін. Обов'язковою умовою, коли логоперіодична антена буде частотно-незалежною, є незначна зміна електричних характеристик антени на протязі одного періоду змінювання частоти. Згадана умова виконується при малому періоді зміни частоти. Якщо використовувати логоперіодичну антену в такому вигляді, як на рисунку 1.6, то в межах одного періоду зміни частоти спостерігаються малі зміни електричних характеристик антени, якими з точністю, достатньою для інженерних застосувань, можна знехтувати і вважати частотно-незалежними або сталими при зміні частоти в межах її періоду [10].

Незмінність вхідного опору антени можна пояснити з наступних міркувань. Всі найкоротші вібратори, які розміщені поміж точкою живлення і активною зоною, збуджуються слабо, а вплив їх полягає у змінненні еквівалентного хвильового опору лінії передачі та у змінненні в ній фазової швидкості. В активній області вібратори розташовані на відстані $\lambda/4$ один від одного. Відбиті ними хвилі взаємно компенсуються майже повністю.

Електрична відстань від точки живлення до активної області залишається постійною. Саме з цієї причини віднормований до входу антени її еквівалентний вхідний опір не змінюється зі зміною частоти.

Цей принцип дії ЛПА є дійсним і у випадку, якщо дві половинки структури сходяться під кутом γ , а випромінюючі елементи мають трапецеподібну форму. Для застосування принципу електродинамічної подібності товщина виступів антени також повинна бути пропорційною до відстані R . Але досвід показує, що для реалізації величини коефіцієнтів перекриття частот менших за 20, сталість товщини елементів випромінювання є несуттєвою.

Параметр τ визначає не тільки частотний період, але також і частотну періодичність характеристик антени, оскільки має місце наступне співвідношення:

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

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

Що менше τ , то менше кількість зубців в антені при заданому розмірі R_1 . Величина τ може лежати в межах 0,5 ... 0,9. Зазвичай плоска логоперіодична структура живиться коаксіальним кабелем. Гарного узгодження не буде спостерігатися через те, що вхідний опір антени великий і тому сильно (в декілька разів) відрізняється від хвилевого опору кабелю.

Основні параметри полотна антени з трапецевидними виступами – це τ і кут α . Центр випромінювання одного логоперіодичного полотна розміщується в межах його активної області і тому зі зміною λ і цієї активної області переміщується вздовж осі антени. При цьому його відносна відстань від вершини (в λ) залишається для даної системи сталою. Для кутів, які не є більшими за 60° , параметр τ майже не впливає на розташування фазового центру. Якщо кут зменшувати, це призводить автоматично до збільшення

відстані між центром випромінювання і точкою живлення у вершині структури.

На рисунку 1.7 зображено сучасну логоперіодичну антену провідного виробника НВЧ техніки та приладів «Rohde & Schwarz» типу HL223.

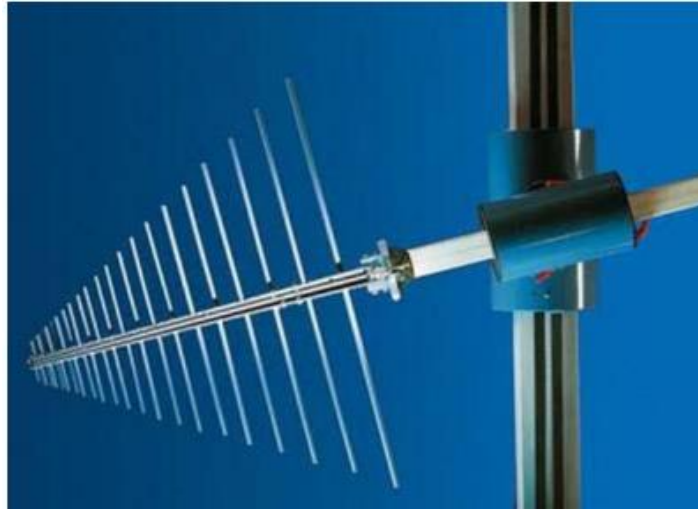


Рисунок 1.7 – Професійна дротова логоперіодична антена виробництва «Rohde & Schwarz» типу HL223

ДС антени Rohde & Schwarz HL223 суттєво не змінюється зі зміною частоти. Бачимо, наскільки конструкція міцна. Антена може використовуватись як в стаціонарних, так і в мобільних умовах, вона ідеально підходить для здійснення функцій передачі, радіомоніторингу та дистанційних вимірювань [10].

Наступна логоперіодична антена виробництва концерну "Rohde & Schwarz HL050" зображена на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8 – Двоелементна спрямована логоперіодична антена виробництва "Rohde & Schwarz" за планарною технологією типу HL050

Завдяки широкому діапазону частот від 850 МГц до 26,5 ГГц, антена на рисунку 1.8 ідеально підходить для використання в пристроях радіомоніторингу земної поверхні та для вимірювань параметрів високочастотних сигналів. Форма її ДС обертово-симетрична. Це створює умови для формування оптимальної діаграми вторинного перевипромінювання, якщо застосовувати цю антену у якості опромінювача дзеркальної антени. Rohde & Schwarz HL050 можна використовувати або як окрема антена або як опромінювач для мікрохвильових антен типу AC008. Антена має подібну конструкцію і може бути опромінювачем дзеркальних антен в діапазоні від AC090 до AC300.

1.4 Унікальність властивостей логоперіодичних антен

Особливість даних антен полягає у передачі та прийомі електромагнітних хвиль у широкому, теоретично необмеженому, діапазоні частот (рис. 1.9). Вони мають кілька важливих переваг на відміну від антен інших типів:

- широкий діапазон частоті здатність працювати в комунікаційних системах;
- малі розміри роблять їх зручними при застосуванні в системах із обмеженим простором;
- висока якість сигналу та мінімум його спотворень;
- ефективність застосування в передавачах і приймачах в широкому діапазоні частот.

Ці унікальні характеристики визначають популярність логоперіодичних антен в різноманітних застосуваннях, там, де має значення широкий діапазон робочих частот, конструктивна компактність, механічна прочність і висока якість сигналу [11].



Рисунок 1.10 – Логоперіодична дротова антена

Як вже згадувалося раніше, функціонування логоперіодичної антени базується на явищах резонансів. Ця антена складена із послідовності елементів зі змінюваними, розмірами. Саме це і дозволяє антені працювати на різних резонансних частотах і створює для цього оптимальні умови, як для передавання, так і для приймання сигналів.

Логоперіодичні антени широко застосовуються в найрізноманітніших сферах, а саме:

- телекомунікаційні системи;

- системи радіозв'язку;
- приймально-випромінювальні пристрої медичних сканерів;
- електроніка;
- дистанційна радіочастотна ідентифікація об'єктів, в тому числі, осіб.

Логоперіодичні антени застосовуються скрізь, де потрібен надійний та ефективний зв'язок по радіоканалах.

Вони складаються з металевих стрижнів, розташованих у певній послідовності, всі вони різної довжини (рис. 1.11). Ці стрижні взаємодіють між собою і забезпечують сталі характеристики випромінювання антени.

Антенна створює електромагнітне поле випромінювання на різних частотах, які є частиною заданого робочого діапазону. Діапазонність створюється відповідним вибором оптимальних розмірів і конфігурацій відрізків і сталістю кутів, які працюють на різних хвилях [12].

Окрім вже перерахованих вище застосувань логоперіодичних антен – вони використовуються у наукових дослідженнях.

Ми будемо вивчати властивості цих антен трохи з іншого боку, а саме – як випромінювальні системи такої важливої на сьогоднішній день галузі, як РЕБ для захисту від безпілотників. Однак, треба зразу ж зауважити, що в силу специфічних спрямованих властивостей цих антен, для роботи з ними потрібен оператор – навідник РЕБ, який буде змінювати орієнтацію антени у просторі і направляти її на ворожий дрон.

2 ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ ЛОГОПЕРІОДИЧНИХ АНТЕН ТА ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ В СЕРЕДОВИЩІ HFSS

2.1 Модель плоскої логоперіодичної антени в середовищі Ansys HFSS

Спочатку створюємо діелектричну підкладку зі стеклотекстоліту FR-4, на якій будемо пізніше розміщувати плоску логоперіодичну двосторонню антену. Початок проекту показано на рисунку 2.1.

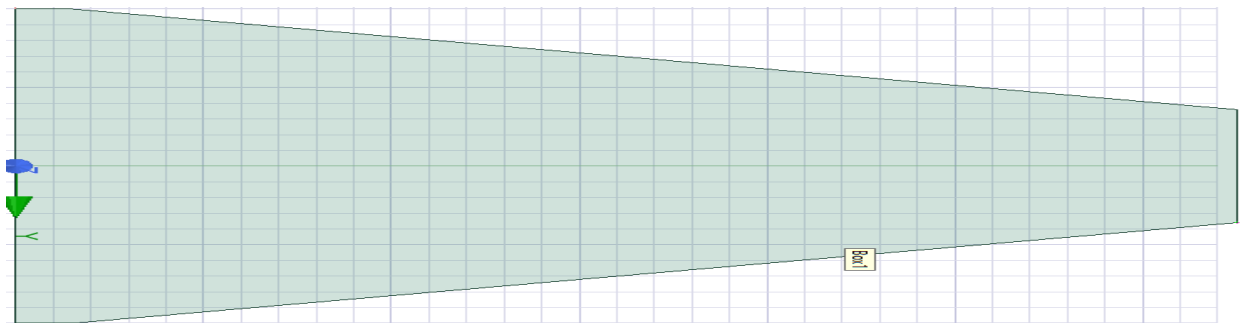
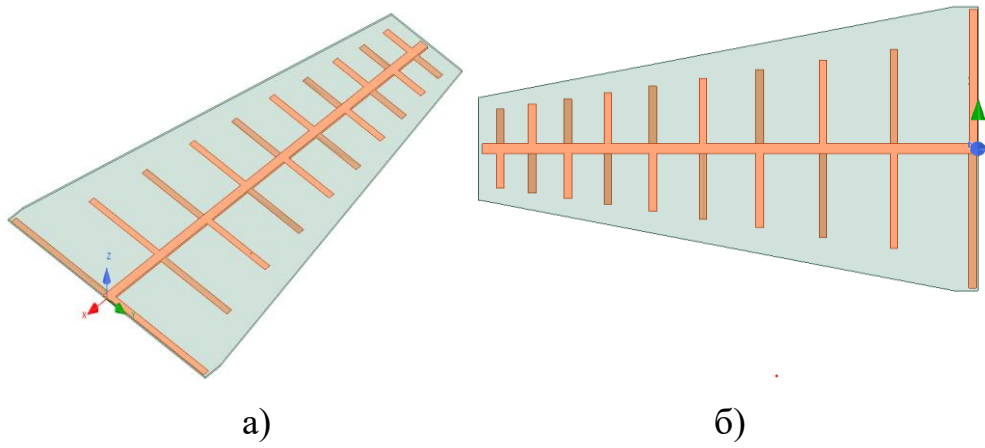


Рисунок 2.1 – Підкладка для логоперіодичної антени зі стеклотекстоліту FR4

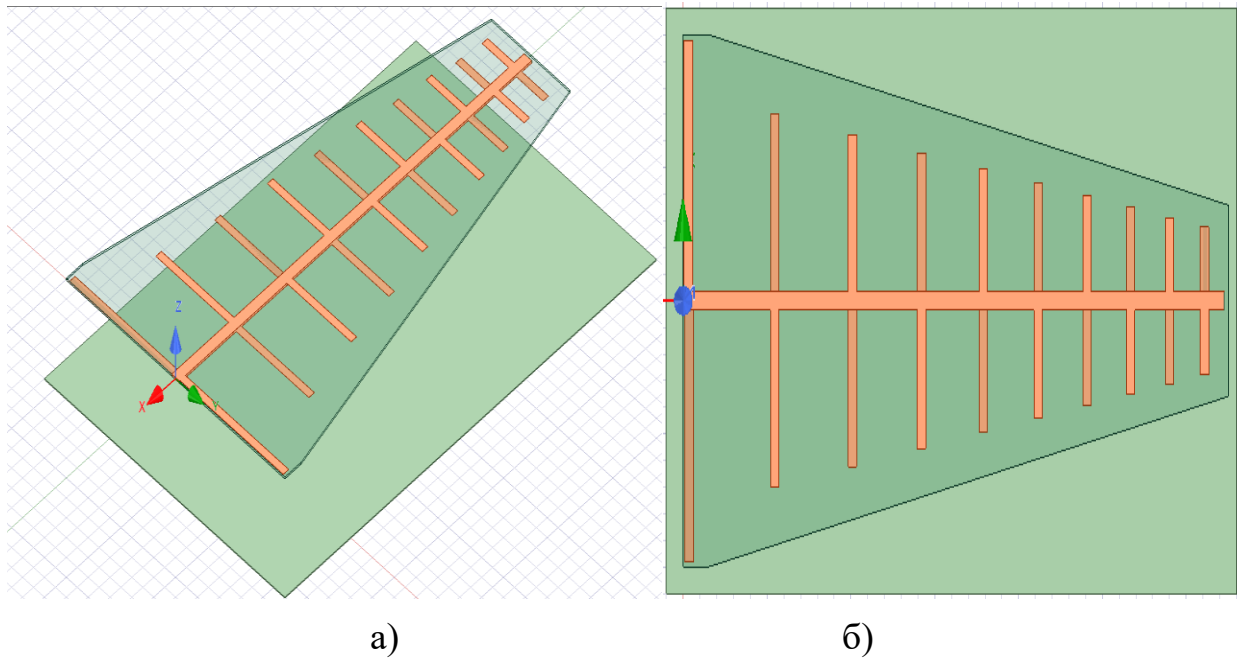
Далі розташуємо 10 вібраторів з обох боків підкладки зі зсувом на один вібратор зі зворотного боку. Результат побудови можна бачити на рисунку 2.2.

