

ЖИТОМИРСЬКИЙ ВІЙСЬКОВИЙ ІНСТИТУТУ ІМЕНІ С.П.КОРОЛЬОВА
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ІНЖЕНЕРІЇ



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

здобувача вищої освіти ступеня «бакалавр» заочної форми навчання
за спеціальністю «Телекомунікації та радіотехніка»

Тема: «РОЗРАХУНОК АНТЕН ДЛЯ ПЕЛЕНГАТОРІВ»

Виконавець: Андрій СКОЦЬКИЙ

м. Житомир

2026

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему: «Розрахунок антен для пеленгаторів» включає: 65 сторінок, 24 ілюстрацій, 8 формул, 1 таблиця, 38 використаних джерел та містить 3 додатка.

Ключові слова: логоперіодична антена, вібратор, коефіцієнт направленої дії, вхідний опір, широкосмугова антена, діапазон частот, радіотехнічні системи.

Об'єктом дослідження є логоперіодична антена, що працює у діапазоні частот 2100–6000 МГц та використовується у широкосмугових радіотехнічних системах.

Предмет дослідження – електричні, конструктивні та частотні параметри логоперіодичної антени, а також їх вплив на характеристики випромінювання, узгодження з фідером і стабільність роботи в заданому діапазоні частот.

Мета дослідження полягає у виконанні повного інженерного розрахунку, конструювання та моделювання логоперіодичної антени із заданими параметрами. Забезпечується коефіцієнт направленої дії не менше 10 дБ, вхідний опір 50 Ом і стабільна робота в усьому діапазоні частот 2100–6000 МГц. Додатково перевіряється відповідність отриманих характеристик результатам моделювання.

Методи дослідження. Для розв'язування поставлених завдань використано аналітичні методи розрахунку антен, основні положення електродинаміки, чисельні методи визначення геометричних параметрів вібраторів, а також комп'ютерне моделювання характеристик антени. Застосовано методи інженерного проектування для узгодження антени з лінією живлення та забезпечення необхідних параметрів випромінювання.

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Результати роботи та їх новизна полягають у тому, що виконано узгоджений розрахунок і моделювання логоперіодичної антени для діапазону 2100–6000 МГц. Визначено оптимальні геометричні параметри вібраторів і відстані між ними, що забезпечують коефіцієнт направленої дії не менше 10 дБ та вхідний опір 50 Ом. Отримано узгодження між теоретичними розрахунками та результатами моделювання, що підвищує достовірність розробки.

Практичне значення дослідження полягає у можливості використання розробленої антени у системах зв'язку, радіомоніторингу та пеленгування сигналів. Отримані результати дають готову основу для виготовлення антени та її подальшого застосування, а також можуть бути використані для оптимізації антенних пристроїв під конкретні умови роботи.

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ABSTRACT

The bachelor's qualification thesis on the topic "Antenna Design for Direction Finders" includes: 65 pages, 24 figures, 8 formulas, 1 table, 38 references, and contains 3 appendices.

Keywords: log-periodic antenna, vibrator, directivity factor, input impedance, broadband antenna, frequency range, radio engineering systems.

The object of the study is a log-periodic antenna operating in the frequency range of 2100–6000 MHz and used in broadband radio engineering systems.

The subject of the study is the electrical, structural, and frequency parameters of a log-periodic antenna, as well as their influence on radiation characteristics, matching with the feeder, and stability of operation within the specified frequency range.

The purpose of the study is to perform a complete engineering calculation, design, and simulation of a log-periodic antenna with заданими parameters. The antenna provides a directivity factor of at least 10 dB, an input impedance of 50 Ohms, and stable operation over the entire frequency range of 2100–6000 MHz. Additionally, the obtained characteristics are verified using simulation results.

Research methods. Analytical methods of antenna calculation, fundamental principles of electrodynamics, numerical methods for determining the geometric parameters of vibrators, and computer simulation of antenna characteristics were used to solve the задачі. Engineering design methods were applied to ensure proper matching of the antenna with the transmission line and to achieve the required radiation parameters.

The results and their novelty lie in the fact that a consistent calculation and simulation of a log-periodic antenna for the 2100–6000 MHz range have been carried out. Optimal geometric parameters of the vibrators and the distances between them have been determined, ensuring a directivity factor of at least 10 dB and an input impedance of 50 Ohms. Agreement between theoretical calculations and simulation results has been achieved, which increases the reliability of the design.

					ЖБИ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

The practical significance of the study lies in the possibility of using the developed antenna in communication systems, radio monitoring, and signal direction finding. The obtained results provide a basis for antenna manufacturing and further application, and can also be used to optimize antenna devices for specific operating conditions.

					ЖБИ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РАДІОПЕЛЕНГУВАННЯ В ДІАПАЗОНІ ВЕРХНЬОГО УВЧ ТА НИЖНЬОГО НВЧ ДІАПАЗОНІВ.....	19
1.1 Призначення та основні принципи радіопеленгування	19
1.2 Класифікація методів радіопеленгації.....	21
1.3 Сфери застосування радіопеленгаторів	26
1.4 Основні вимоги до антен радіопеленгаторів.....	27
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ АНТЕН, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ДІАПАЗОНІ 2100–6000 МГц	29
2.1 Основні типи антен для систем радіопеленгування.....	29
2.2 Характеристики широкосмугових антен верхнього УВЧ та нижнього НВЧ діапазонів.....	35
2.3 Порівняльний аналіз антен для широкосмугового пеленгування.....	36
2.4 Обґрунтування вибору типу антени для діапазону 2100–6000 МГц	38
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ АНТЕНИ ДІАПАЗОНУ 2100–6000 МГц.....	40
3.1 Основні електричні та конструктивні параметри логоперіодичної антени	40
3.2 Орієнтовний розрахунок геометричних розмірів логоперіодичної антени	42
3.3 Розрахунок широкосмугових антен верхнього УВЧ та нижнього НВЧ діапазонів	43
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ АНТЕНИ В ПРОГРАМНОМУ СЕРИДОВИЩІ MMANA	47

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ	55
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	57
Додаток А. Структурна схема радіопеленгатора.....	63
Додаток Б. Геометрична модель логоперіодичної антени.....	64
Додаток В. Діаграми спрямованості антени.....	65

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

УВЧ – ультрависокі частоти.

НВЧ – надвисокі частоти.

РП – радіопеленгація.

АП – автоматичне пеленгування.

НП – напруженість поля.

ШПФ – швидке перетворення Фур'є.

СГ – спільний гетеродин.

ДС – діаграма спрямованості.

КСХН – коефіцієнт стоячої хвилі за напругою.

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

На сьогодні радіоелектронні засоби широко застосовуються у різних сферах діяльності людини. Значна кількість систем зв'язку, передачі даних і спеціального призначення працює в широкому діапазоні частот, зокрема у верхньому УВЧ та нижньому НВЧ діапазонах. Це призводить до ускладнення радіообстановки та потреби в ефективному контролі радіовипромінювань.

Одним із способів аналізу радіообстановки є радіопеленгування, яке дозволяє визначати напрямок на джерело радіосигналу. Такі методи використовуються в системах радіомоніторингу, технічного контролю та спеціальних радіотехнічних комплексах. Якість роботи радіопеленгатора значною мірою залежить від параметрів антенної системи, оскільки саме антена безпосередньо приймає сигнал і формує його просторові характеристики.

У сучасних радіопеленгаторних системах все частіше застосовуються ширококутові антени. Це пов'язано з необхідністю роботи в широкому частотному діапазоні без перебудови апаратури. Використання таких антен спрощує структуру приймального пристрою та підвищує універсальність системи загалом. Одним із поширених типів ширококутових антен є логоперіодична антена, яка відзначається стабільними характеристиками в широкому діапазоні частот і відносною простотою конструкції.

Діапазон частот 2100–6000 МГц є характерним для багатьох сучасних систем зв'язку та передачі даних. Тому розгляд антенних рішень для цього діапазону є практично доцільним. Аналіз і розрахунок антени в зазначеному частотному інтервалі дозволяє закріпити теоретичні знання з антен і поширення радіохвиль та отримати практичні навички інженерного проєктування.

Метою даної бакалаврської роботи є вибір та орієнтовний розрахунок логоперіодичної антени для радіопеленгатора, що працює в діапазоні частот 2100–6000 МГц, а також аналіз її основних параметрів.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно виконати такі завдання:

					ЖВІ.26.172.019.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- розглянути основні принципи радіопеленгування;
- проаналізувати типи антен, що використовуються в системах радіопеленгування;
- обґрунтувати вибір логоперіодичної антени для заданого діапазону частот;
- виконати орієнтовний розрахунок геометричних параметрів антени;
- провести моделювання антени та оцінити отримані результати.

Об'єктом дослідження є антенні системи радіопеленгаторів.

Предметом дослідження є логоперіодична антена, призначена для роботи в діапазоні частот 2100–6000 МГц.

У роботі застосовуються такі методи дослідження: аналіз науково-технічної літератури, інженерні методики розрахунку антен та комп'ютерне моделювання.

Практичне значення роботи полягає в можливості використання отриманих результатів під час навчального та прикладного проектування антенних систем, а також як основи для подальшого поглибленого дослідження в межах магістерської роботи.

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РАДІОПЕЛЕНГУВАННЯ В ДІАПАЗОНІ ВЕРХНЬОГО УВЧ ТА НИЖНЬОГО НВЧ ДІАПАЗОНІВ

1.1 Призначення та основні принципи радіопеленгування

Радіопеленгація (РП) – це використання радіохвиль для визначення напрямку до джерела радіосигналу (див. рис. 1.1). Джерелом може бути співпрацюючий радіопередавач або випадкове джерело, природне джерело радіосигналу, а також незаконна або ворожа система. Радіопеленгація відрізняється від радару тим, що будь-який один приймач визначає лише напрямок; радарова система зазвичай також визначає відстань до об'єкта, що цікавить, а також напрямок. За допомогою триангуляції місцезнаходження джерела радіосигналу можна визначити, вимірявши його напрямок з двох або більше точок. Радіопеленгація використовується в радіонавігації для кораблів і літаків, для пошуку аварійних передавачів для пошуково-рятувальних операцій, для відстеження диких тварин і для пошуку незаконних або створюючих перешкоди передавачів. Під час Другої світової війни радіопеленгація використовувалася обома сторонами для пошуку і наведення літаків, надводних кораблів і підводних човнів.

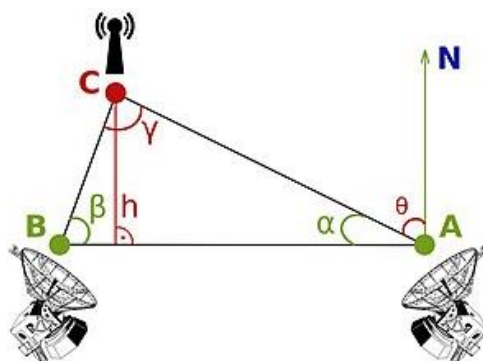


Рисунок 1.1 – Схема радіотриангуляції з використанням двох
пеленгаційних антен (А і В)

Системи РП можуть використовуватися з будь-яким радіоджерелом, хоча дуже довгі хвилі (низькі частоти) вимагають дуже великих антен і, як правило, використовуються тільки в наземних системах. Тим не менш, ці хвилі використовуються для морської радіонавігації, оскільки вони можуть проникати на дуже великі відстані «за горизонт», що є цінним для суден, коли пряма видимість може становити лише кілька десятків кілометрів. Для повітряного використання, де горизонт може простягатися на сотні кілометрів, можна використовувати вищі частоти, що дозволяє використовувати набагато менші антени (рисунк 1.2). Автоматичний пеленгатор, який можна було налаштувати на радіомаяки, звані ненаправленими маяками, або комерційні АМ-радіостанції, у 20 столітті був характерною рисою більшості літаків, але зараз поступово виходить з ужитку [1].



Рисунок 1.2 – Пеленгаційна антена поблизу міста Люцерн, Швейцарія

Для військових РП є ключовим інструментом радіорозвідки. Здатність визначати місцезнаходження ворожої передавальної станції була неоціненною з часів Першої світової війни і відіграла ключову роль у битві за Атлантику під

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

час Другої світової війни. За оцінками, передові британські системи «huff-duff» були прямо або опосередковано відповідальні за 24 % всіх підводних човнів, потоплених під час війни. Сучасні системи часто використовують фазовані антенні решітки, що дозволяють швидко формувати промінь для отримання високоточних результатів, і є частиною більш великого комплексу засобів радіоелектронної боротьби.

Ранні радіопеленгатори використовували механічно обертові антени, які порівнювали силу сигналів, а потім з'явилося кілька електронних версій тієї ж концепції. Сучасні системи використовують порівняння фазових або доплерівських методів, які, як правило, простіше автоматизувати. Ранні британські радіолокаційні установки називалися РП, що, як часто зазначається, було обманом. Насправді системи Chain Home використовували великі приймачі РП для визначення напрямків. Пізніші радіолокаційні системи, як правило, використовували одну антену для передачі та прийому і визначали напрямок за напрямком, в якому була спрямована антена [2].

1.2 Класифікація методів радіопеленгації

Найпоширенішим методом визначення місцезнаходження передавача під час Другої світової війни та на початку Холодної війни було використання двох або більше мобільних приймальних станцій зі спрямованими антенами. Щойно починалася передача, кожна мобільна станція намагалася знайти кут, під яким сила сигналу була найвищою та намалювати його у вигляді лінії на карті міста (рис. 1.3) [3].

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

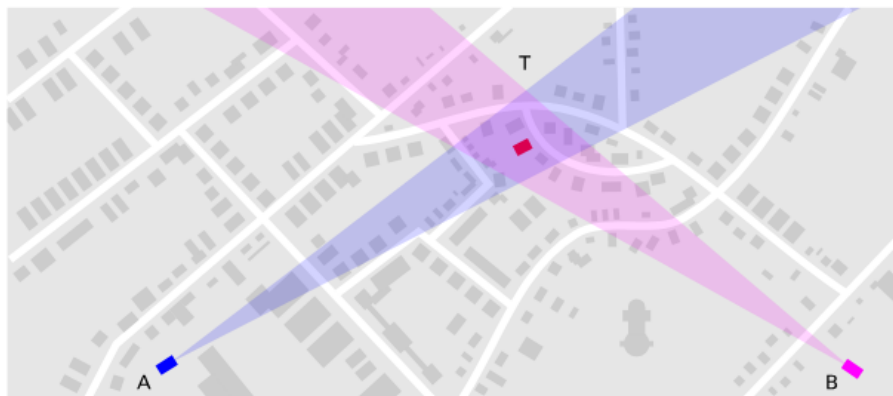


Рисунок 1.3 – Метод триангуляції

Оскільки спрямована антена не є ідеальною, і через відбиття радіохвиль від будівель тощо кут має певний допуск. Наведений вище малюнок ілюструє, як це працює, коли дві мобільні станції радіопеленгації РП (А та В) визначили пеленг на непередбачений передавач (Т). Через трикутник АВТ цей метод відомий як тріангуляція.

У наведеному вище прикладі все ще існує невизначеність у кілька будинків. Крім того, метод не працює, коли передавач розташований точно між двома приймальними станціями. Цю проблему можна вирішити, використовуючи три або більше станцій РП у стратегічних позиціях навколо міста. Після того, як положення передавача було приблизно визначено, перехоплювачі рухалися ближче до цілі, щоб звужити кут допуску. Після того, як середнє положення було відоме, перехоплювачі зазвичай використовували вимірювання напруженості поля для останнього етапу.

З наведеного вище прикладу буде очевидно, наскільки небезпечно експлуатувати непередбачений передавач у воєнний час. З цієї причини агенти часто змінювали розташування свого передавача та намагалися зробити свої передачі якомога коротшими. Це було зроблено шляхом мінімізації довжини повідомлення та надсилання повідомлення у вигляді високошвидкісного пакету за допомогою так званого передавача пакетів.

Одним з найпростіших і найефективніших способів знайти нелегальний передавач є використання вимірювача напруженості поля з регульованим атенюатором.

Перехоплювач з мобільною радіопеленгаційною станцією спочатку проїжджав по головній дорозі, щоб перевірити, чи сигнал стає сильнішим або слабкішим.

Потім він коригує свій план. При наближенні до передавача атенюатор збільшується, щоб індикатор напруженості поля все ще показував корисні значення на шкалі. На практиці досвідчений перехоплювач зазвичай може визначити місцезнаходження за менш ніж 30 хвилин.

Вимірювання сили поля досі широко використовується, часто в поєднанні з іншими методами РП, такими як триангуляція та автоматичне пеленгування (АП), особливо на завершальному етапі роботи, щоб знайти точну будівлю, з якої працює нелегальний передавач.

Приклад вимірювача напруженості поля, який використовувався голландською службою радіомоніторингу (рис. 1.4)



Рисунок 1.4 – Вимірювач напруженості поля

Вимірювачі напруженості поля (НП) – це відносно прості прилади, які можна виготовити лише з декількох компонентів. Проте вони дуже ефективні, особливо в безпосередній близькості від передавача. Вони можуть бути селективними або неселективними, причому перші нечутливі до сильних (небажаних) радіосигналів поблизу. На зображенні вище показаний неселективний портативний вимірювач НП з вбудованим лічильником частот, який використовувався голландською службою радіомоніторингу (RCD) у 1980-х і 90-х роках [4].

Кореляційний інтерферометр використовує дві або (бажано) три дуже ідентичні антени та приймачі, розташовані на відомих відстанях, а також сигнал від (4-ї) опорної антени та аналізує їх у комп'ютерній системі, використовуючи передові математичні методи, такі як швидке перетворення Фур'є (ШПФ). Фаза сигналів потім використовується для розрахунку пеленгу до передавача. При використанні з літака з трьома антенами можна розрахувати як азимут, так і кут місця [5].

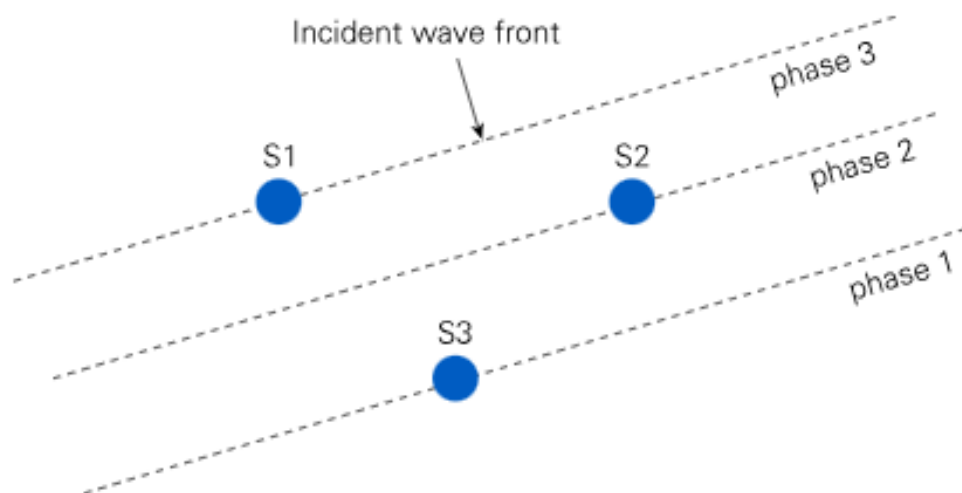


Рисунок 1.5 – Розміщення системи з 3 антенами у трикутник

На ілюстрації вище показано, як це працює для системи з 3 антенами, розміщеними у трикутнику (рис. 1.5). Антени підключені до трьох однакових приймачів, налаштованих паралельно, за допомогою спільного гетеродина (СГ), яким керує комп'ютерна система. Сигнали трьох приймачів перетворюються в цифровий формат (тобто оцифровуються), а потім подаються на комп'ютер.