Трохи змінимо класичну конструкцію шляхом додавання алюмінієвого екрану тієї ж товщини, що й підкладка, хоча навряд чи це має ключове значення. На рисунку 2.3 зображено логоперіодичну антену з алюмінієвим екраном.



а) ізометрія; б) вид зверху.

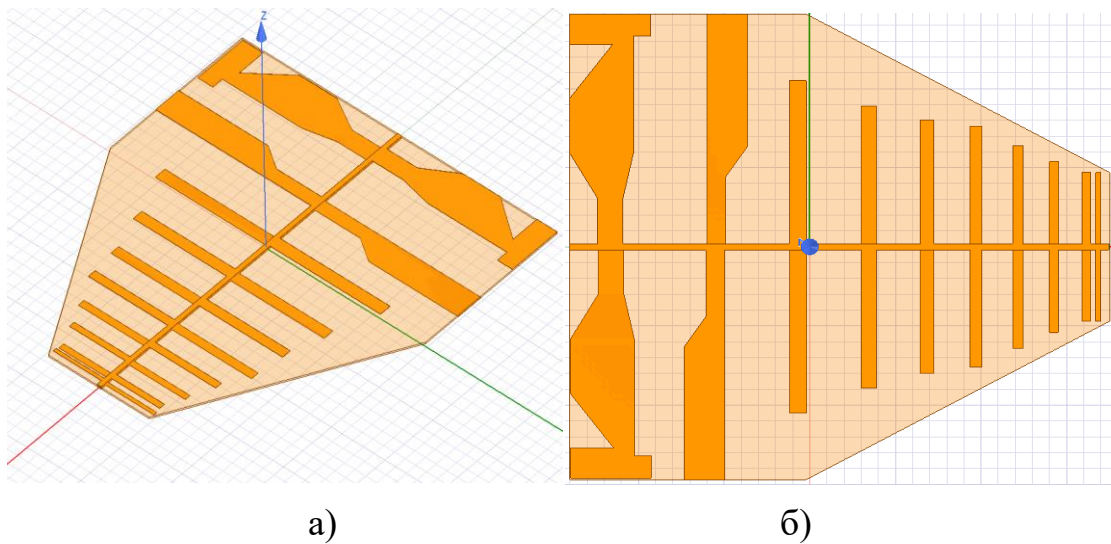
Рисунок 2.2 – Плоска логоперіодична антена



а) ізометрія; б) вид зверху.

Рисунок 2.3 – Плоска логоперіодична антена з алюмінієвим екраном

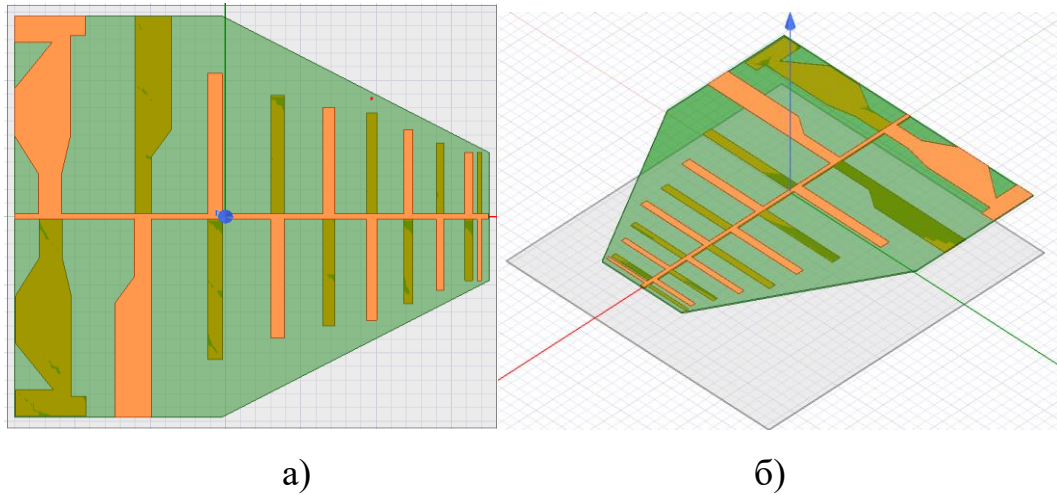
Модифікуємо логоперіодичну антену наступним чином. Зменшимо товщину найкоротшого першого вібратора і зменшимо відстань від нього до другого вібратора. Така модифікація не призводить до якихось радикальних змін в характеристиках антени. Наступним кроком змінимо геометрію дев'ятого та десятого вібраторів. Тепер вони будуть компактно складені на підкладинці, що значно зменшує габарити антени в цілому, а компактність є важливою перевагою мобільних пересувних пристроїв РЕБ. Вказана модифікація логоперіодичної антени представлена на рисунку 2.4.



а) ізометрія; б) вид зверху.

Рисунок 2.4 – Компактна логоперіодична антена

Додамо до компактної моделі алюмінієвий екран тієї ж товщини, що й підкладинка планарної антени (рис. 2.5).



а) ізометрія; б) вид зверху.

Рисунок 2.5 – Компактна логоперіодична антена з екраном

2.2 Розподіл ближнього електромагнітного поля в площині підкладинки на різних частотах

ДС формується законом розподілу ближнього електромагнітного поля. Тому аналіз його на різних частотах – важливий етап при розробці, та налаштуванні параметрів антен.

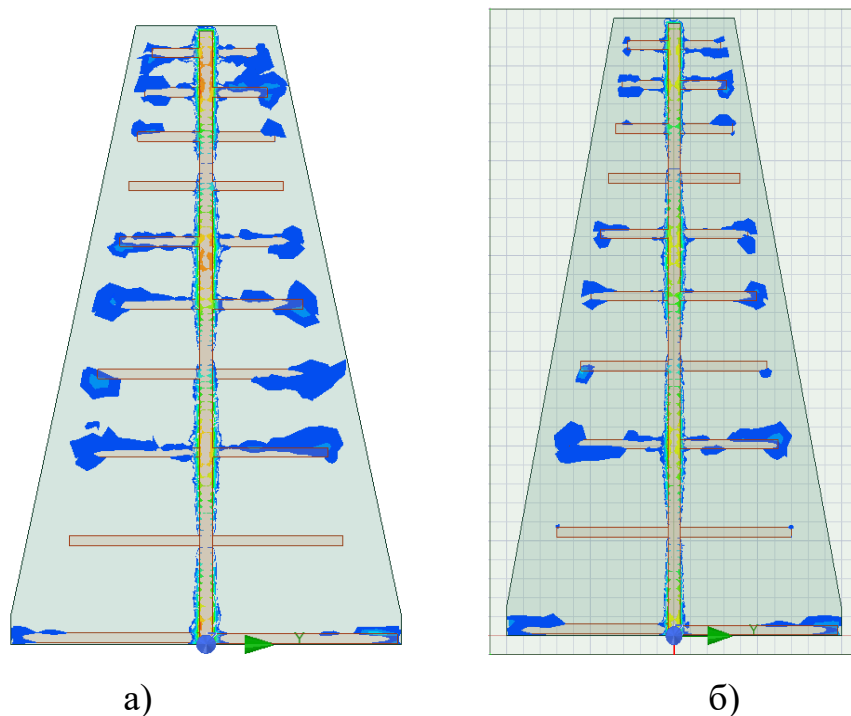
Основний зміст такого аналізу включає в себе:

- досягнення більшої ефективності;
- зменшення взаємного впливу;
- вплив змін у навколишньому середовищі;
- зменшення рівня перешкод;
- оцінка рівня ближнього поля.

2.2.1 Вплив екрану на розподіл ближнього поля логоперіодичної антени на різних частотах

На рисунку 2.6 показано розподіл ближнього поля в горизонтальній площині при частоті 0,36 ГГц.

Розподіл поля вздовж антени є доволі рівномірним і не дуже відрізняється в конструкції антени з екраном чи без екрану. Більше того, в антені без екрану короткі вібратори збуджуються більш інтенсивно. Сильнішим також є і збудження траверси у антені без екрану. Видно також, що траверса збуджується більш потужно, ніж вібратори, в обох випадках – як без екрану, так і з ним. Оскільки розподіл поля – функція не тільки просторових координат, але й часу, цим аномаліям розподілу може бути дано просте пояснення – це миттєвий стан збудження ближнього електромагнітного поля. В інший момент часу картина поля була б зовсім іншою.

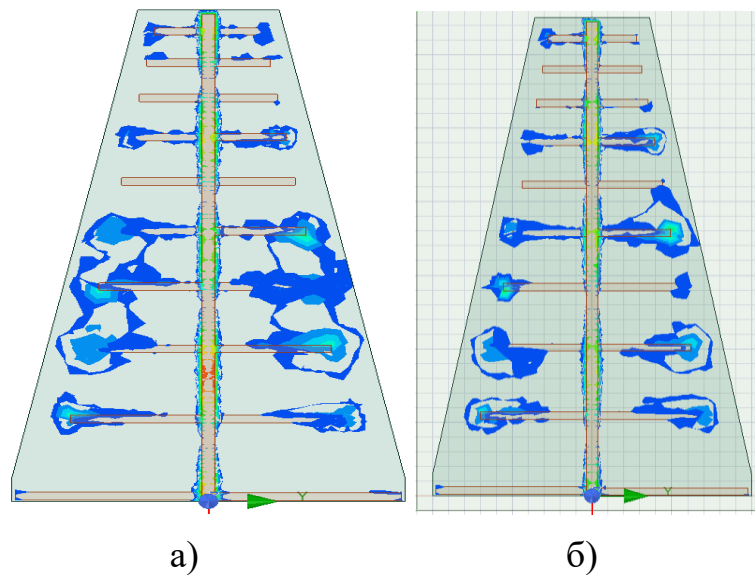


а) без екрану; б) з екраном.

Рисунок 2.6 – Розподіл ближнього електромагнітного поля в площині підкладки на частоті 0,36 ГГц

На рисунку 2.7 показано розподіл ближнього електромагнітного поля в площині підкладинки на частоті 0,46 ГГц.

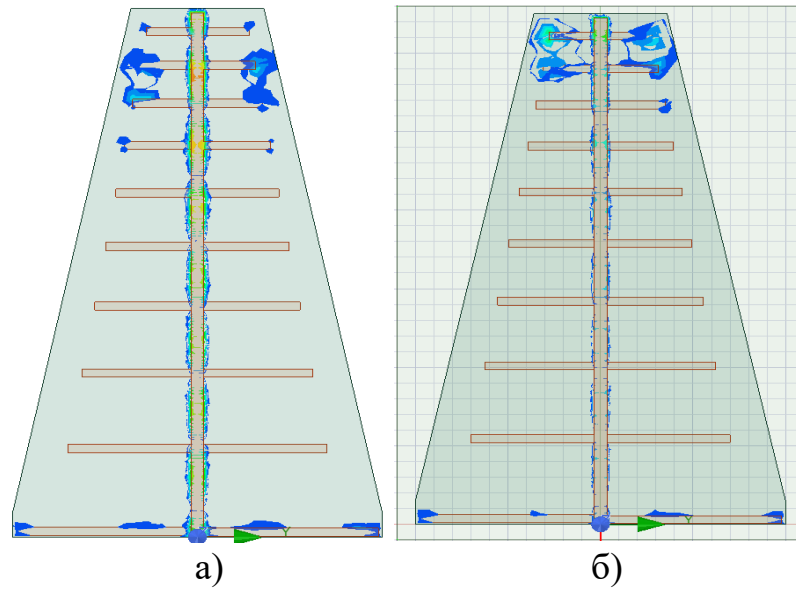
З порівняння попереднього розподілу ближнього поля (рис. 2.6) з наявним (рис. 2.6) впливає зростання рівня збудженого поля, видно також встановлення більш тісного зв'язку між сусідніми вібраторами зі зростанням частоти на 100 МГц.



а – без екрану; б – з екраном.

Рисунок 2.7 – Розподіл ближнього електромагнітного поля в площині підкладинки на частоті 0,46 ГГц

На рисунку 2.8 видно, що поле збуджується досить слабо, на частоті 920 МГц найбільш сильно збурені крайні вібратори і траверса в обох конструкціях.