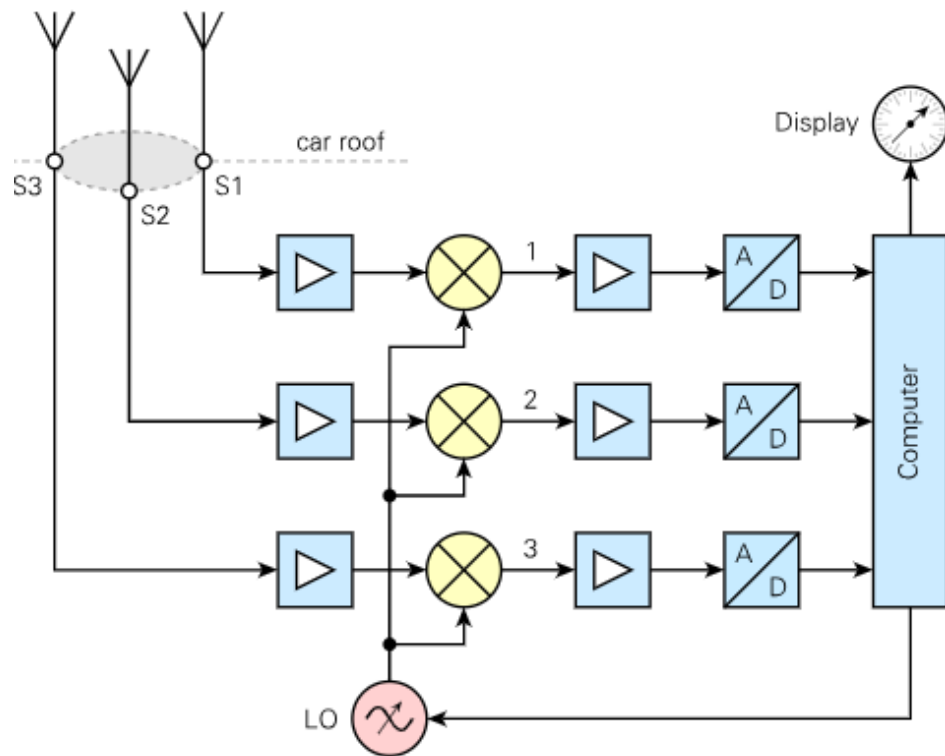


Рисунок 1.6 – Кореляційний інтерферометр

Принципи кореляційного інтерферометра були вперше описані в 1961 році К. В. Маклішем та Н. Буртником (рис. 1.6) [5]. Однією з перших компаній, яка виготовила комерційно доступний кореляційний інтерферометр у середині 1980-х років, була компанія Watkins-Johnson у Гейтерсбурзі (Меріленд, США) [6].

У 1987 році його вдосконалив Девід Тонг, і його компанія Datong Electronics Ltd. у Лідсі (Велика Британія) почала продавати його як альтернативу доплерівському інтерферометру [7]. Рішення Datong використовувалися різними європейськими правоохоронними та розвідувальними органами принаймні до початку 2000-х років як для стаціонарних, так і для транспортних засобів виявлення перешкод, зокрема для стеження за людьми, транспортними засобами та грошима за допомогою маячків відстеження.

1.3 Сфери застосування радіопеленгаторів

Радіопеленгатори використовуються у різних сферах діяльності, де виникає потреба у визначенні напрямку на джерело радіовипромінювання. Завдяки розвитку радіоелектронних технологій та зростанню кількості бездротових систем, значення радіопеленгування з кожним роком збільшується.

Однією з основних сфер застосування радіопеленгаторів є системи радіомоніторингу та контролю радіообстановки. У таких системах радіопеленгатори використовуються для виявлення та локалізації джерел випромінювання, аналізу зайнятості частотного спектра та контролю дотримання регламентів радіозв'язку. Це особливо актуально в умовах щільного використання радіочастот сучасними системами зв'язку.

Радіопеленгування також широко застосовується у навігаційних і пошуково-рятувальних системах. За допомогою радіопеленгаторів можливе визначення напрямку на аварійні радіомаяки або передавачі сигналів лиха, що дозволяє значно скоротити час пошуку об'єктів або людей. Такі системи використовуються як у морській, так і в авіаційній практиці.

Важливою сферою застосування радіопеленгаторів є забезпечення безпеки та спеціальні технічні системи. Радіопеленгування дає змогу виявляти несанкціоновані або приховані передавачі, контролювати радіообмін у визначених зонах та оцінювати джерела потенційних радіозавад. Це використовується в системах технічного захисту інформації та під час забезпечення безпеки об'єктів.

Крім того, радіопеленгатори застосовуються в науково-дослідних та навчальних цілях. Вони використовуються для вивчення процесів поширення радіохвиль, дослідження характеристик антен та відпрацювання методів просторового аналізу радіосигналів. У навчальних лабораторіях радіопеленгування дозволяє закріпити теоретичні знання на практичних прикладах [2].

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, радіопеленгатори знаходять застосування у багатьох галузях, пов'язаних із радіозв'язком і радіоконтролем. Універсальність методів радіопеленгування та можливість роботи в широкому діапазоні частот роблять ці пристрої важливим елементом сучасних радіотехнічних систем.

1.4 Основні вимоги до антен радіопеленгаторів

Антенна є одним із ключових елементів радіопеленгатора, оскільки саме вона забезпечує прийом радіосигналів та формує їх просторові характеристики. Від параметрів антени значною мірою залежить точність визначення напрямку на джерело випромінювання, а також загальна ефективність роботи всієї системи.

Однією з основних вимог до антен радіопеленгаторів є можливість роботи в заданому діапазоні частот. У сучасних умовах радіопеленгатори часто повинні приймати сигнали в широкому частотному діапазоні, тому перевага надається широкосмуговим антенам. Така властивість дозволяє здійснювати пеленгування без перебудови антенної системи при зміні робочої частоти.

Важливою вимогою є стабільність електричних характеристик антени в усьому робочому діапазоні. До таких характеристик належать коефіцієнт стоячої хвилі, коефіцієнт підсилення та форма діаграми спрямованості. Значні зміни цих параметрів можуть призводити до зниження точності пеленгування та появи додаткових похибок.

Антенна радіопеленгатора повинна мати відповідну діаграму спрямованості. Залежно від обраного методу пеленгування, це може бути вузька спрямованість або, навпаки, близька до всеспрямованої. При цьому важливо, щоб діаграма спрямованості була симетричною та не мала значних побічних пелюсток, які можуть ускладнювати визначення напрямку на джерело сигналу.

Окрему увагу слід приділяти узгодженню антени з фідерною лінією та приймальним трактом. Погане узгодження призводить до відбиття частини сигналу та зменшення рівня корисного сигналу на вході приймача.

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тому при проєктуванні антенних систем необхідно забезпечувати прийнятні значення коефіцієнта стоячої хвилі в усьому робочому діапазоні частот.

Не менш важливими є конструктивні вимоги до антени. Антена повинна мати достатню механічну міцність, бути зручною в монтажі та стійкою до впливу зовнішніх факторів. У разі використання радіопеленгатора в польових умовах важливими є також габаритні розміри та маса антени [8].

Таким чином, антени радіопеленгаторів повинні поєднувати в собі широкосмуговість, стабільність параметрів, відповідну діаграму спрямованості та надійність конструкції. Дотримання цих вимог дозволяє забезпечити ефективну роботу радіопеленгатора та підвищити точність визначення напрямку на джерело радіовипромінювання.

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ АНТЕН, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ДІАПАЗОНІ 2100–6000 МГц

2.1 Основні типи антен для систем радіопеленгування

Розрізняють два базові конструктивні типи антен – всеспрямовані та спрямовані [9].

Всеспрямовані антени забезпечують випромінювання радіочастотної енергії практично рівномірно в горизонтальній площині. При цьому їхня діаграма спрямованості у вертикальній площині має звуження, завдяки чому зменшуються втрати енергії на випромінювання вгору або вниз і підвищується ефективна дальність зв'язку в заданій зоні покриття.

Спрямовані антени, навпаки, формують випромінювання зосереджено в конкретному напрямку, створюючи виражений максимум діаграми спрямованості та підвищену щільність потужності в заданому секторі. Такі антени доцільно застосовувати для організації радіоліній типу «точка-точка», де необхідна висока концентрація енергії та мінімізація побічних випромінювань [10].

Водночас слід враховувати, що абсолютно всеспрямованих або ідеально спрямованих антен не існує. Зазначені терміни використовуються для умовної класифікації відповідно до характеру розподілу електромагнітного поля в просторі.

Антени Ягі-Уда (рис. 2.1) – це багатоеlementні конструкції, що складаються з активного вібратора, рефлектора та одного або кількох директорів (паразитних елементів). Така конфігурація формує вузьку діаграму спрямованості та забезпечує підвищений коефіцієнт підсилення в заданому напрямку [11].

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

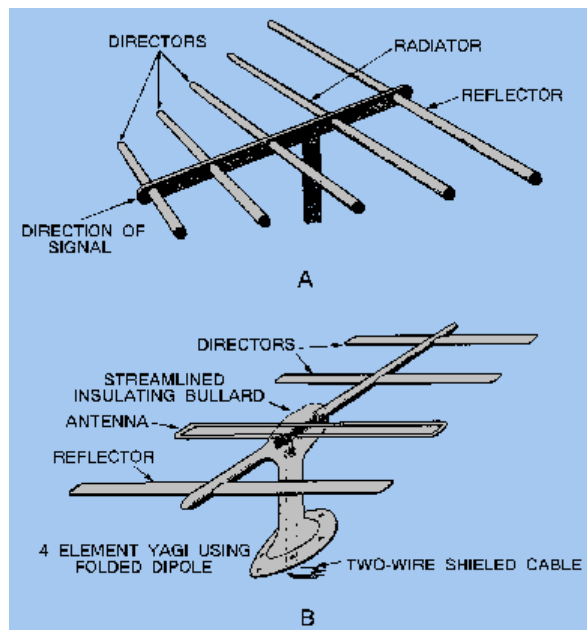


Рисунок 2.1 – Антена Ягі-Уда

Логарифмічно-періодичні антени (рис. 2.2) належать до широкосмугових односпрямованих систем. Їхні геометричні параметри – довжина елементів і відстань між ними – змінюються за логарифмічним законом, що забезпечує повторюваність імпедансних та випромінювальних характеристик у широкому частотному діапазоні. Завдяки цьому вони ефективні в застосуваннях, де потрібне стабільне узгодження в межах значної смуги частот [12].



Рисунок 2.2 – Логарифмічно-періодична антена

Параболічні антени (рефлекторні системи) складаються з відбивної поверхні параболічної форми та опромінювача, розташованого у фокусі (рис. 2.3). Відбиті від рефлектора хвилі формують вузький спрямований пучок.

Рефлектор може бути виконаний у вигляді суцільної тарілки, сітчастої конструкції або іншої геометричної модифікації. Поширені варіанти – фронтальне живлення, схема Кассегрена (із заднім розміщенням опромінювача), а також сферичні чи кутові виконання [13].



Рисунок 2.3 – Параболічна антена

Рупорні антени (рис. 2.4) реалізуються на основі розширюваного хвилеводу (конічного або пірамідального), який формує та спрямовує електромагнітну хвилю. Найчастіше застосовуються у діапазонах понад 300 МГц, особливо в НВЧ-техніці [14].

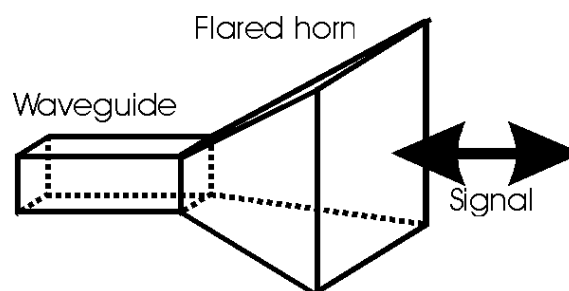


Рисунок 2.4 – Рупорна антена

Панельні та секторні антени (рис. 2.5) зазвичай мають плоске виконання й захищені радіопрозорим кожухом. Конструктивно вони базуються на мікросмужкових випромінювачах, планарних решітках або наборах диполів.

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У стільникових мережах можуть використовуватися кілька панелей для формування необхідного секторного покриття, а адаптивні системи здатні обирати оптимальну конфігурацію випромінювання [15].

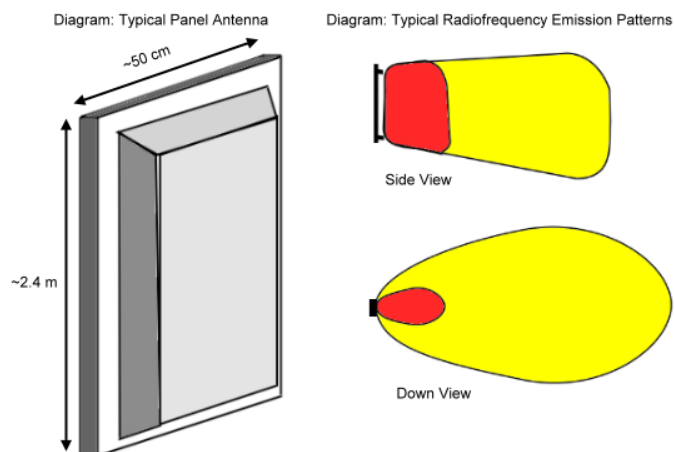


Рисунок 2.5 – Панельна антена

Спиральні антени (рис. 2.6) являють собою провідник, намотаний у вигляді гвинтової лінії. Залежно від режиму роботи (осьове або бокове випромінювання) вони можуть бути як спрямованими, так і близькими до всеспрямованих. Характерною особливістю є формування кругової поляризації [16].



Рисунок 2.6 – Спиральна антена

Біконічні антени (рис. 2.7) складаються з двох конусоподібних провідників зі спільною віссю та точкою живлення у вершині.

Якщо один із конусів замінюється диском, така конструкція називається дискоконусною. Подібні антени відзначаються широкосмуговістю [17].



Рисунок 2.7 – Біконічна антена

Мікросмушкові (patch-) антени (рис. 2.8) виготовляються на основі друкованих плат. Вони компактні, технологічні та можуть адаптуватися до різних форм поверхні. Хоча їхній ККД зазвичай нижчий, ніж у класичних провідникових антен, масиви таких елементів дозволяють формувати задану спрямованість і поляризацію [18].

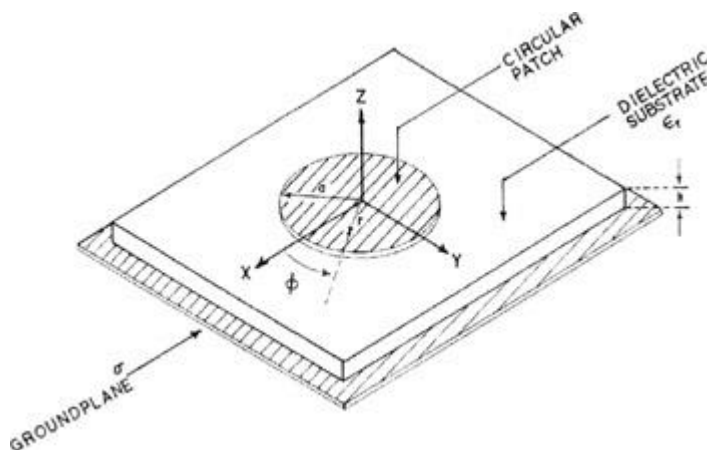


Рисунок 2.8 – Мікросмушкова антена

Петльові антени (рис. 2.9) характеризуються переважно всеспрямованою діаграмою у своїй площині. Малі петлі (з довжиною кола значно меншою за довжину хвилі) здебільшого застосовуються як приймальні. Зі збільшенням розміру до величини, кратної довжині хвилі, з'являється можливість отримання

підсилення. Використання їх у складі антенних решіток або в конфігурації Ягі дозволяє підвищити спрямованість [19].



Рисунок 2.9 – Петльова антена

Монопольні антени (штирові або вертикальні) складаються з одного провідника, встановленого над провідною площиною, яка виконує роль заземлення (рис. 2.10). Живлення подається до основи випромінювача [20].

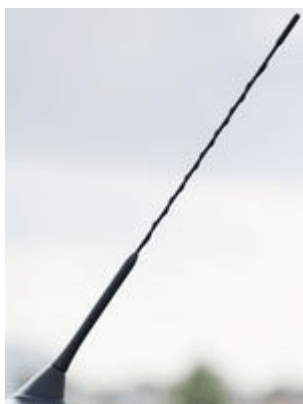


Рисунок 2.10 – Монопольна антена

Дипольні антени (рис. 2.11) утворені двома симетричними провідниками, на які подається сигнал з однаковою амплітудою та протилежною фазою. Вони є одними з найпоширеніших базових випромінювачів у радіотехнічних системах [21].



Рисунок 2.11 – Дипольна антена

Отже, розглянуті типи антен відрізняються як за конструкцією, так і за принципом формування діаграми спрямованості та робочими характеристиками. Кожен різновид має своє практичне призначення: одні забезпечують широку смугу частот, інші – високу спрямованість або компактність конструкції. Вибір антени визначається умовами експлуатації, необхідним коефіцієнтом підсилення, поляризацією та робочим діапазоном частот. Тому під час проектування радіотехнічних систем важливо враховувати не лише тип антени, а й конкретні вимоги до якості та надійності зв'язку.

2.2 Характеристики широкосмужових антен верхнього УВЧ та нижнього НВЧ діапазонів

Широкосмужові антени верхнього УВЧ (приблизно 300–3000 МГц) та нижнього НВЧ діапазонів (близько 3–30 ГГц) застосовуються у випадках, коли необхідно забезпечити стабільну роботу в широкому інтервалі частот без переналаштування. Їх основна особливість полягає в здатності зберігати відносно сталий коефіцієнт стоячої хвилі, вхідний опір та форму діаграми спрямованості в межах робочої смуги.

Для верхнього УВЧ діапазону характерними є помірні геометричні розміри антен, що ще дозволяє використовувати як провідникові конструкції (логарифмічно-періодичні, біконічні, дисконусні), так і друковані варіанти. У цьому діапазоні вже помітно зменшуються габарити випромінювачів порівняно з

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

метровими хвилями, проте вплив навколишніх об'єктів на характеристики антени залишається суттєвим. Коефіцієнт підсилення зазвичай знаходиться в межах 3–10 дБ залежно від типу конструкції, а діаграма спрямованості може бути як близькою до всеспрямованої, так і помірно спрямованою.

У нижньому НВЧ діапазоні довжина хвилі зменшується до десятків сантиметрів, що дозволяє реалізовувати більш компактні та технологічні антени, зокрема мікросмужкові та рупорні. Тут важливим параметром стає стабільність випромінювальних характеристик у широкій смузі частот, оскільки навіть незначні зміни геометрії або матеріалів можуть впливати на узгодження. У цьому діапазоні легше досягти більшого коефіцієнта підсилення та вузької діаграми спрямованості при відносно невеликих розмірах.

Для обох діапазонів важливими характеристиками є ширина смуги пропускання, КСХН (коефіцієнт стоячої хвилі за напругою), коефіцієнт підсилення, рівень бокових пелюсток та поляризація. У широкосмугових антенах особливу увагу приділяють забезпеченню стабільного узгодження з фідером у всій робочій смузі. Також важливими є масо-габаритні показники та механічна міцність, особливо для зовнішнього встановлення [22].

Таким чином, широкосмугові антени верхнього УВЧ та нижнього НВЧ діапазонів поєднують у собі достатню компактність, прийнятний коефіцієнт підсилення та можливість роботи в широкому частотному інтервалі, що робить їх універсальними для сучасних систем зв'язку, радіомоніторингу та вимірювальної техніки.

2.3 Порівняльний аналіз антен для широкосмугового пеленгування

Під час вибору антени для широкосмугового пеленгування основну увагу звертають не лише на коефіцієнт підсилення, а передусім на стабільність характеристик у широкій смузі частот, точність визначення напрямку та мінімальний рівень спотворень діаграми спрямованості. Оскільки пеленгування передбачає визначення азимуту джерела випромінювання, антена повинна

					ЖВІ.26.172.019.ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечувати відтворювану та прогнозовану форму діаграми в усьому робочому діапазоні [23].

Логарифмічно-періодичні антени часто застосовуються для ширококутового пеленгування завдяки відносно стабільному вхідному опору та близькій формі діаграми спрямованості в межах великої смуги частот. Їх перевагою є достатнє підсилення і хороша повторюваність параметрів. Недоліком можна вважати порівняно значні габарити при роботі на нижчих частотах та наявність вираженої спрямованості лише в одному напрямку.

Біконічні та дисконусні антени характеризуються дуже широкою смугою частот і рівномірною діаграмою у горизонтальній площині. Вони доцільні для систем кругового огляду, коли потрібно виявити сигнал у будь-якому напрямку. Проте їхній коефіцієнт підсилення зазвичай невисокий, що може знижувати чутливість системи при слабких сигналах.