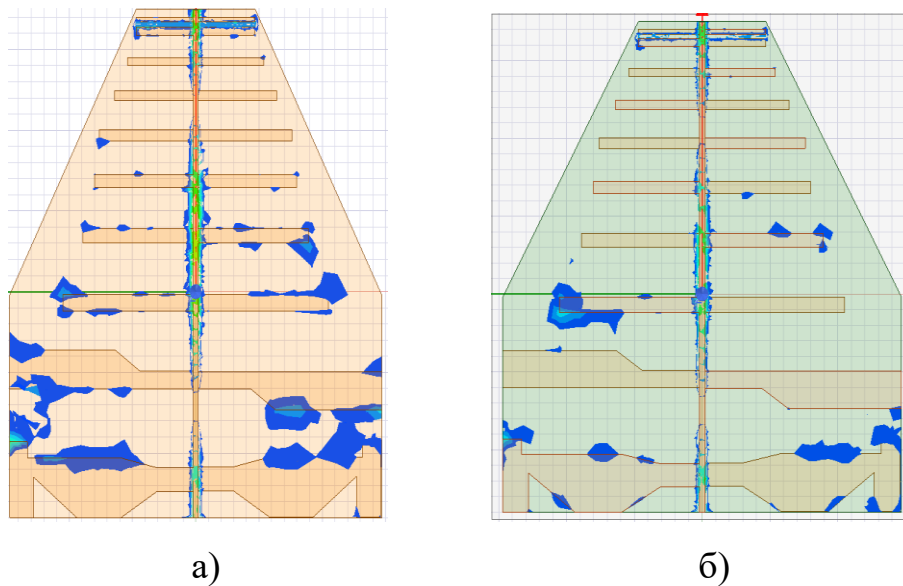
а) без екрану; б) з екраном.

Рисунок 2.8 – Розподіл ближнього електромагнітного поля в площині підкладинки на частоті 0,92 ГГц

З досліджень наведених вище розподілів ближнього поля на різних частотах (рис. 2.6-2.8) видно, що на кожній з розглянутих частот збуджується різна кількість вібраторів, до того ж, вони збуджуються з доволі різною інтенсивністю. Те ж саме можна сказати і про збудження повздовжньої траверси збуджується різна кількість вібраторів. Це визначається близькістю або віддаленістю певної частоти до резонансу. Точка живлення поблизу найдовшого вібратора призводить до розлаштування антени з лінією передачі і до погіршення умов збудження ближнього поля, що призводить до нерівномірності розподілу його в площині підкладинки.

2.2.2 Вплив металевого екрану на формування ближнього поля компактної логоперіодичної антени на різних частотах

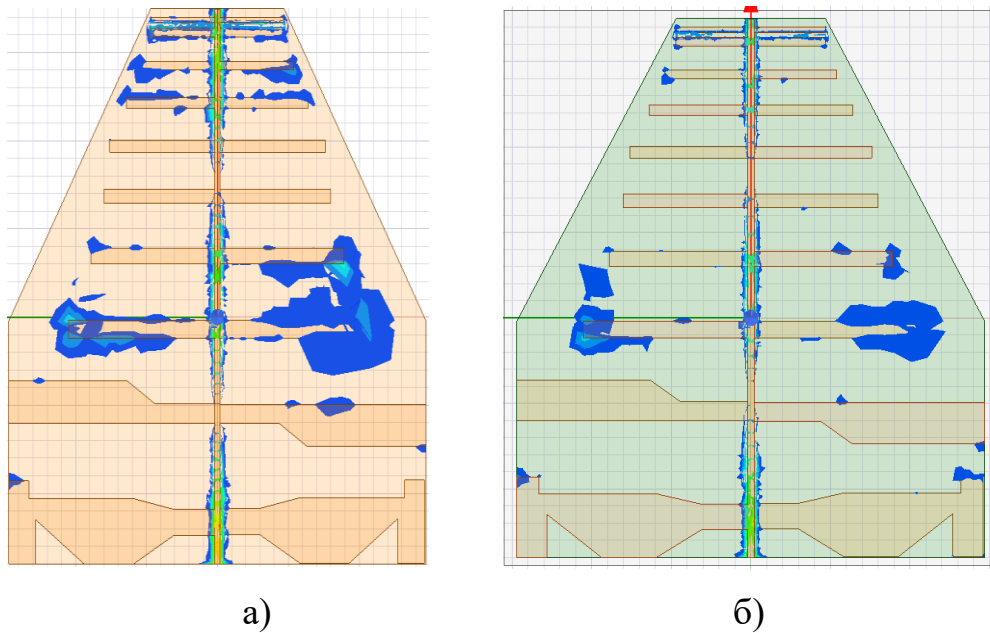
З рисунку 2.9 є очевидним, що на 0,36 ГГц активніше збуджуються переважно довгі вібратори. Помітно, що у антени без екрану збудження є ефективнішим. Можливо, характеристики антени з екраном погіршуються внаслідок неоптимізованої відстані між підкладинкою та екраном.



а) без екрану; б) з екраном.

Рисунок 2.9 – Розподіл ближнього електромагнітного поля в площині підкладинки в модифікованій логоперіодичній антені на частоті 0,36 ГГц

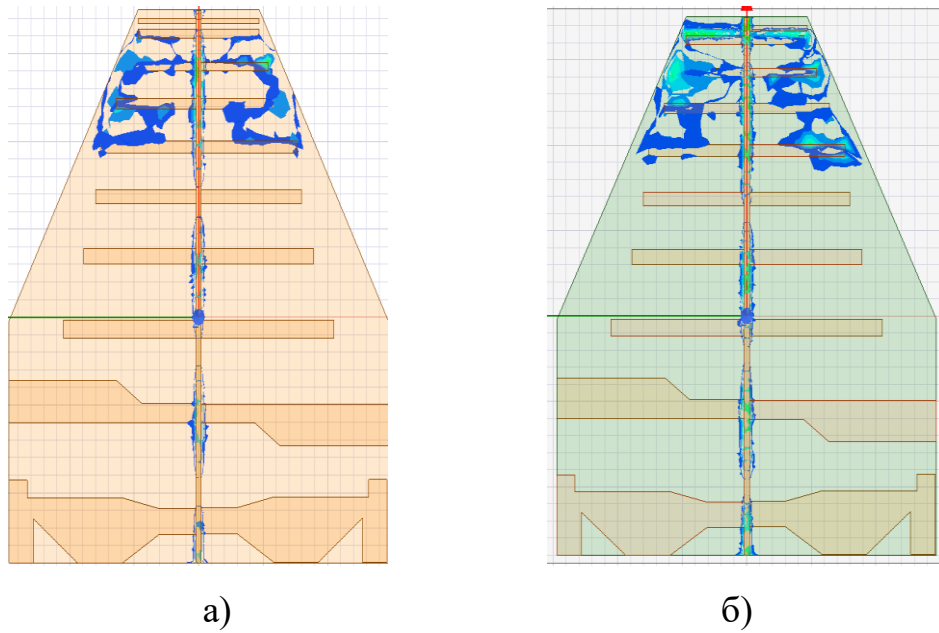
З погляду на рисунок 2.10 очевидно, що на частоті 0,46 ГГц в антені без екрану ближнє поле збуджується більш ефективно.



а) без екрану; б) з екраном.

Рисунок 2.10 – Розподіл ближнього електромагнітного поля в площині підкладинки компактної логоперіодичної антени на частоті 0,46 ГГц

Цілком очевидно, що зі зростанням частоти внаслідок резонансних явищ найефективніше на частоті 0,92 ГГц збуджуються найкоротші вібратори (рис. 2.11). В той же час майже зовсім не збуджуються довші вібратори. В той же час бачимо ефективне збудження ближнього електромагнітного поля на повздовжній траверсі. Наявність екрану суттєво не впливає на розподіл ближнього поля. Можливо, на даній відстані від підкладинки розміщення екрану не є оптимальним.



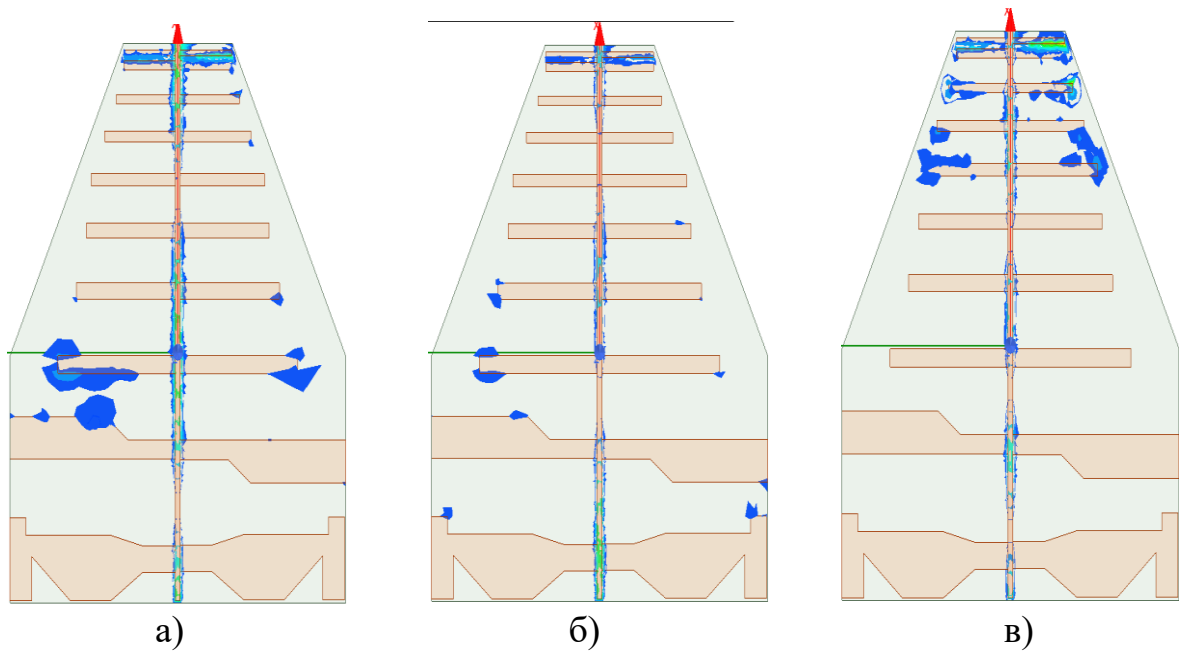
а) компактна без екрану; б) компактна з екраном.

Рисунок 2.11 – Розподіл ближнього електромагнітного поля в площині підкладки на частоті 0,92 ГГц

2.2.3 Вплив розміщення точки живлення антени на розподіл ближнього поля

Порівнюючи між собою рисунок 2.9 а) та рисунок 2.11 а) бачимо, що живлення з боку найдовшого вібратора не є ефективним, причому на всіх наведених вище частотах без виключення.

Тому слід пристати до варіанту розташування точки підключення живлення зі сторони найкоротшого вібратора і прийmemo даний варіант компактної логоперіодичної антени як основний, найближчий до оптимального (рис. 2.12).



а) 0,36 ГГц; б) 0,46 ГГц; в) 0,92 ГГц.

Рисунок 2.12 – Розподіл ближнього електромагнітного поля в площині підкладинки антени з точкою живлення поблизу найбільшого вібратора

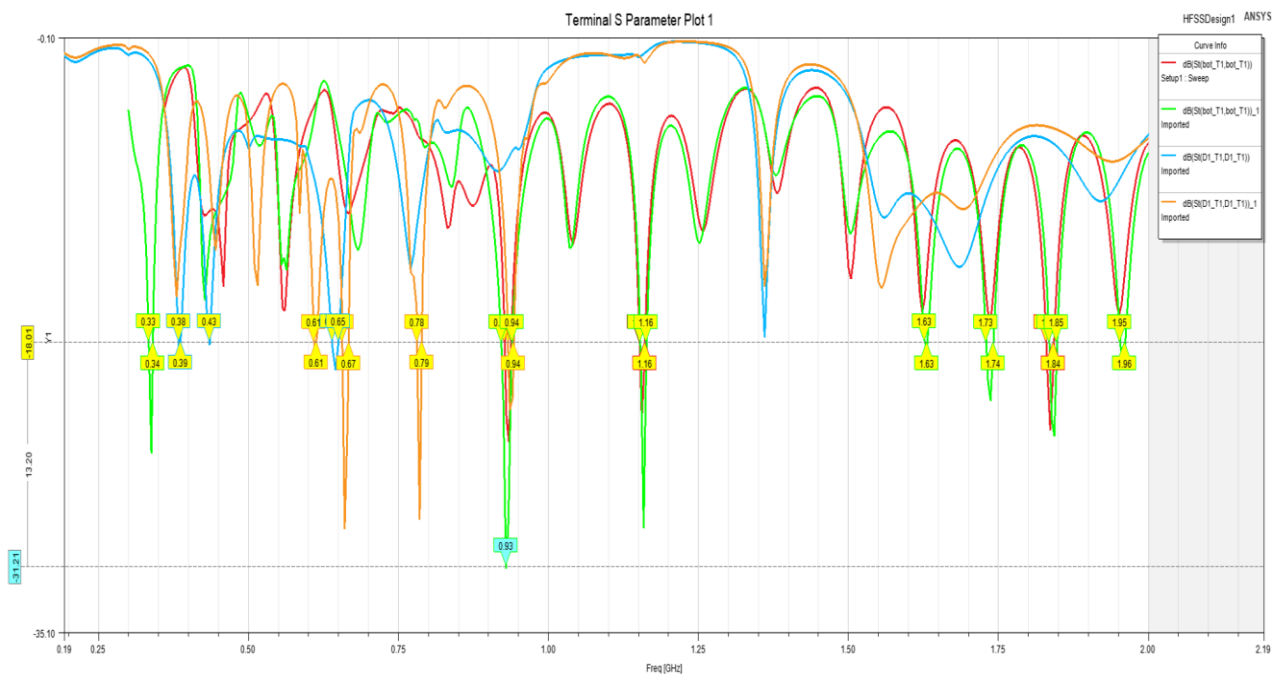
2.3 Узгодження вхідного опору антени з лінією живлення в смузі частот

Узгодження – важлива умова для підвищення ККД процесу випромінювання будь-якою антеною. Потужність передавача повинна без зайвих втрат випромінюватися у навколишній по відношенню до антени простір у відповідності до її діаграми спрямованості. Відбиття потужності в місці живлення антени виникає внаслідок її розлаштування з фідером. Це зменшує ККД антени. Тому спрямуємо зусилля для вивчення ступеню узгодження антени з фідером. Індикатором узгодження може бути такий параметр, як модуль коефіцієнту відбиття.