Петльові антени та рамкові конструкції традиційно використовуються в пеленгаційних системах, особливо при роботі на нижчих частотах. Їх перевага полягає в наявності глибоких мінімумів у діаграмі спрямованості, що дозволяє досить точно визначати напрямок на джерело. Однак у ширококутовому виконанні складно зберегти однакову форму діаграми в усьому діапазоні.

Мікросмужкові та антенні решітки забезпечують компактність і можливість електронного сканування. Для ширококутового пеленгування вони дають високу точність і швидкість визначення координат, особливо в поєднанні з цифровою обробкою сигналів. Разом з тим такі системи складніші конструктивно та потребують точного узгодження елементів.

Таким чином, вибір антени для ширококутового пеленгування є компромісом між шириною робочої смуги, коефіцієнтом підсилення, стабільністю діаграми спрямованості та конструктивною складністю. У практичних системах часто застосовують комбіновані рішення або антенні масиви, що дозволяє підвищити точність і надійність визначення напрямку на джерело випромінювання [24].

					ЖВІ.26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Обґрунтування вибору типу антени для діапазону 2100–6000 МГц

Для роботи в діапазоні 2100–6000 МГц необхідна антена, яка здатна стабільно функціонувати в широкій смузі частот без істотного погіршення узгодження та форми діаграми спрямованості. У цьому інтервалі частот довжина хвилі змінюється приблизно від 14 до 5 см, тому конструкція повинна забезпечувати масштабованість геометричних параметрів і збереження електричних характеристик у всьому діапазоні. З цієї точки зору доцільним є застосування логоперіодичної антени.

Логоперіодична антена має систему вібраторів різної довжини, розташованих за певним законом, при якому їх розміри та відстані між ними змінюються логарифмічно. Завдяки цьому активною в кожний момент є лише частина елементів, що відповідає поточній довжині хвилі. Такий принцип дозволяє отримати практично сталий вхідний опір і відносно незмінну діаграму спрямованості в межах широкої смуги частот. Для діапазону 2100–6000 МГц це є важливою перевагою, оскільки не потрібно застосовувати додаткові узгоджувальні пристрої при переході з однієї частоти на іншу.

Ще однією причиною вибору логоперіодичної антени є достатній коефіцієнт підсилення при помірних габаритах. У зазначеному діапазоні розміри елементів уже не є надто великими, що дозволяє реалізувати компактну конструкцію з прийнятною механічною жорсткістю. Крім того, така антена формує виражену спрямованість у одному напрямку, що зменшує вплив завад і підвищує співвідношення сигнал/шум.

Порівняно з вузькосмуговими антенами, наприклад типу Ягі, логоперіодична конструкція краще підходить для роботи в широкому частотному інтервалі, оскільки її параметри менш чутливі до зміни частоти. У свою чергу, рупорні або мікросмужкові антени можуть потребувати складнішого виготовлення чи мати обмеження щодо ширини смуги [25].

					ЖВІ.26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, для діапазону 2100–6000 МГц вибір логоперіодичної антени є обґрунтованим з точки зору поєднання широкосмуговості, стабільності електричних характеристик, достатнього підсилення та відносної простоти конструкції. Це дозволяє забезпечити надійну роботу системи без суттєвого ускладнення її апаратної частини.

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ АНТЕНИ ДІАПАЗОНУ 2100–6000 МГц

3.1 Основні електричні та конструктивні параметри логоперіодичної антени

Логоперіодична антена належить до широкосмугових антен. Її застосовують у системах зв'язку, радіомоніторингу, телебаченні, вимірвальній техніці [26]. Конструкція забезпечує стабільні характеристики у широкому діапазоні частот [27]. Параметри антени визначають ефективність роботи, узгодження з передавальними лініями та напрямленість випромінювання.

До основних електричних параметрів належать коефіцієнт підсилення, коефіцієнт стоячої хвилі, вхідний опір, робочий діапазон частот та діаграма спрямованості.

Коефіцієнт підсилення показує, у скільки разів антена підсилює сигнал у головному напрямку порівняно з ізотропним випромінювачем. Для логоперіодичних антен цей параметр зазвичай знаходиться в межах 6–10 дБ. Значення залежить від кількості елементів, довжини антени та відстані між елементами.

Робочий діапазон частот визначає межі частот, у яких антена зберігає стабільні характеристики. Логоперіодичні антени працюють у широкій смузі частот. Наприклад, одна антена здатна ефективно працювати в діапазоні від 2100 до 6000 МГц. Це досягається завдяки спеціальному розташуванню елементів різної довжини.

Коефіцієнт стоячої хвилі за напругою показує рівень узгодження антени з фідером. Для якісної роботи значення КСХ повинно бути близьким до одиниці. У більшості практичних конструкцій логоперіодичних антен КСХ не перевищує 2 у всьому робочому діапазоні частот.

					ЖВІ.26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вхідний опір антени характеризує її електричну взаємодію з передавальною лінією. У логоперіодичних антенах цей параметр змінюється незначно в усьому робочому діапазоні. Типове значення становить близько 50 або 75 Ом, що дозволяє підключати стандартні коаксіальні кабелі без складних узгоджувальних пристроїв.

Діаграма спрямованості показує розподіл енергії випромінювання у просторі. Для логоперіодичної антени характерна виражена напрямленість у бік коротших елементів. Основна пелюстка діаграми має вузький кут, що забезпечує приймання сигналу з певного напрямку та зменшує вплив завад [28-32].

Конструктивні параметри антени визначають її геометрію та взаємне розташування елементів. До них належать довжина вібраторів, відстань між ними, коефіцієнт масштабування та кут розкриття антени.

Довжина вібраторів змінюється за логарифмічним законом. Кожний наступний елемент має меншу довжину порівняно з попереднім. Найдовший елемент відповідає нижній робочій частоті, а найкоротший – верхній.

Відстань між сусідніми елементами також змінюється за певною залежністю. Це забезпечує правильну фазову взаємодію між вібраторами та формує необхідну діаграму спрямованості.

Коефіцієнт масштабування визначає співвідношення розмірів сусідніх елементів антени. Його позначають τ . Значення зазвичай знаходиться в межах 0,7–0,9. Чим менше це значення, тим ширший робочий діапазон частот, але довжина антени збільшується.

Кут розкриття антени визначає розташування елементів відносно поздовжньої осі конструкції. Цей параметр впливає на коефіцієнт підсилення та форму діаграми спрямованості. Оптимальний вибір кута дозволяє отримати стабільні електричні характеристики у всьому робочому діапазоні частот [33-38].

Правильний вибір електричних і конструктивних параметрів забезпечує ефективну роботу логоперіодичної антени. Узгодження цих параметрів дозволяє отримати широкий частотний діапазон, стабільне підсилення сигналу та надійне приймання радіохвиль.

					ЖВІ.26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Орієнтовний розрахунок геометричних розмірів логоперіодичної антени

Розрахунок геометричних параметрів ЛПА, що задовольняють заданим електричним характеристикам, може бути вирішена наближено [30].

Наприклад, необхідно сконструювати антену, яка має певні значення: коефіцієнта укорочення вібратора ξ , середнього входного опору R_0 і коефіцієнта направленої дії D_t в заданому діапазоні хвиль $\lambda_{\max} \dots \lambda_{\min}$.

В даному випадку порядок розрахунку може бути наступним:

1. З конструктивних міркувань вибирається спосіб укорочення і діаметри провідників вібраторів.

2. Добротність одиночного вібратора Q в момент першого резонансу може бути визначена або шляхом розрахунку, або експериментально.

3. Параметри розподільного фідера визначаються, орієнтуючись на задане значення R_0 , за формулою:

$$Z_0 \cong 1,4R_0. \quad (3.1)$$

4. За формулою:

$$\tau = 1 + Q/123 - (0,6 + 0,002 \cdot Z_0) / D_t, \quad (3.2)$$

визначається необхідне значення коефіцієнта періодичності τ .

5. За формулою:

$$L = [\sigma(1 - 0,76\lambda_{\min} / \lambda_{\max}) / (1 - \tau)] \cdot \lambda_{\max}, \quad (3.3)$$

знаходиться повздовжній розмір ЛПА L , задаючись малим значення коефіцієнта τ , близьким до мінімально допустимого (наприклад, $\sigma=0,05$).

6. Число вібраторів в ЛПА дорівнює цілому значенню числа

$$N \cong 1 + (\lg \frac{h_{max}}{h_{min}}) / \lg \frac{1}{\tau}, \text{ де } h_{max} = 0,25 \cdot \lambda_{max} / \xi; \quad (3.4)$$

$$h_{min} \leq 0,19 \cdot \lambda_{min} / \xi. \quad (3.5)$$

7. Розмір плеча кожного вібратора

$$h_n = \left(\frac{\lambda_{max}}{4 \cdot \xi} \right) \cdot \tau^{(n-1)}, \text{ де } n = 1, 2, \dots, N. \quad (3.6)$$

8. Відстань між сусідніми вібраторами

$$R_n - R_{n+1} = d_n = (\sigma \cdot \lambda_{max}) \cdot \tau^{(n-1)}, \text{ де } n = 1, 2, \dots, (N-1). \quad (3.7)$$

9. Уточнений повздовжній розмір:

$$L = \sum_{n=1}^{N-1} d_n. \quad (3.8)$$

Запропоновані формули можуть бути використані для орієнтованого розрахунку ЛПА.

3.3 Розрахунок широкосмугових антен верхнього УВЧ та нижнього НВЧ діапазонів

За наведеною методикою в пункті 3.2 [30] проводиться розрахунок параметрів антени.

Вхідні дані:

$$\xi = 0,95,$$

$$a = 2,5 \text{ [мм]},$$

$$f_{\max} = 6000 \text{ [МГц]},$$

$$f_{\min} = 2100 \text{ [МГц]},$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ [м/с]},$$

$$Q = 11,$$

$$D_t = 3 \text{ [дБ]} = 1,99 \text{ [раз]},$$

$$R_0 = 50 \text{ [Ом]},$$

Розрахунок діапазон хвиль антени $\lambda_{\max}$ і $\lambda_{\min}$:

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{f_{\min}} = 0,143 \text{ [м]},$$

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}} = 0,05 \text{ [м]},$$

Опір розподільного фідера визначається за формулою:

$$Z_0 = 1,4 \cdot 50 = 70 \text{ [Ом]}.$$

Необхідне значення коефіцієнта періодичності τ складає:

$$\tau = 1 + 11/123 - (0,6 + 0,002 \cdot 70)/1,99 = 0,718.$$

Повздовжній розмір ЛПА дорівнює:

$$L = [0,181(1 - 0,76 \cdot 0,05 / 0,143) / (1 - 0,718)] \cdot 0,143 = 0,067 \text{ [м]}.$$

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Число вібраторів в ЛПА дорівнює:

$$h_{\max} = 0,25 \cdot 0,143 / 0,95 = 0,038 [м],$$

$$h_{\min} \leq 0,19 \cdot 0,05 / 0,95 = 0,01 [м],$$

$$N = 1 + \left(\lg \frac{0,038}{0,01} \right) / \lg \frac{1}{0,718} = 5,023 \approx 5.$$

Розмір плеча кожного вібратора :

$$h_1 = \frac{0,143}{4 \cdot 0,95} \cdot 0,718^0 = 0,197 [м],$$

$$h_2 = \frac{0,143}{4 \cdot 0,95} \cdot 0,718^1 = 0,141 [м],$$

$$h_3 = \frac{0,143}{4 \cdot 0,95} \cdot 0,718^2 = 0,101 [м],$$

$$h_4 = \frac{0,143}{4 \cdot 0,95} \cdot 0,718^3 = 0,073 [м],$$

$$h_5 = \frac{0,143}{4 \cdot 0,95} \cdot 0,718^4 = 0,052 [м].$$

Оптимальне значення параметра σ буде:

$$\sigma_{opt} = 0,25[1 - 2,5(1 - \tau)] = 0,181.$$

Відстані між сусідніми вібраторами рівні:

$$d_1 = (0,181 \cdot 0,143) \cdot 0,895^0 = 0,026 [м],$$

$$d_2 = (0,181 \cdot 0,143) \cdot 0,895^1 = 0,023 [м],$$

$$d_3 = (0,181 \cdot 0,143) \cdot 0,895^2 = 0,021 [м],$$

$$d_4 = (0,181 \cdot 0,143) \cdot 0,895^3 = 0,018 [м].$$

Уточнений повздовжній розмір дорівнює:

$$L = \sum_{n=1}^{N-1} 0,026 + 0,023 + 0,021 + 0,018 = 0,088 \text{ [м]}$$

З отриманих розрахунків видно, що кількість елементів антени $N = 5$, загальна довжина антени $l = 0,088 \text{ [м]}$, менша ніж при розрахунку за першою методикою.

На основі цих розрахунків буде проведено моделювання логоперіодичної антени в смузі частот (2100-6000) МГц.

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ АНТЕНИ В ПРОГРАМНОМУ СЕРИДОВИЩІ ММАНА

На основі раніше визначених геометричних параметрів елементів виконано побудову моделі антени та отримано її зовнішній вигляд, який наведено на рисунку 4.1. Використання цих розмірів дає змогу перейти від теоретичного розрахунку до практичного аналізу характеристик антени.

Для оцінки роботи антени проведено розрахунок її параметрів на трьох характерних частотах. Такий підхід дозволяє визначити, у якій частині діапазону антена працює найефективніше та як змінюються її характеристики залежно від частоти.

На резонансній частоті $f_{\text{рез}} = 4050$ МГц отримано значення коефіцієнта стоячої хвилі $KСХ = 2,18$. Це свідчить про погіршення узгодження на даній частоті. При цьому коефіцієнт підсилення становить $G_a = 0,71$ дБ, що відповідає приблизно 1 разів. Отже, на резонансній частоті антена забезпечує високий рівень підсилення, але має проблеми з узгодженням.

На частоті $f_2 = 6000$ МГц форма діаграми спрямованості є більш широкою. Це важливо для задач радіомоніторингу, оскільки ширша діаграма дозволяє охоплювати більший сектор простору без необхідності точного наведення антени. Таким чином, робота антени в цій частині діапазону є більш придатною для практичного використання.

Детальний розрахунок параметрів у діапазоні 2100–6000 МГц з кроком 50 МГц наведено в таблиці 4.1. Отримані результати дозволяють проаналізувати поведінку основних характеристик антени у всьому робочому діапазоні.

Аналіз показує, що вхідний опір антени $Z_a = R + jX$ змінюється в широких межах. Мінімальне значення спостерігається на частоті 2450 МГц і становить 19,69 – 60,53 Ом. Максимальне значення досягається на частоті 2250 МГц і дорівнює 210,1 + 58,81 Ом. Така зміна свідчить про нерівномірне узгодження антени в різних частинах діапазону.

					ЖВІ.26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт стоячої хвилі також значно змінюється. Найменше значення КСХ = 1,44 зафіксовано на частоті 5400 МГц, що відповідає хорошему узгодженню. Найбільше значення КСХ = 119 спостерігається на частоті 6000 МГц, що вказує на значні втрати через відбиття.

Коефіцієнт підсилення G_a змінюється від -1,29 дБ на частоті 3950 МГц до 17,58 дБ на частоті 6000 МГц. Це означає, що антена не забезпечує стабільно достатній рівень підсилення в більшій частині діапазону.

Співвідношення вперед/назад F/B характеризує направленість антени. Найгірше значення -22,26 дБ спостерігається на частоті 2900 МГц, що вказує на значне випромінювання у зворотному напрямку. Найкраще значення -0,38 дБ досягається на частоті 3800 МГц, де антена працює найбільш спрямовано.

Таблиця 4.1– Зведена таблиця параметрів у діапазоні (2100–6000 МГц)

No.	F (МГц)	R (Ом)	χ (Ом)	КСВ 50	Gh (dBd)	Ga (dBi)	F/B (dB)	Elev(р)	Земля	Высота	Поляр.
69	6000.0	0.5109	-23.31	119	15.43	17.58	-0.6	---	Своб.	---	верт.
68	5450.0	124.1	47.9	2.91	1.8	3.95	-2.49	67.6	Своб.	---	верт.
67	5400.0	36.33	7.81	1.44	-0.26	1.89	-9.36	76.9	Своб.	---	верт.
66	5350.0	23.41	-5.918	2.17	0.44	2.59	-10.86	76.2	Своб.	---	верт.
65	5300.0	18.05	-12.72	2.97	1.11	3.26	-8.92	75.9	Своб.	---	верт.
64	5250.0	15.02	-17.39	3.77	1.65	3.8	-7.46	90.0	Своб.	---	верт.
63	5200.0	13.15	-21.22	4.53	2.04	4.19	-6.57	25.9	Своб.	---	верт.
62	5150.0	11.94	-24.78	5.26	2.4	4.55	-6.09	25.9	Своб.	---	верт.
61	5100.0	11.26	-28.38	5.93	2.76	4.91	-5.92	49.0	Своб.	---	верт.
60	5050.0	11.1	-32.15	6.43	3.18	5.33	-6.07	49.0	Своб.	---	верт.
59	5000.0	11.38	-36.26	6.78	3.48	5.63	-6.33	49.0	Своб.	---	верт.
58	4950.0	11.96	-41.07	7.1	3.65	5.8	-6.6	49.0	Своб.	---	верт.
57	4900.0	12.8	-47.57	7.56	3.86	6.01	-6.96	49.0	Своб.	---	верт.
56	4850.0	15.31	-58.07	7.85	4.19	6.34	-7.85	48.0	Своб.	---	верт.
55	4800.0	23.44	-75.44	7.32	3.91	6.06	-9.12	34.0	Своб.	---	верт.
54	4750.0	54.78	-106.9	6.01	3.06	5.21	-9.65	30.0	Своб.	---	верт.
53	4700.0	189.8	-69.93	4.34	1.68	3.83	-7.1	27.0	Своб.	---	верт.
52	4650.0	89.06	69.17	3.09	0.26	2.41	-3.27	25.0	Своб.	---	верт.
51	4600.0	33.89	39.02	2.68	0.87	3.02	-2.12	23.0	Своб.	---	верт.
50	4550.0	20.07	19.19	2.92	1.31	3.46	-1.5	22.0	Своб.	---	верт.
49	4500.0	14.85	7.267	3.45	1.63	3.78	-1.15	21.0	Своб.	---	верт.
48	4450.0	12.42	-0.9354	4.03	2.03	4.18	-1.14	21.0	Своб.	---	верт.
47	4400.0	11.24	-7.304	4.55	2.38	4.53	-1.24	21.0	Своб.	---	верт.
46	4350.0	10.84	-12.76	4.93	2.55	4.7	-1.32	24.0	Своб.	---	верт.
45	4300.0	11.13	-17.8	5.09	2.5	4.65	-1.36	29.0	Своб.	---	верт.
44	4250.0	12.23	-22.72	4.98	2.18	4.33	-1.32	31.0	Своб.	---	верт.
43	4200.0	14.44	-27.68	4.59	1.69	3.84	-1.33	30.0	Своб.	---	верт.
42	4150.0	18.61	-32.71	3.96	1.03	3.18	-1.46	---	Своб.	---	верт.
41	4100.0	26.48	-36.54	3.1	-0.02	2.13	-1.58	---	Своб.	---	верт.
40	4050.0	38.39	-33.08	2.18	-1.44	0.71	-1.81	1.0	Своб.	---	верт.
39	4000.0	41.35	-18.65	1.57	-2.85	-0.7	-2.04	72.0	Своб.	---	верт.
38	3950.0	30.44	-11.39	1.77	-3.44	-1.29	-1.74	71.0	Своб.	---	верт.
37	3900.0	20.99	-15.3	2.65	-2.69	-0.54	-0.94	9.0	Своб.	---	верт.
36	3850.0	16.49	-23.09	3.74	-1.7	0.45	-0.43	13.0	Своб.	---	верт.
35	3800.0	15.42	-32.13	4.68	-0.85	1.3	-0.38	16.0	Своб.	---	верт.
34	3750.0	17.19	-43.3	5.24	-0.21	1.94	-0.44	19.0	Своб.	---	верт.