Що меншим буде значення модуля коефіцієнта відбиття, то більшим буде ступінь узгодження антени з лінією і пристроєм живлення і тим більшим буде ККД.

Порівняймо тепер частотні властивості класичної логоперіодичної антени (з екраном та без нього) та компактної логоперіодичної антени (з екраном та без нього).

Почнемо порівняння з дослідження частотної залежності коефіцієнта відбиття від входу антен (рис. 2.13).

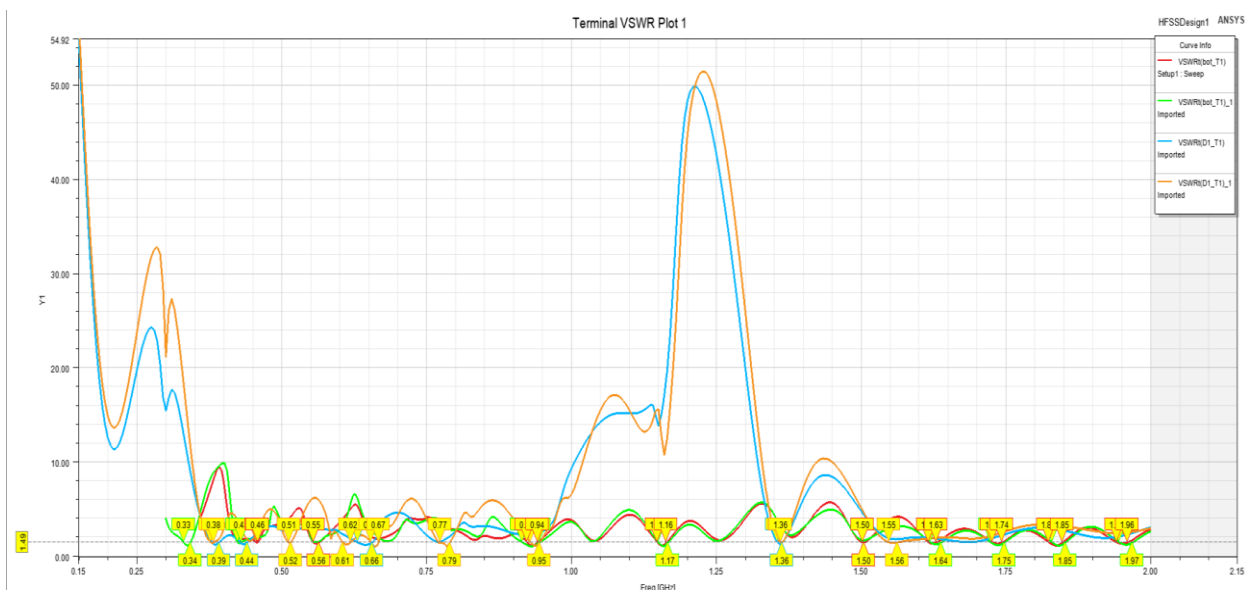


червоний колір – класична антена без екрану; зелений колір – класична антена з екраном; синій колір – модифікована антена без екрану; помаранчевий колір – модифікована антена з екраном.

Рисунок 2.13 – Частотні залежності коефіцієнта відбиття для класичної (з екраном та без нього), модифікованої (з екраном та без нього) логоперіодичних антен

На рисунку 2.14 можна бачити, що кращий ступінь узгодження на частоті 0,93 ГГц з коефіцієнтом відбиття -31.21 дБ має компактна логоперіодична антена без екрану. Наступний рівень коефіцієнта відбиття – це -18.01 дБ. Цей рівень перетинається великою кількістю кривих. На частотах 0,945 ГГц, 1,165 ГГц та 1,861 ГГц бачимо наявність ознак узгодження для більшості досліджуваних антен. В частотних проміжках від 0,19 ГГц до 0,33 ГГц, від 1,0 ГГц до 1,33 ГГц, від 1,42 ГГц до 1,551 ГГц існує 3 смуги великого розлаштування з лінією живлення конструкції компактної антени і з екраном, і без нього.

Далі проаналізуємо залежність всіх 4-х розглянутих в дослідженні конструкцій антен (рис. 2.14).



червона крива – класична антена без екрану; зелена крива – класична антена з екраном; синя крива – модифікована антена без екрану; помаранчева крива – модифікована антена з екраном.

Рисунок 2.14 – VSWR 4-х досліджуваних конструкцій логоперіодичних антен

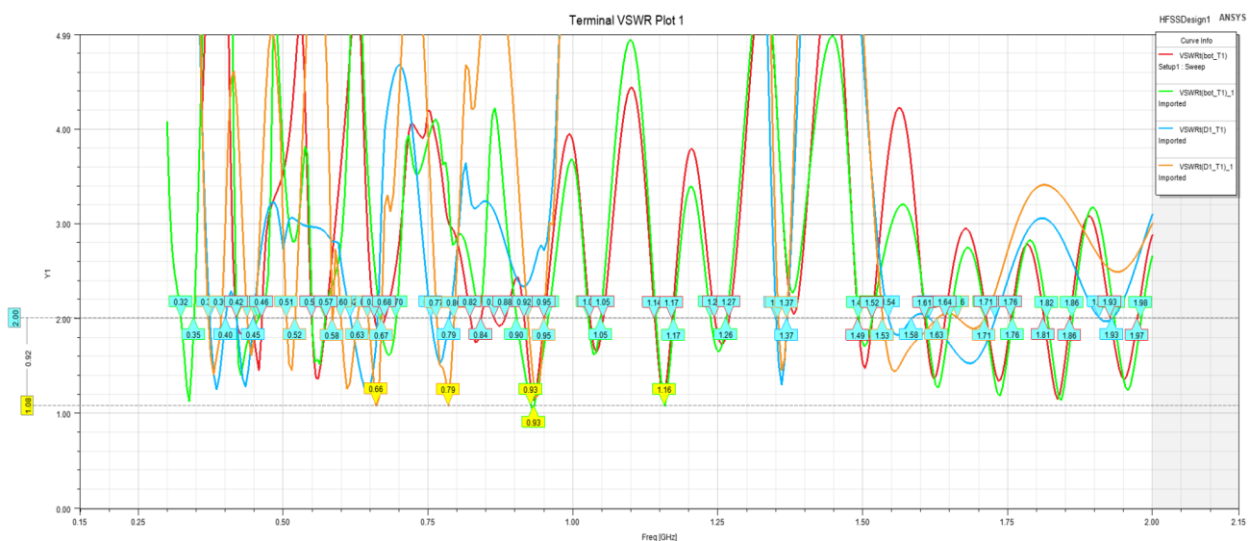
Загальноприйнятим рівнем виміру якості узгодження різних НВЧ пристроїв між собою є значення коефіцієнту стоячої хвилі $VSWR \leq 2$, тобто

робочі точки повинні знаходитись на рівні або під рівнем 2. На рисунку 2.15 показано значення VSWR від 0 до 2.

На рисунку 2.15 на рівні VSWR=2 проведено синя пунктирна горизонтальна лінія є верхнім маркером узгодження. Зважаючи на попередньо згадані міркування, узгодженими можна вважати антени, VSWR яких лежить нижче рівня цього маркера.

З усіх розглянутих антен найбільш узгодженою виявилась компактна логоперіодична антена з екраном на частоті 0,93 ГГц. Її VSWR=1,08 на цій частоті. Коефіцієнт відбиття її дорівнює -31,21 дБ.

Якщо перерахувати модуль коефіцієнта відбиття у ефективність, то виявляється, що 99,92% потужності передавача в цій частотній точці через антену може випромінюватись у навколишній простір, тобто, відбивається у бік передавача 0,08% його потужності. Тобто, спостерігаємо високу енергетичну ефективність антени на частоті 0,93 ГГц.



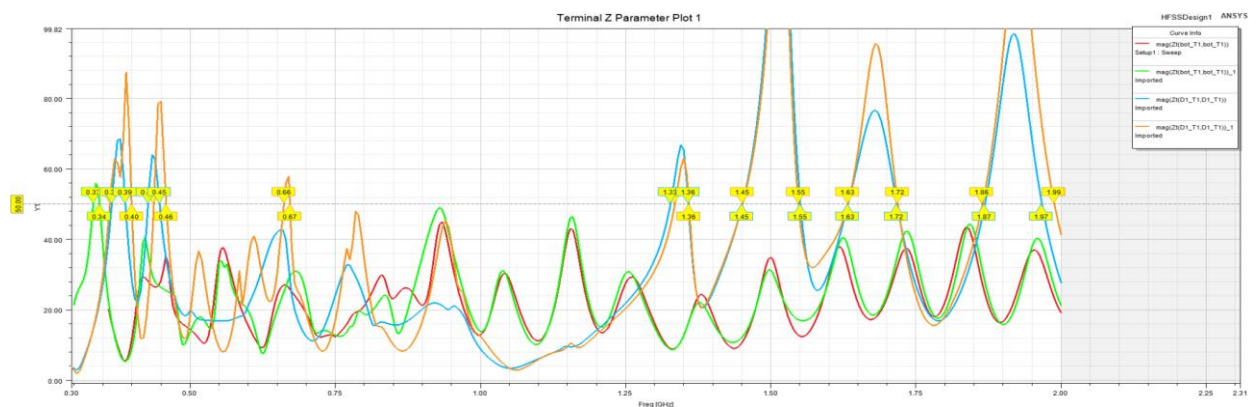
червона крива – класична антена без екрану; зелена крива – класична антена з екраном; синя крива – модифікована антена без екрану; помаранчева крива – модифікована антена з екраном.

Рисунок 2.15 – VSWR в області значень 1...5 для 4-ох логоперіодичних антен

Окрім коефіцієнтів відбиття та VSWR непрямим способом оцінки узгодження є порівняння модуля вхідного імпедансу антени з характеристичним опором кабелю живлення. Тому тут розглядаються частотні залежності модуля вхідного імпедансу Z_{11} логоперіодичних антен чотирьох модифікацій (рис. 2.16).

Внаслідок великих відмінностей вхідного імпедансу від характеристичного опору коаксіального кабелю живлення (50 Ом), причому не має значення, в який бік, спостерігається розлаштування антени, тим більше, чим більша різниця між імпедансами, з усіма наслідками розлаштування.

Зменшується ККД та збільшується відбита від входу антени потужність.



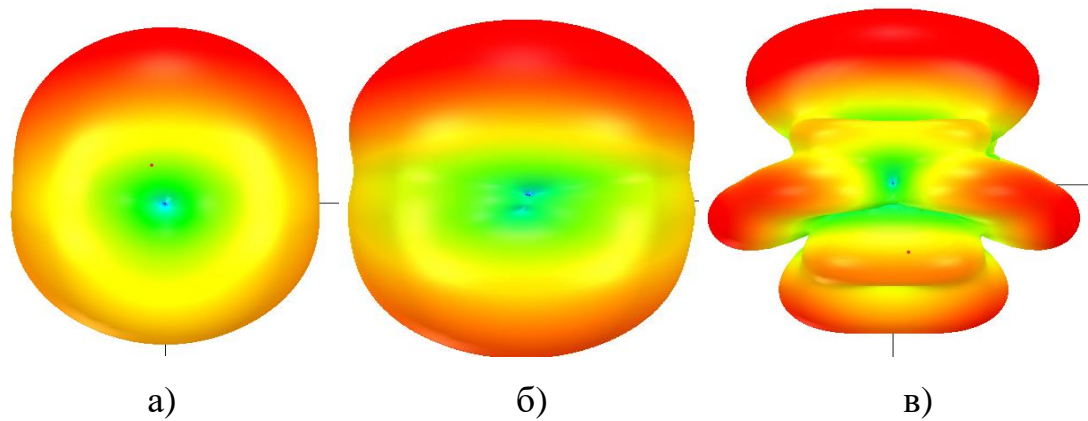
червона крива – класична антена без екрану; зелена крива – класична антена з екраном; синя крива – модифікована антена без екрану; помаранчева крива – модифікована антена з екраном.