Продовження таблиці 4.1

No.	F (МГц)	R (Ом)	Х (Ом)	KCB 50	Gh (dBd)	Ga (dBi)	F/B (dB)	Elev(р)	Земля	Высота	Поляр.
33	3700.0	23.26	-58.2	5.34	0.09	2.24	-0.56	22.0	Своб.	---	верт.
32	3650.0	41.1	-80.73	5.01	0.35	2.5	-0.79	47.7	Своб.	---	верт.
31	3600.0	102.8	-103.3	4.39	0.54	2.69	-1.25	47.2	Своб.	---	верт.
30	3550.0	186.7	11.4	3.75	0.24	2.39	-2.13	47.0	Своб.	---	верт.
29	3500.0	84.91	75.04	3.31	-0.47	1.68	-3.48	47.5	Своб.	---	верт.
28	3450.0	40.07	53.69	3.17	-1.18	0.97	-5.18	87.0	Своб.	---	верт.
27	3400.0	24.75	35.99	3.25	-1.46	0.69	-7.94	88.0	Своб.	---	верт.
26	3350.0	18.54	24.21	3.41	-1.38	0.77	-10.69	88.0	Своб.	---	верт.
25	3300.0	15.39	16.27	3.63	-1.34	0.81	-13.29	49.4	Своб.	---	верт.
24	3250.0	13.43	10.17	3.89	-1.33	0.82	-15.79	48.7	Своб.	---	верт.
23	3200.0	12.23	5.118	4.13	-1.33	0.82	-17.96	47.9	Своб.	---	верт.
22	3150.0	11.62	0.7053	4.3	-1.31	0.84	-19.57	46.8	Своб.	---	верт.
21	3100.0	11.52	-3.281	4.36	-1.41	0.74	-20.75	45.6	Своб.	---	верт.
20	3050.0	11.97	-6.95	4.26	-1.62	0.53	-21.93	44.4	Своб.	---	верт.
19	3000.0	13.09	-10.29	3.99	-1.95	0.2	-23.5	43.3	Своб.	---	верт.
18	2950.0	15.07	-13.01	3.56	-2.35	-0.2	-25.26	42.5	Своб.	---	верт.
17	2900.0	17.91	-14.24	3.05	-2.77	-0.62	-26.26	41.6	Своб.	---	верт.
16	2850.0	20.03	-12.59	2.68	-3.05	-0.9	-25.46	40.3	Своб.	---	верт.
15	2800.0	17.48	-9.93	2.99	-2.8	-0.65	-23.08	88.0	Своб.	---	верт.
14	2750.0	12.29	-11.87	4.31	-1.85	0.3	-20.99	87.0	Своб.	---	верт.
13	2700.0	9.189	-17.49	6.13	-0.63	1.52	-19.48	86.0	Своб.	---	верт.
12	2650.0	8.458	-24.07	7.31	0.05	2.2	-18.73	85.0	Своб.	---	верт.
11	2600.0	9.411	-31.1	7.42	0.0	2.15	-17.53	85.0	Своб.	---	верт.
10	2550.0	11.47	-38.53	7.04	-0.2	1.95	-15.44	86.0	Своб.	---	верт.
9	2500.0	14.43	-47.64	6.75	-0.36	1.79	-13.2	85.0	Своб.	---	верт.
8	2450.0	19.69	-60.53	6.5	0.28	2.43	-10.78	85.0	Своб.	---	гориз.
7	2400.0	31.73	-80.33	6.11	0.74	2.89	-8.39	85.0	Своб.	---	гориз.
6	2350.0	66.06	-109.8	5.55	0.83	2.98	-6.9	86.0	Своб.	---	гориз.
5	2300.0	170.0	-111.8	4.96	0.61	2.76	-5.67	66.9	Своб.	---	гориз.
4	2250.0	210.1	58.81	4.55	0.12	2.27	-4.52	64.5	Своб.	---	гориз.
3	2200.0	95.01	102.3	4.4	-0.61	1.54	-3.32	62.3	Своб.	---	гориз.
2	2150.0	45.35	78.74	4.52	-1.57	0.58	-1.99	60.3	Своб.	---	гориз.
1	2100.0	26.05	58.15	4.83	-2.7	-0.55	-0.46	58.3	Своб.	---	верт.

Геометричні розміри антени визначено відповідно до методики, наведеної в пункті 3.2. Початкова геометрія представлена на рисунку 4.1.

No.	X1(m)	Y1(m)	Z1(m)	X2(m)	Y2(m)	Z2(m)	R(mm)	Seg.
1	0.0	0.1	-0.0025	0.0	0.0	-0.0025	7.5	-1
2	0.0	0.0	-0.0025	0.0	0.0	0.0025	7.5	-1
3	0.0	0.1	0.0025	0.0	0.0	0.0025	7.5	-1
4	0.0	0.1	0.0025	0.0	0.1	-0.0025	7.5	-1
5	0.0	0.0	-0.0025	-0.197	0.0	0.0	0.8	-1
6	0.197	0.0	0.0025	0.0	0.0	0.0025	0.8	-1
7	0.0	0.026	-0.0025	-0.141	0.026	0.0	0.8	-1
8	0.141	0.026	0.0025	0.0	0.026	0.0025	0.8	-1
9	0.0	0.049	-0.0025	-0.101	0.049	0.0	0.8	-1
10	0.101	0.049	0.0025	0.0	0.049	0.0025	0.8	-1
11	0.0	0.07	-0.0025	-0.073	0.07	0.0	0.8	-1
12	0.073	0.07	0.0025	0.0	0.07	0.0025	0.8	-1
13	0.0	0.088	-0.0025	-0.052	0.088	0.0	0.8	-1
14	0.052	0.088	0.0025	0.0	0.088	0.0025	0.8	-1

Рисунок 4.1 – Початкова геометрія антени

З урахуванням розрахованої кількості елементів побудовано модель антени, яка наведена в Додатку Б.

Подальший етап роботи включає моделювання антени з використанням програмного забезпечення. Аналіз виконано для трьох частот: 2100 МГц, 4050 МГц та 6000 МГц. Це дозволяє порівняти результати розрахунку та моделювання.

При $f_1 = 2100$ МГц діаграма спрямованості буде має вид (рисунок 4.2).

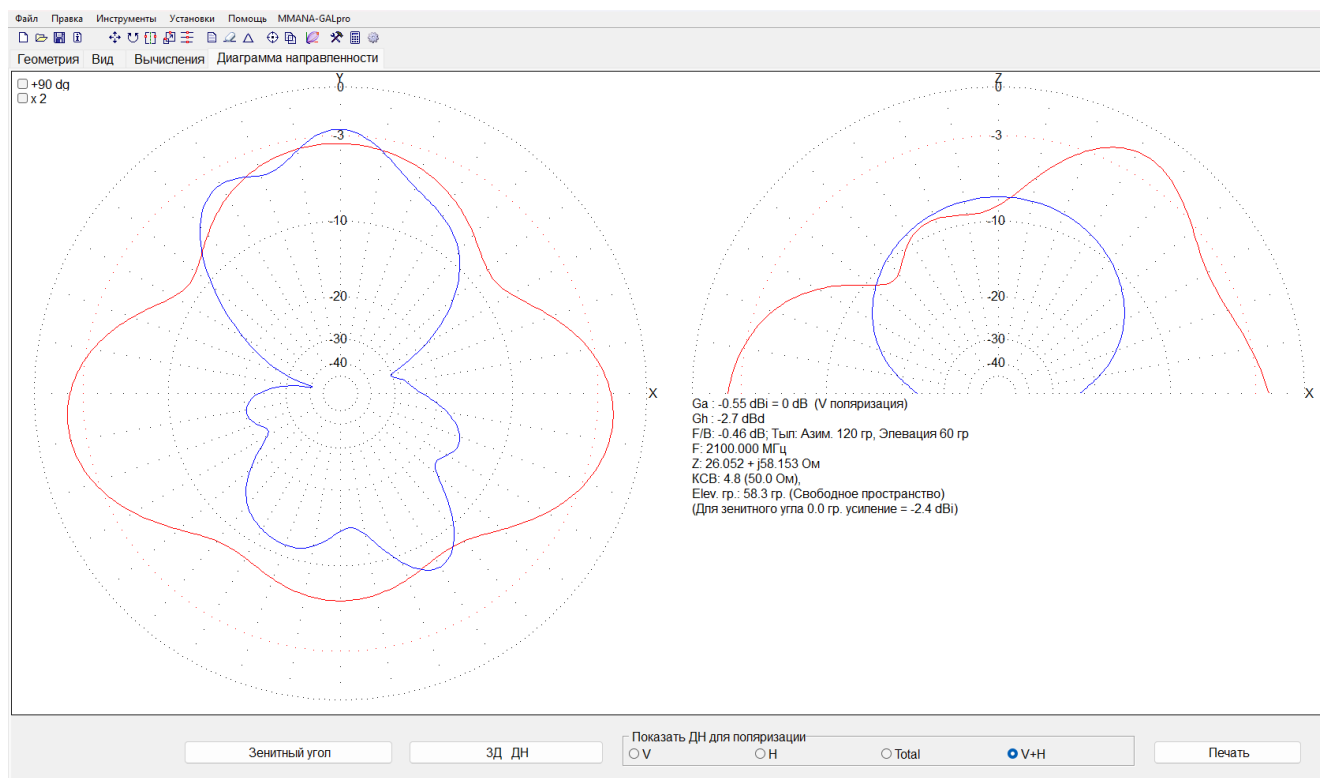


Рисунок 4.2 – ДС при умові ідеальної землі

На частоті 2100 МГц коефіцієнт стоячої хвилі становить 3 рази. Коефіцієнт підсилення дорівнює -0,55 дБ, або 1 разів. Співвідношення вперед/назад становить -0,46 дБ, що відповідає 0,9 разів. Діаграма спрямованості має помірно виражений основний пелюсток. Вид ДС в 3Д на частоті 2100 МГц (рисунок 4.3).