Рисунок 2.16 – Частотні залежності модуля вхідного імпедансу Z_{11} логоперіодичних антен чотирьох конструктивних модифікацій

2.4 Діаграма спрямованості

2.4.1 ДС класичної логоперіодичної антени на частотах

Ці ДС класичної логоперіодичної антени без металевого екрану можна бачити на рис. 2.17.

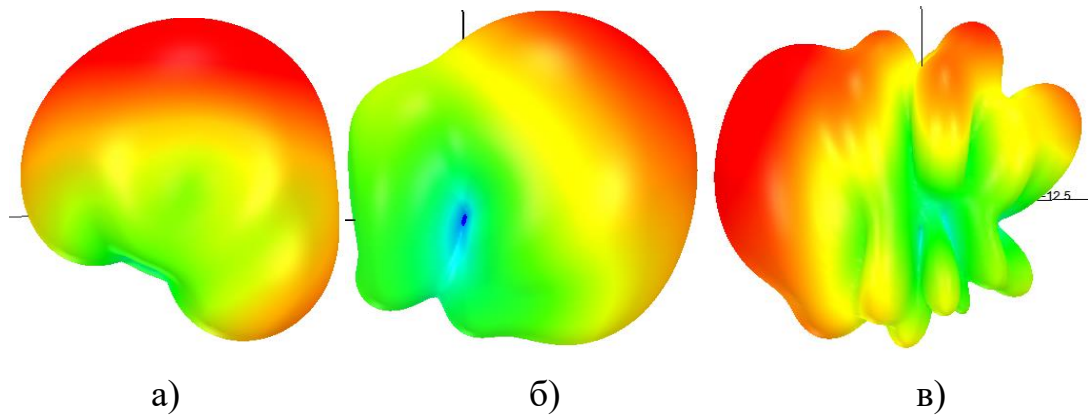


а) 0,36 ГГц; б) 0,46 ГГц; в) 0,92 ГГц.

Рисунок 2.17 – Діаграми спрямованості в об'ємі на різних частотах

2.4.2 ДС класичної логоперіодичної антени з металевим екраном

ДС класичної логоперіодичної антени з алюмінієвим екраном бачимо на рисунку 2.18. Зі збільшенням частоти спрямованість антени збільшується. Її ДС стає більш складної форми.

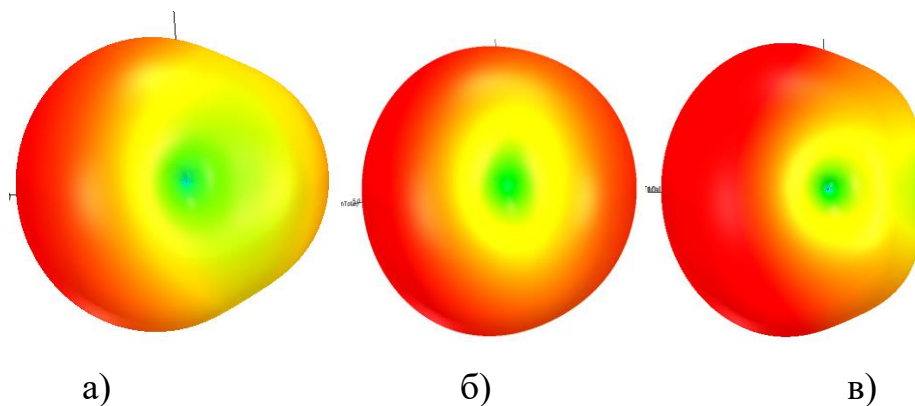


а) 0,36 ГГц; б) 0,46 ГГц; в) 0,92 ГГц.

Рисунок 2.18 – Діаграми спрямованості в об'ємі

2.4.3 ДС модифікованої компактної логоперіодичної антени

ДС модифікованої логоперіодичної антени зображено на рисунку 2.19. Бачимо, що на відміну від попереднього варіанту, ДС за формою та параметрами проявляє більшу частотну стабільність.

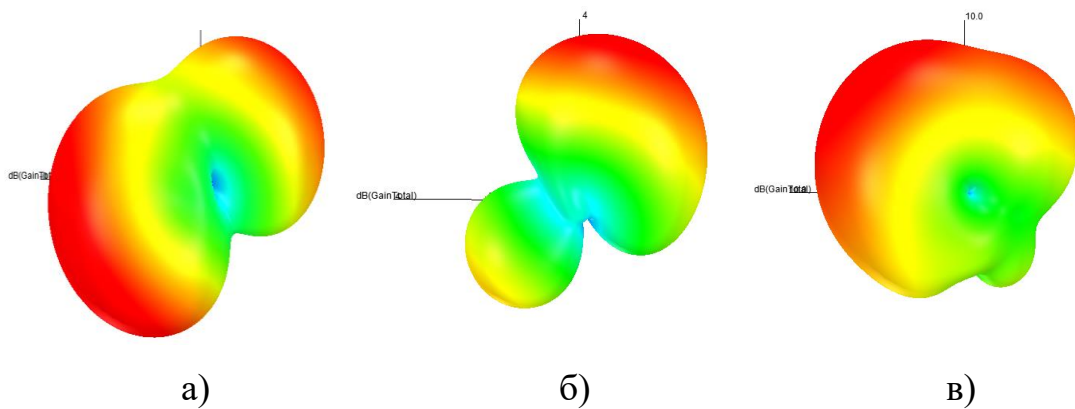


а) 0,36 ГГц; б) на 0,46 ГГц; в) 0,92 ГГц.

Рисунок 2.19 – Діаграми спрямованості в об'ємі

2.4.4 ДС компактної логоперіодичної антени з екраном

ДС компактної логоперіодичної антени з алюмінієвим екраном зображено на рисунку 2.20. На відміну від попереднього варіанту, бачимо посилення спрямованих властивостей від частоти для цієї модифікації логоперіодичної антени. Зокрема, збільшується її спрямованість.

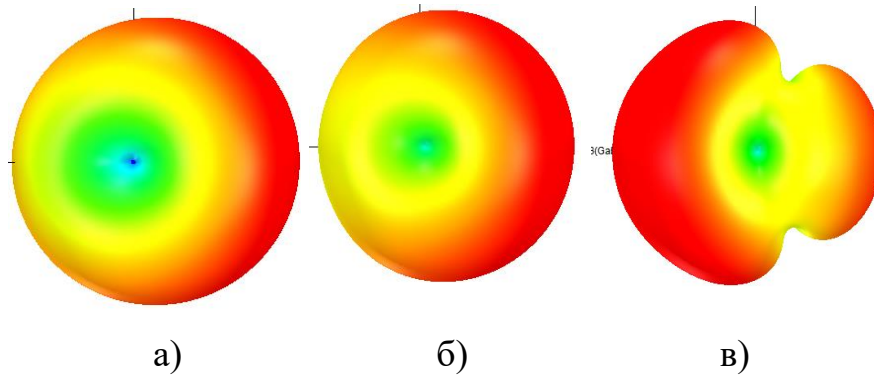


а) 0,36 ГГц; б) 0,46 ГГц; в) 0,92 ГГц.

Рисунок 2.20 – Діаграми спрямованості в об'ємі

2.4.5 ДС компактної логоперіодичної антени з живленням з боку найдовшого вібратора

ДС компактної логоперіодичної антени з живленням з боку найдовшого вібратора показані на рисунку 2.21. Зразу бачимо зменшення спрямованості випромінювання антени внаслідок зміни розташування порту її живлення.



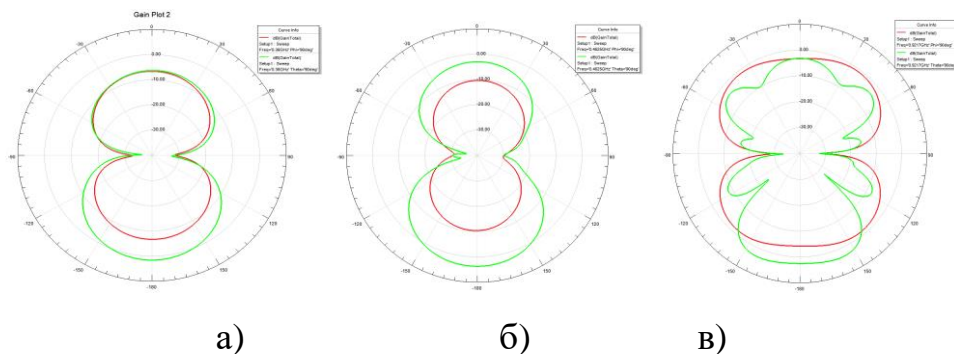
а) на частоті 0,36 ГГц; б) на частоті 0,46 ГГц; в) 0,92 ГГц.

Рисунок 2.21 – Діаграми спрямованості в об'ємі

2.5 Діаграма спрямованості на різних частотах в площинах основних перерізів

2.5.1 ДС класичної логоперіодичної антени в площинах основних перерізів

ДС в площинах основних перерізів класичної логоперіодичної антени бачимо на рисунку 2.22.

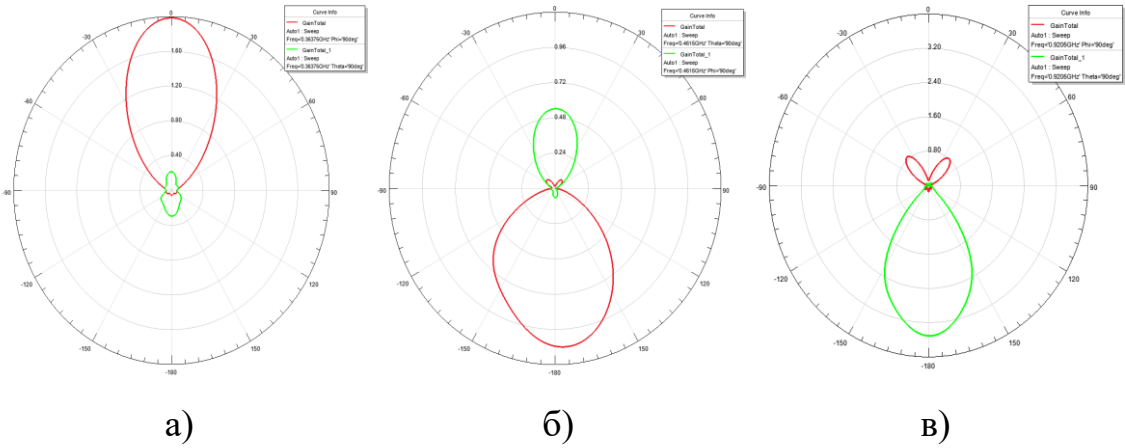


а) 0,36 ГГц; б) 0,46 ГГц; в) 0,92 ГГц.

Рисунок 2.22 – Діаграми спрямованості в площинах основних перерізів

2.5.2 ДС класичної логоперіодичної антени з екраном в площинах основних перерізів

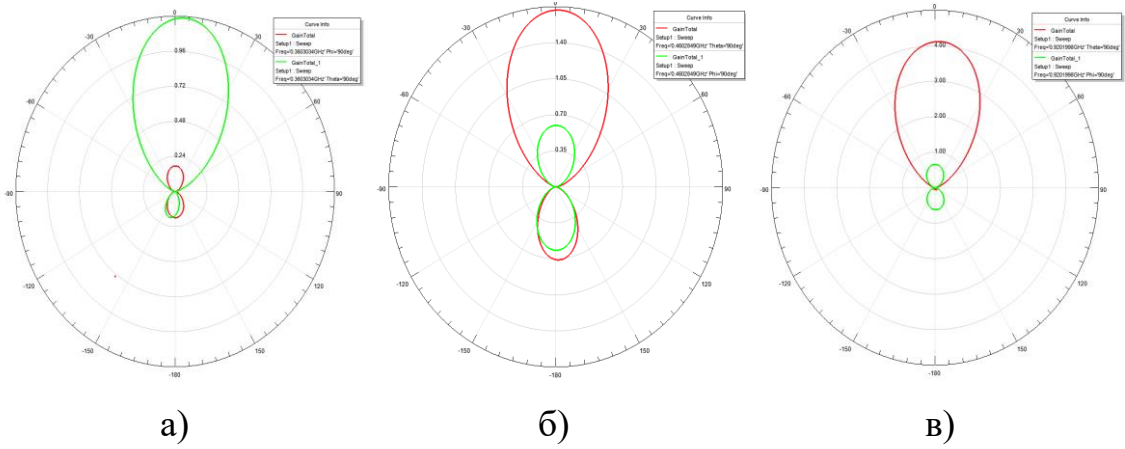
ДС в площинах основних перерізів класичної логоперіодичної антени з алюмінієвим екраном показано на рисунку 2.23.



а) 0,36 ГГц; б) 0,46 ГГц; в) 0,92 ГГц.

Рисунок 2.23 – Діаграми спрямованості в площинах основних перерізів

2.5.3 ДС в площинах основних перерізів модифікованої логоперіодичної антени

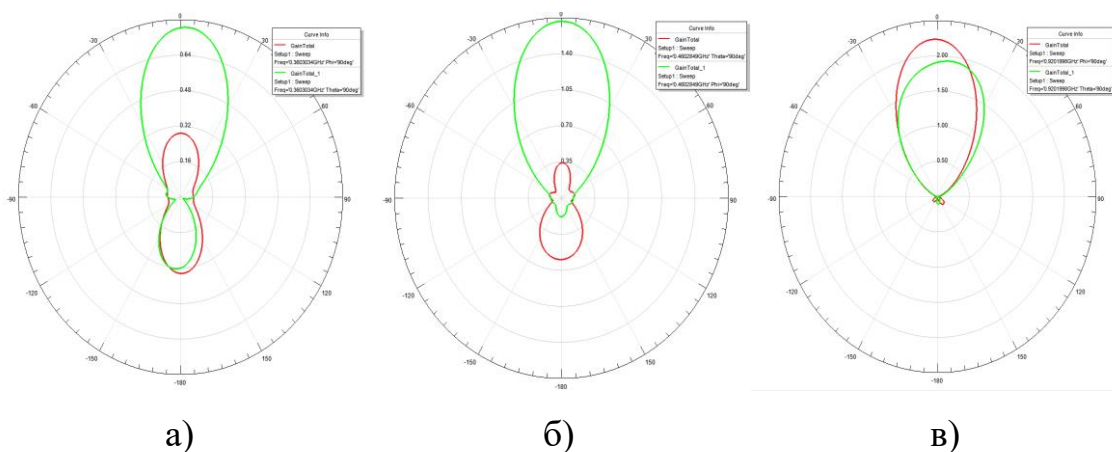


а) 0,36 ГГц; б) 0,46 ГГц; в) 0,92 ГГц.

Рисунок 2.24 – Діаграми спрямованості в площинах основних перерізів

2.5.4 ДС в площинах основних перерізів компактної логоперіодичної антени з екраном

Форму і параметри ДС, а також те, як вони змінюються зі збільшенням частоти в площинах основних перерізів компактної логоперіодичної антени з екраном, можна спостерігати на рисунку 2.25.

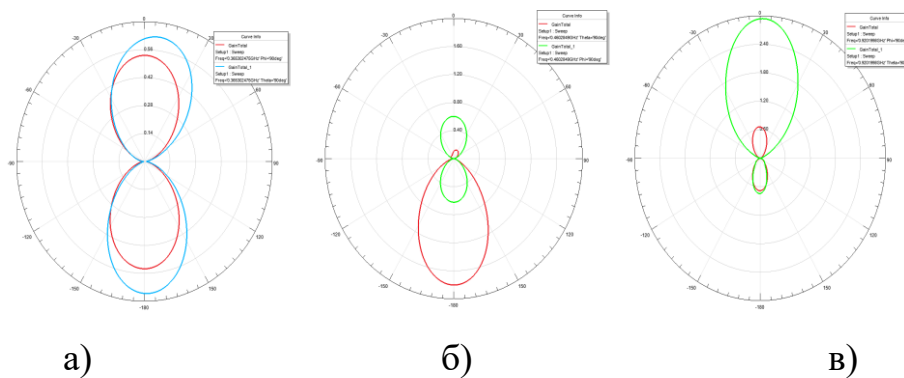


а) 0,36 ГГц; б) 0,46 ГГц; в) 0,92 ГГц.

Рисунок 2.25 – ДС в площинах основних перерізів

2.5.5 ДС в площинах основних перерізів компактної логоперіодичної антени зі зміщеним в бік найдовшого вібратора портом

ДС в площинах основних перерізів компактної логоперіодичної антени зі зміщеним в бік найдовшого вібратора портом показано на рисунку 2.26.



а) 0,36 ГГц; б) 0,46 ГГц; в) 0,92 ГГц.

Рисунок 2.26 – ДС в площинах основних перерізів

2.6 Коефіцієнт підсилення логоперіодичної антени

2.6.1 Класична логоперіодична антена

На рисунку 2.27 показано орієнтацію у просторі об'ємної ДС відносно макету класичної логоперіодичної антени.

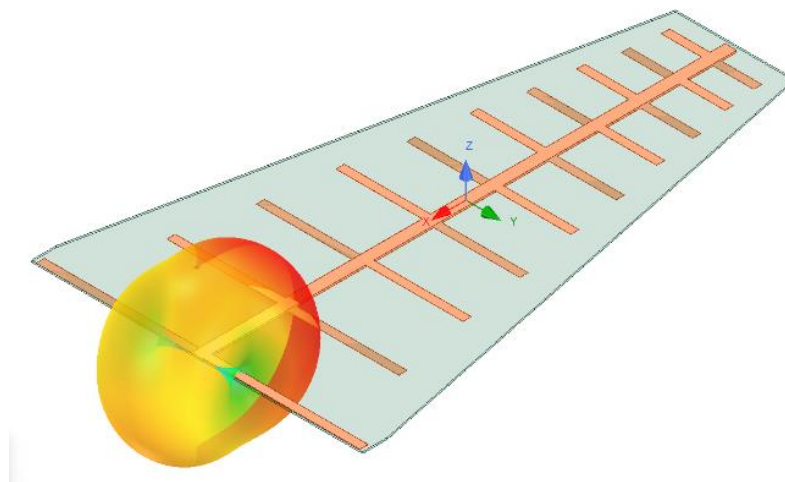


Рисунок 2.27 – Орієнтація в просторі об'ємної ДС відносно макету логоперіодичної антени

Таблиця 2.1 дає уявлення про порядок значень КП на робочих частотах для класичної логоперіодичної антени.

Таблиця 2.1 – Коефіцієнти підсилення на різних частотах

Частота	0,36 ГГц	0,46 ГГц	0,92 ГГц
КП	1,60	3,70	4,20

2.6.2 Класична логоперіодична антена з алюмінієвим екраном

На рисунку 2.28 зображена орієнтація в просторі об'ємної ДС відносно макету класичної логоперіодичної антени з екраном.

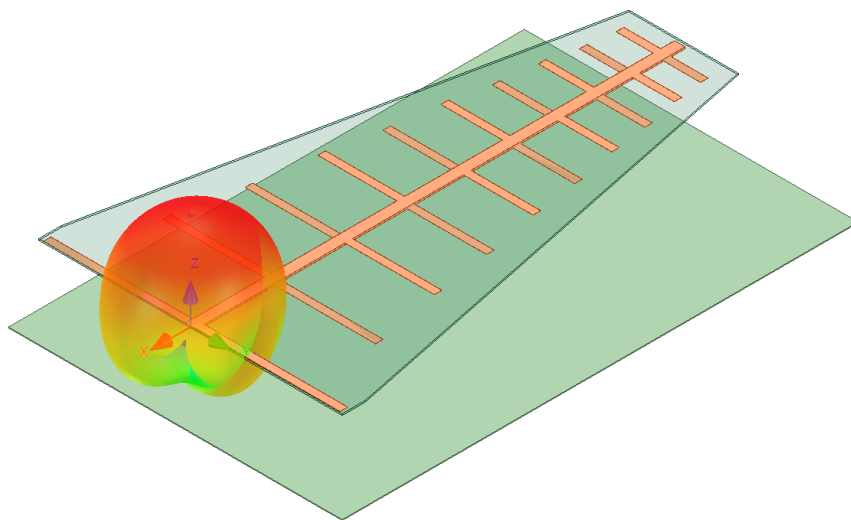


Рисунок 2.28 – Орієнтація в просторі об'ємної ДС відносно макету логоперіодичної антени

Таблиця 2.2 дає уявлення про порядок значень КП на робочих частотах для класичної логоперіодичної антени на відповідних частотах.

Таблиця 2.2 – КП на робочих частотах класичної логоперіодичної антени

Частота	0,36 ГГц	0,46 ГГц	0,92 ГГц
КП	3,20	5,30	9,00

2.6.3 Компактна логоперіодична антена

На рисунку 2.29 бачимо орієнтацію в просторі об'ємної діаграми спрямованості відносно макету компактної логоперіодичної антени.

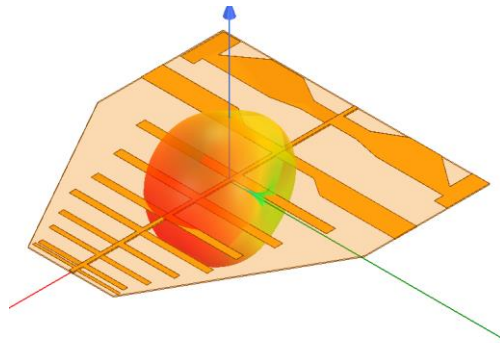


Рисунок 2.29 – Орієнтація в просторі об'ємної діаграми спрямованості відносно макету логоперіодичної антени

Таблиця 2.3 містить відомості про зміну КП від частоти компактної логоперіодичної антени.

Таблиця 2.3 – Коефіцієнти підсилення на частотах

Частота	0,36 ГГц	0,46 ГГц	0,92 ГГц
КП	0,80	2,30	6,15

2.6.4 Компактна логоперіодична антена зі зміщеним в бік найдовшого вібратора портом живлення

Рисунок 2.30 показує розміщення ДС в просторі відносно макету модифікованої логоперіодичної антени без екрану.

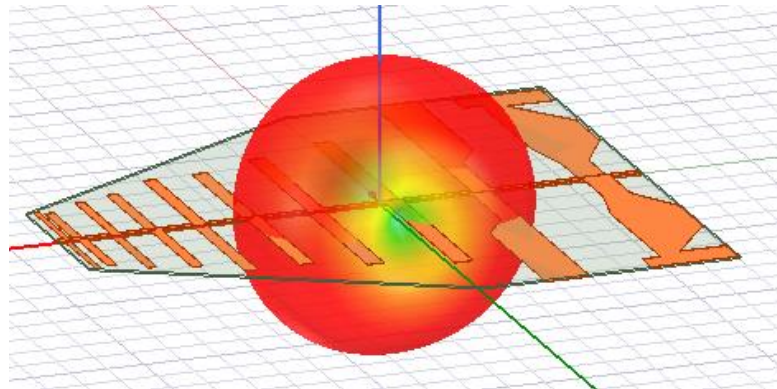


Рисунок 2.30 – Орієнтація в просторі об’ємної діаграми спрямованості відносно макету логоперіодичної антени

З інформації, розміщеної в таблиці 2.4, можна оцінити величину КП на робочих частотах.

Таблиця 2.4 – Коефіцієнти підсилення на частотах

Частота	0,36 ГГц	0,46 ГГц	0,92 ГГц
КП	0,70	1,80	2,90

2.6.5 Компактна логоперіодична антена з металевим екраном

На рисунку 2.31 видно орієнтацію в просторі об’ємної ДС відносно макету логоперіодичної антени з металевим екраном.

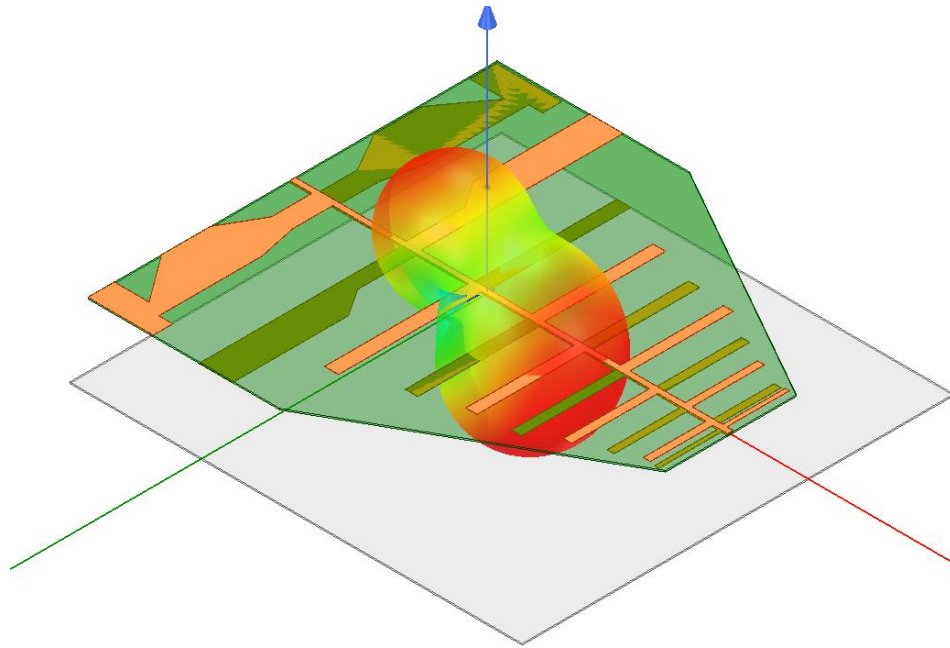


Рисунок 2.31 – Орієнтація в просторі об’ємної діаграми спрямованості відносно макету компактної логоперіодичної антени з екраном

В таблиці 2.5 видно значення КП на робочих частотах.

Таблиця 2.5 – Значення коефіцієнтів підсилення на відповідних частот

Частота	0,36 ГГц	0,46 ГГц	0,92 ГГц
КП	0,20	2,80	7,80

2.6.6 Порівняння частотних характеристик антен різних модифікацій

На рисунку 2.32 видно, як саме змінюється коефіцієнт підсилення від виду модифікації логоперіодичної антени та її робочої частоти.

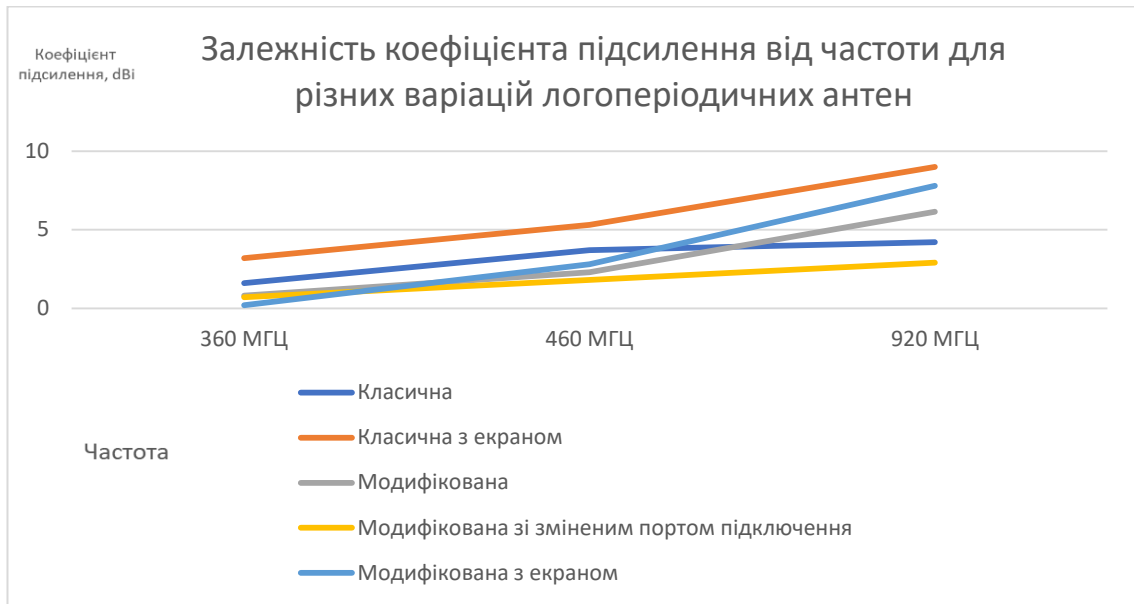


Рисунок 2.32 – Частотна залежність КП для різних варіантів логоперіодичних антен, змодельованих в середовищі HFSS

На рисунку 2.32 чітко видно нелінійне зростання коефіцієнта підсилення із збільшенням робочої частоти.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ АНТЕНИ

3.1 Основна мета експерименту

Основною метою експерименту є перевірка правильності визначення основних параметрів та характеристик логоперіодичної антени та порівняння цих результатів з відповідними даними моделювання в HFSS, отриманими для цих макетів в процесі їх досліджень. На рисунку 3.1 показано макет класичної логоперіодичної антени.



Рисунок 3.1 – Фото макету класичної логоперіодичної антени

На рисунку 3.2 можемо бачити макет компактної логоперіодичної антени.

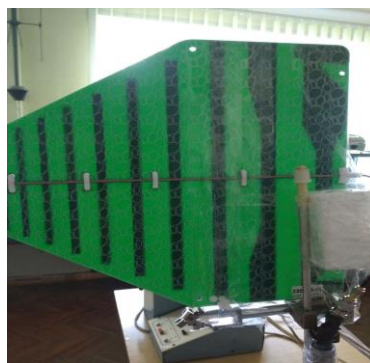


Рисунок 3.2 – Фото компактної логоперіодичної антени

3.2 Програма для автоматизації вимірювань ДС антен

При експериментальному дослідженні ДС логоперіодичних антен застосовувався такий зручний інструмент автоматизації вимірювань, як програма PolarPlot. Основне вікно програми зображено на рисунку 3.3.

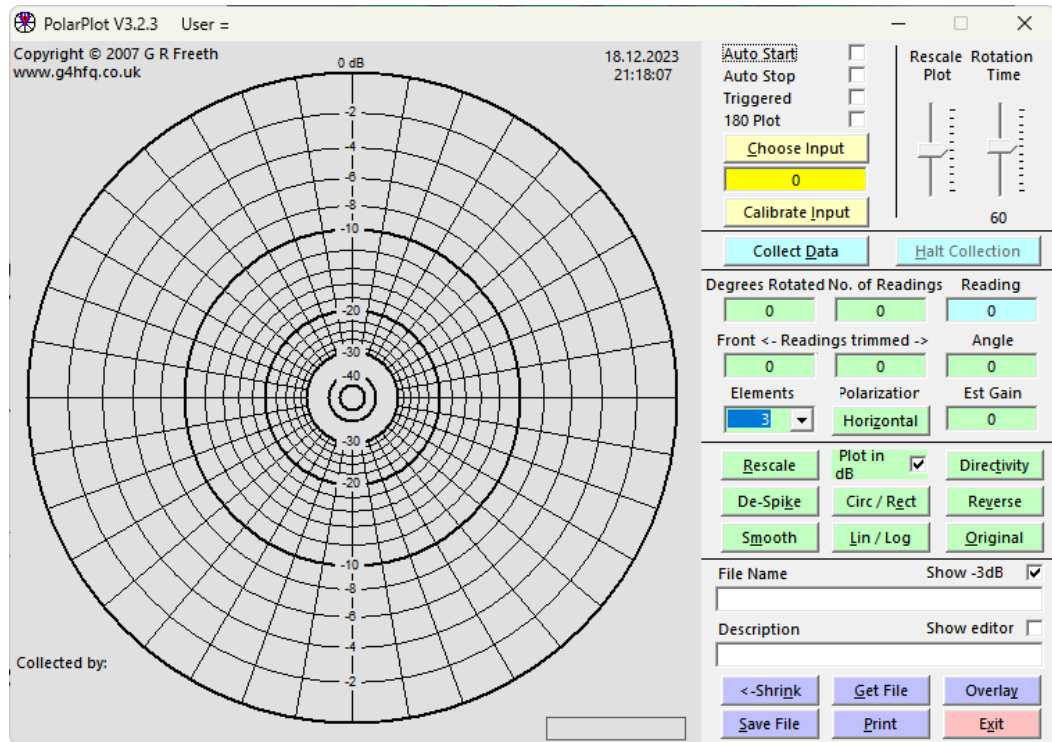


Рисунок 3.3 – Основне вікно програми виміру ДС антени PolarPlot

Структурна схема установки для вимірювання ДС в приймальному режимі складається із наступних частин:

- приймач: детектор та НЧ підсилювач, антена, яку ми будемо досліджувати, аналогово-цифровий перетворювач на вході звукової карти комп'ютера, комп'ютер з програмою PolarPlot, яка виконує функцію АЦП, запису та накладання, що дозволяє порівняти безліч варіантів досліджень, і опорно-поворотний пристрій;

- передавач: генератор та антена (аналогічна досліджуваній).

PolarPlot регулює час обертання, який визначає кутову розгортку діаграми спрямованості при її вимірюванні, за допомогою повзунка «Rotation Time» (Час Обертання) зверху на головному екрані програми, щоб синхронізувати час розгортки з повним часом одного оберту опорно-поворотного пристрою. Інтервал зміни часу від 20 до 120 сек [13].

Можливості програми включають опції:

- зняти ДС в круговій або прямокутній системі координат, в лінійному або логарифмічному масштабі;
- зняти ДС в просторі 360° або 180° ;
- відобразити ДС, коефіцієнт підсилення, ширину головної пелюстки – 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;
- зберегти ДС у вигляді файлу, який можна редагувати в будь-якому текстовому системному редакторі, наприклад, в блокноті, для збереження ДС треба натиснути кнопку «Save File...» на головному екрані програми PolarPlot. З'явиться діалогове вікно Windows.

3.3 Вимірювання ДС

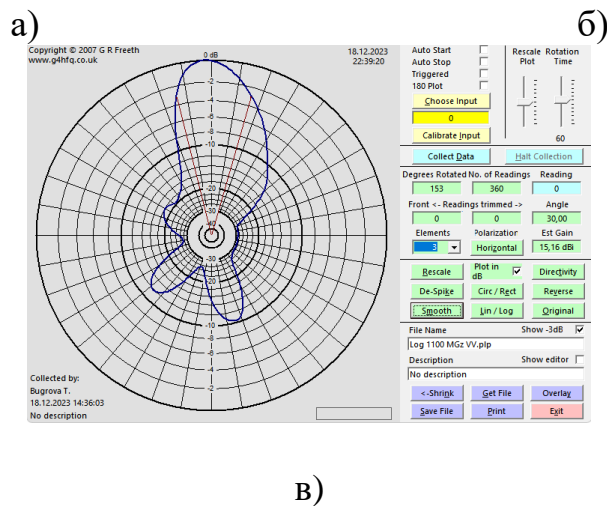
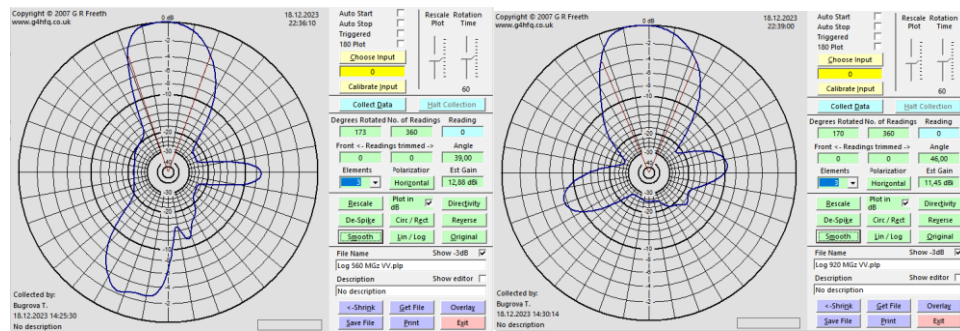
Перед вимірюваннями ДС необхідно здійснити наступні підготовчі етапи:

- юстувати (налаштувати по максимуму шляхом переміщення по висоті і по куту повороту в просторі передавальну та приймальну антени;
- синхронізувати швидкість обертання валу опорно-поворотного пристрою та швидкість розгортки в програмі PolarPlot;
- калібрування за рівнем сигналу.

Вимірювання проводились на частотах 0,408 ГГц, 0,46 ГГц, 0,92 ГГц. Ці частоти відповідають максимумам потужності вимірювального генератора, що є наслідком лакуарності спектру його клістрона.

3.4 Порівняння експериментальних та розрахункових ДС класичної логоперіодичної антени

На рисунку 3.4 бачимо експериментальну ДС класичної логоперіодичної антени.



а) 0,56 ГГц; б) 0,92 ГГц; в) 1,1 ГГц.

Рисунок 3.4 – ДС класичної логоперіодичної антени

На рисунку 3.5 бачимо експериментальний графік частотної залежності коефіцієнта підсилення для класичної логоперіодичної антени.

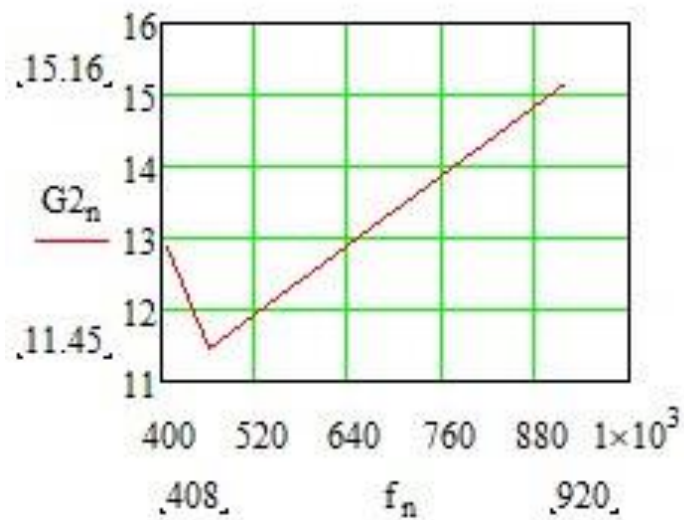
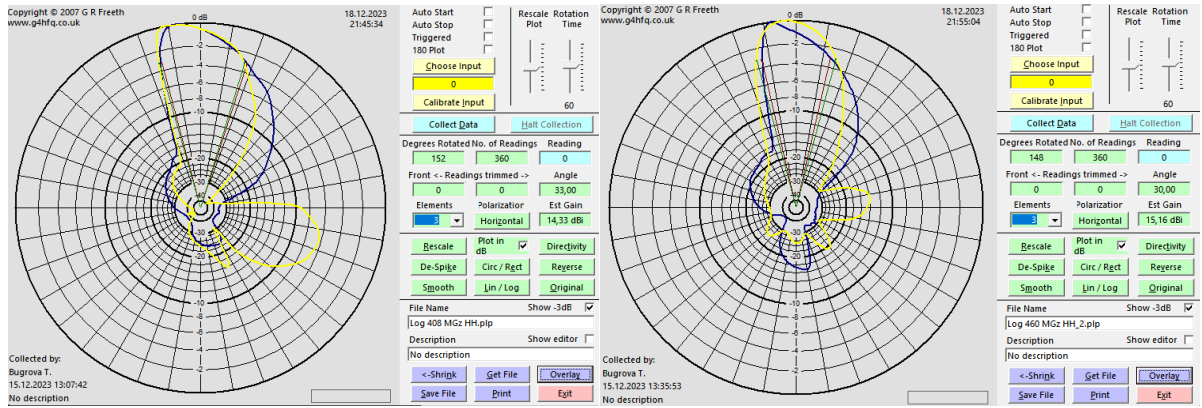


Рисунок 3.5 – Експериментальний графік частотної залежності коефіцієнта підсилення для класичної логоперіодичної антени

З рисунку 3.5 виходить, що на частотах 0,56 ГГц коефіцієнт підсилення становить 12,88 дБ, на частоті 0,92 ГГц – 11,45 дБ на частоті 1,1 ГГц – 15,16 дБ, тобто, експериментально визначенні коефіцієнти підсилення нелінійно зростають при збільшенні частоти.

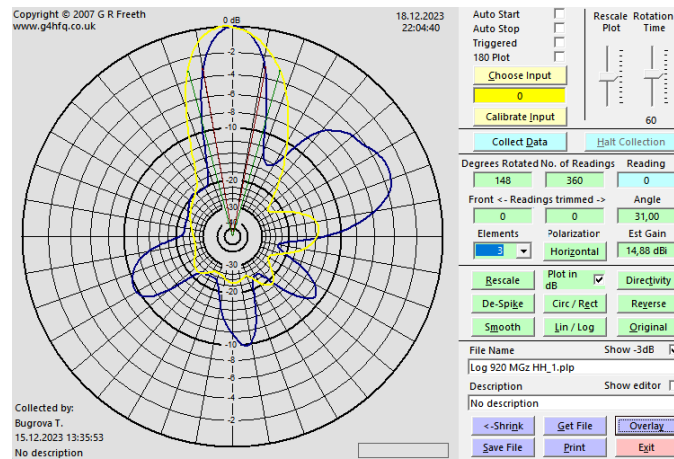
3.5 Порівняння експериментальних та розрахункових ДС для компактної логоперіодичної антени

Вимірювання проводились при трьох типах лінійної поляризації: вертикальній, горизонтальній та на кросполяризації (коли передавач працює на вертикальній поляризації, а приймач – на горизонтальній поляризації). Результати вимірів ДС видно на рисунку 3.6.



a)

б)



в)

а) 0,56 ГГц; б) 0,92 ГГц; в) 1,1 ГГц;

синя крива – переріз у V-площині; жовта крива – переріз у H-площині.

Рисунок 3.6 – ДС компактної логоперіодичної антени

На рисунку 3.7 маємо експериментально отриманий графік залежності коефіцієнта підсилення від частоти для компактної логоперіодичної антени.

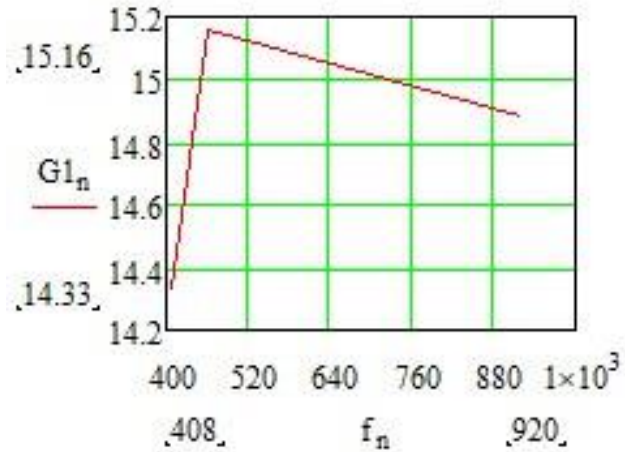
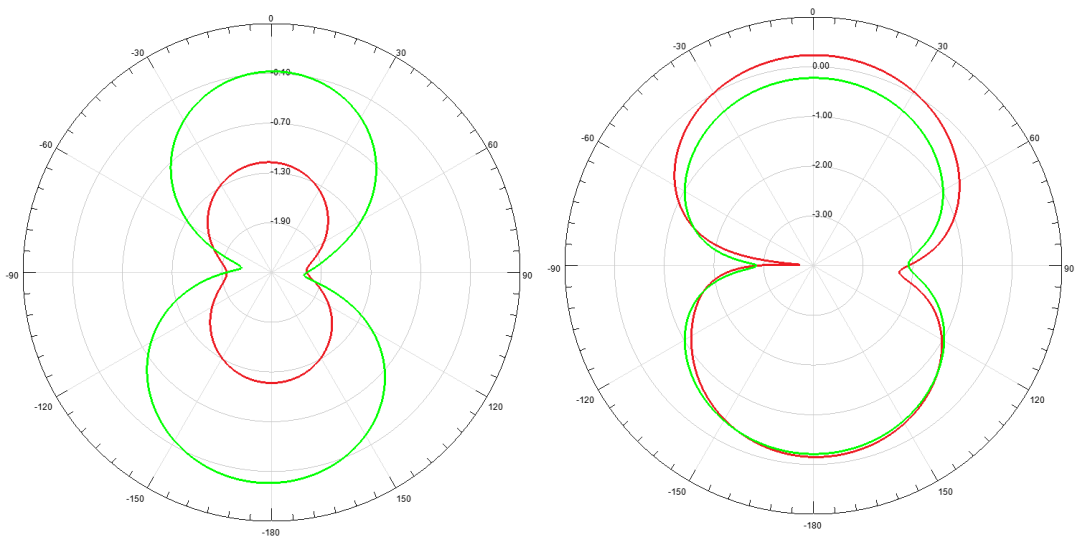


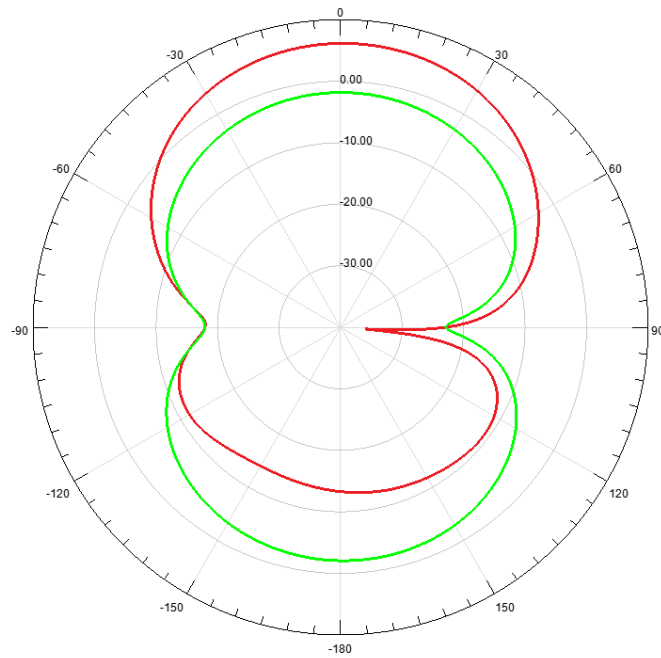
Рисунок 3.7 – Експериментальний графік частотної залежності коефіцієнта підсилення для компактної логоперіодичної антени

Погляньмо уважно на рисунок 3.8. Їх значення є наступними. На частоті 0,408 ГГц це 14,33 дБ, на частоті 0,46 ГГц – це 15,16 дБ та на частоті 0,92 ГГц – це 14,88 дБ. Як і для попередньої модифікації антени коефіцієнт підсилення її нелінійно збільшується при збільшенні частоти.



а)

б)



в)

а) 0,56 ГГц; б) 0,92 ГГц; в) 1,1 ГГц;

червона крива – переріз у V-площині; зелена крива – переріз у H-площині.

Рисунок 3.8 – ДС модифікованої логоперіодичної антени, розрахована в програмі HFSS

На рисунку 3.9 зображено графік частотної залежності коефіцієнта підсилення для модифікованої логоперіодичної антени в HFSS.

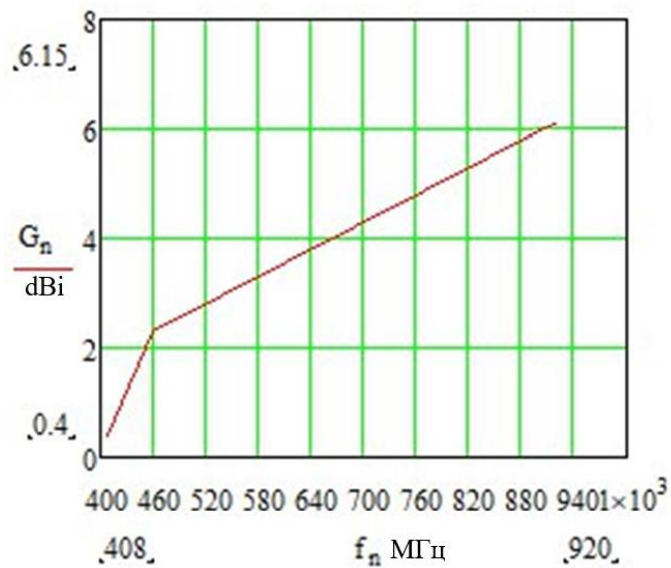


Рисунок 3.9 – Графік частотної залежності коефіцієнта підсилення для компактної логоперіодичної антени, розрахований в середовищі HFSS

На рисунку 3.9 бачимо на частотах 0,408 ГГц – 0,4 дБ, 0,46 ГГц – 2,3 дБ та 0,92 ГГц – 6,15 дБ. Загалом, бачимо в усіх випадках нелінійне зростання коефіцієнта підсилення зі зростанням частоти.

ВИСНОВКИ

В процесі дослідження проєктів логоперіодичних антен для систем РЕБ та визначення їх параметрів і характеристик ми отримали такі результати:

– досліджено логоперіодичні антени з 10 вібраторів у діапазоні 0,3-1,3 ГГц, було розраховано їх параметри. Шляхом моделювання у середовищі HFSS було отримано якісні і кількісні характеристики логоперіодичних антен різних конструктивних модифікацій;

– КСХ класичного варіанту логоперіодичної антени нижче 2 в робочій смузі частот, навіть у найкращому випадку дорівнює 1,08, що дає гарне узгодження з лінією живлення в 50 Ом. Коефіцієнт підсилення досягає 6,15 dBi;

– додавання до плоскої логоперіодичної антени металевго екрану впливає незначним чином на характеристики антени, злегка порушуючи симетрію діаграми спрямованості, яка відтискається від підкладки внаслідок дзеркальної дії екрану;

– шляхом комплексного дослідження та модернізації логоперіодичної антени в смузі частот 0,3-1,3 ГГц вдалося зміною форми найдовших вібраторів отримати кращий ступінь узгодження вхідного імпедансу антени з портом її живлення на частоті 0,92 ГГц (попереднє значення КСХ = 2, остаточне значення КСХ = 1.19). При цьому поперечний розмір антени зменшився, тобто, вона стала більш компактною і мобільною;

– внаслідок конструктивних змін коефіцієнт підсилення збільшився з 4,2 dBi до 6,15 dBi. На одній частоті можна підняти КП до 7,8 dBi, і навіть до 9 дБі, але при цьому погіршуються показники узгодження в смузі на інших частотах.

Таким чином, отримані характеристики і параметри підтверджують можливість використання даної логоперіодичної антени в якості

випромінювача для РЕБ та в системах окопних РЕР та РЕБ для збереження життів особового складу підрозділів на передовій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Доктрина військ зв'язку та кібербезпеки ЗСУ / Харків: НАНГУ. – 2024. – 291с.
2. Довідник військового зв'язківця. Засоби радіоелектронної боротьби та розвідки, які використовуються російською федерацією. – К: ЦУЛ, 2024. – 64 с.
3. Макмастер Г. Поля битв. Боротьба за захист вільного світу. / Герберт Макмастер. – Харків: Фоліо, 2022. – 597 с.
4. Handbook of Antenna Technologies/ Zhi Ning Chen // Springer Science+Business Media Singapore, 2016. – 2178 p.
5. Семенов Б. Погляди керівництва ЗС США на ведення електронної війни в операціях XXI століття з використанням сил повітряно-космічного нападу / Б. Семенов // Зарубіжний військовий огляд. – 2023. – № 6. – С. 66-78.
6. Логоперіодична антена: принцип дії, використання і особливості [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://sitemasters.com.ua/elektrobladnannja/logoperiodichna-antena-princip-dii-vikoristannya-i-osoblivosti/> (дата звернення 09.10.2024) – Назва з екрану.
7. HFSS – High Frequency Structure Simulation. Manuals, Agilent, 2024.
8. Practical Antenna Handbook / J.J.Carr, G.W.Hippisley. – NY: McGraw-Hill, 2011. – 408 с.
9. Sarabandi K. Efficient calculation of the fields of a dipole radiating above an impedance surface/ K. Sarabandi, M.D. Casciato, I.-S. Koh // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2022. – Vol. 60. – N. 7. – Pp. 1202-1215.
10. Polar Plot Version 1.60.5, програма для просмотра діаграми направленности вращающейся антенны [Електронний ресурс] – Режим доступу: Pandia.com (дата звернення 08.12.2024) – Назва з екрану.