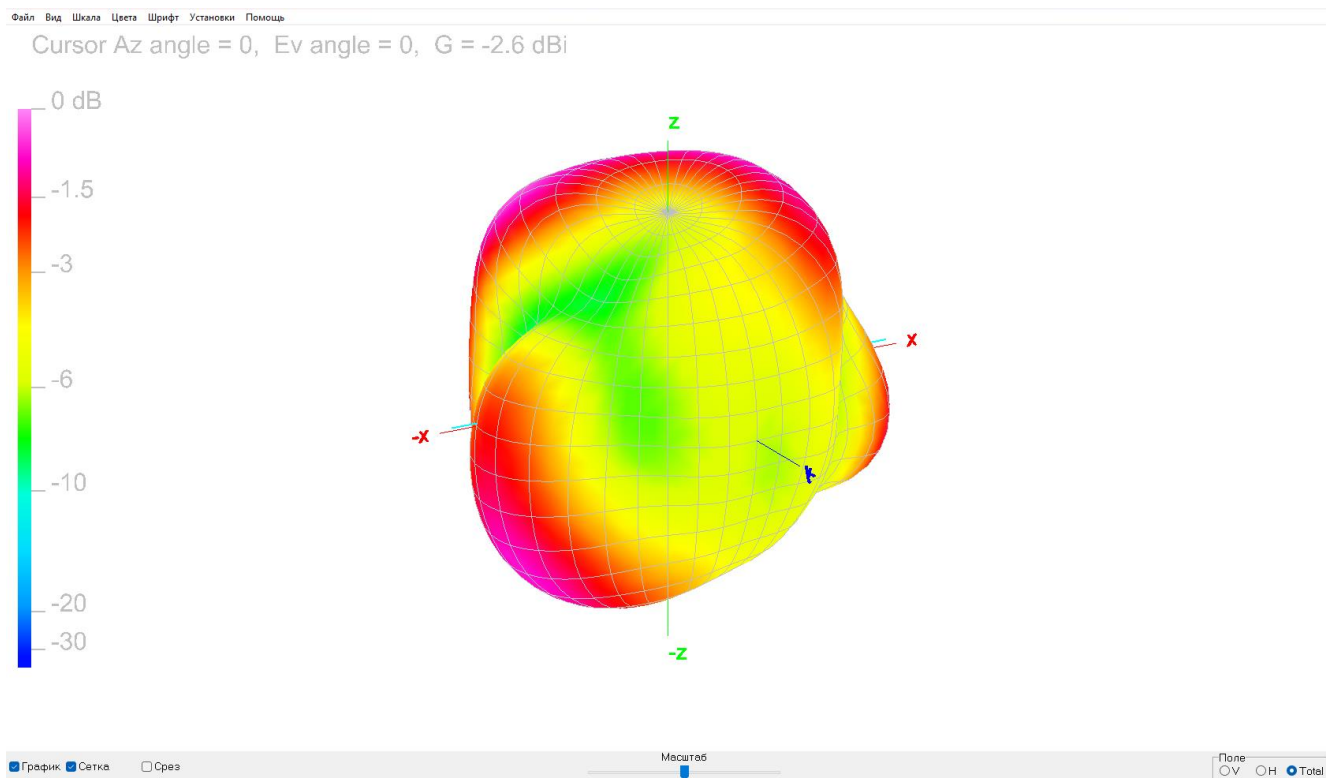


Рисунок 4.3 – ДС в вигляді 3Д

При $f_2 = 6000$ МГц ДС буде мати вид (рисунок 4.4).

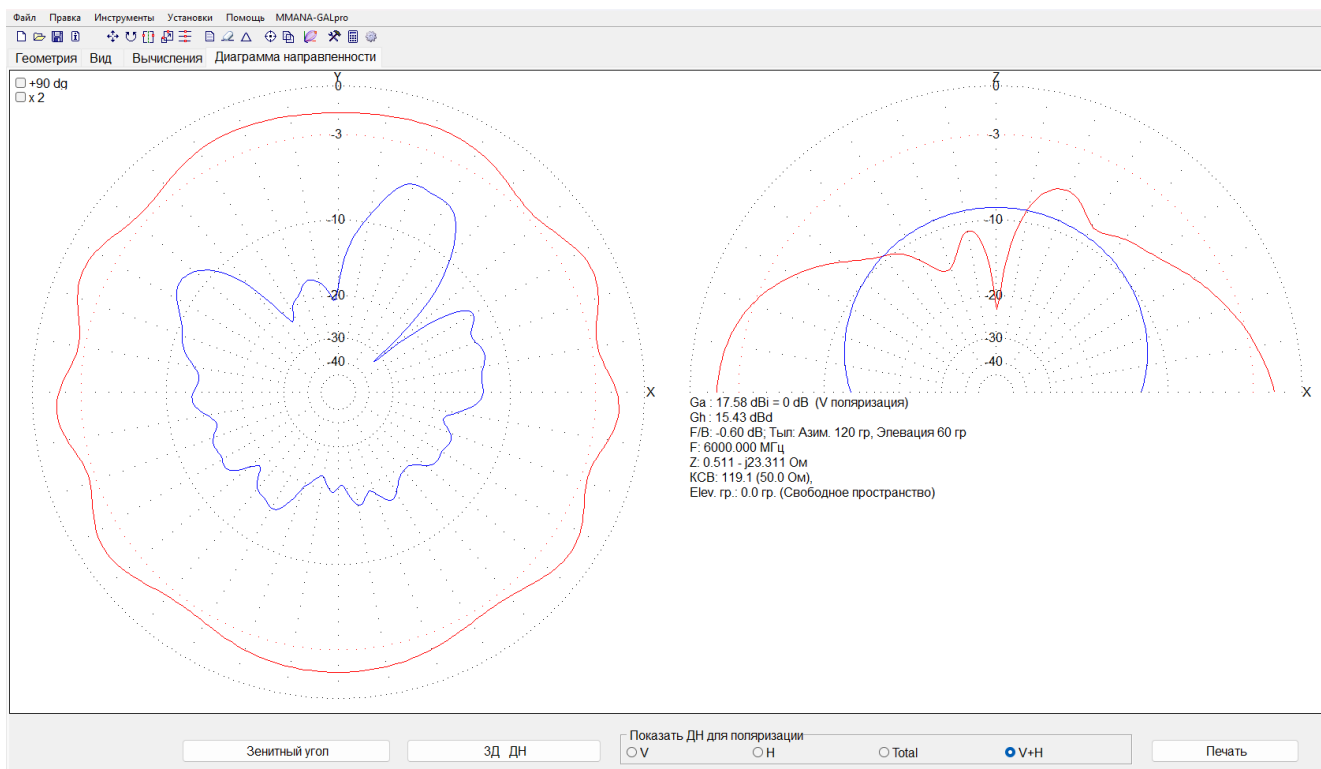


Рисунок 4.4 –ДС при умові ідеальної землі

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЖВІ.26. 172. 019. ПЗ

Арк.

43

На частоті 6000 МГц коефіцієнт стоячої хвилі збільшується до 10^{12} разів. Коефіцієнт підсилення становить 17,58 дБ, або 57,3 разів. Співвідношення вперед/назад дорівнює -0,6 дБ, або 0,9 разів. Діаграма спрямованості стає ширшою, що підвищує ефективність використання антени для огляду простору. Вид ДС в 3Д на частоті 6000 МГц (рисунок 4.5).

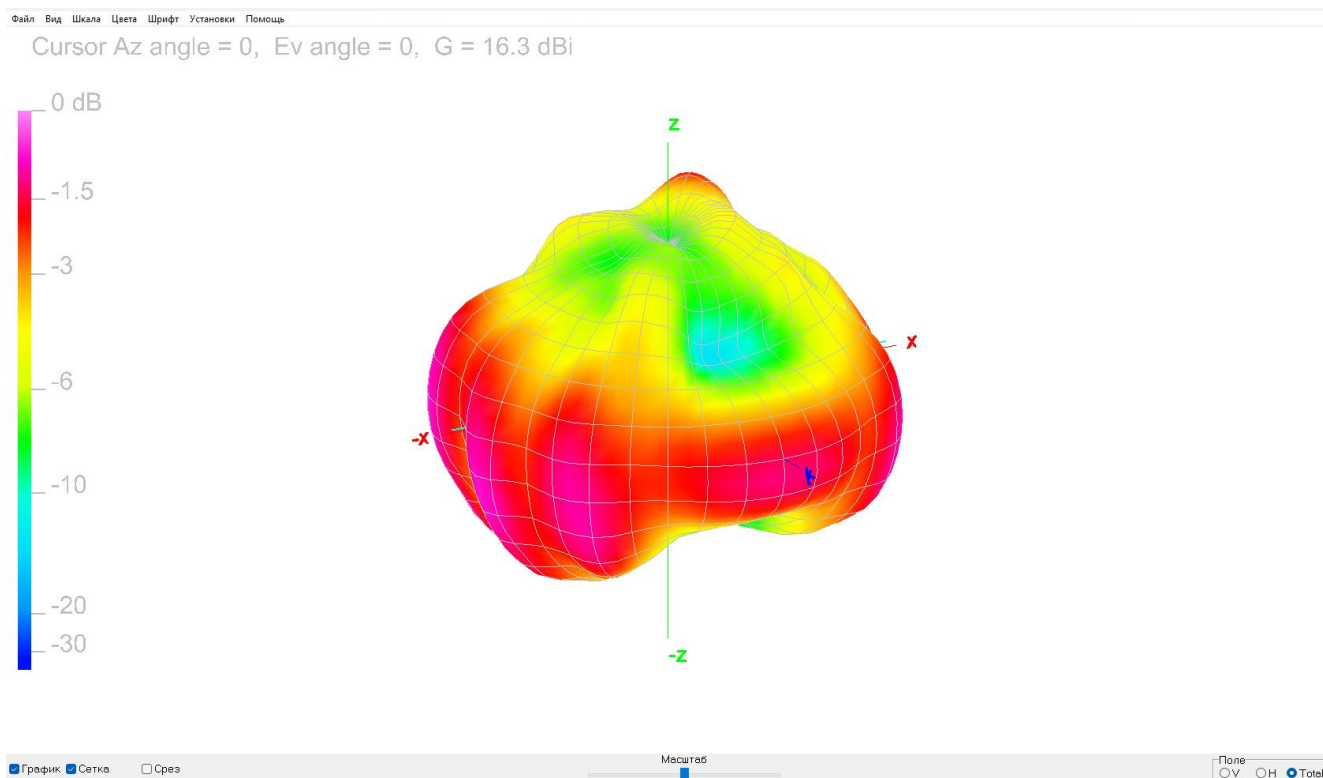


Рисунок 4.5 – ДС у вигляді 3Д

При $f_{рез} = 4050$ МГц ДС (рисунок 4.6).

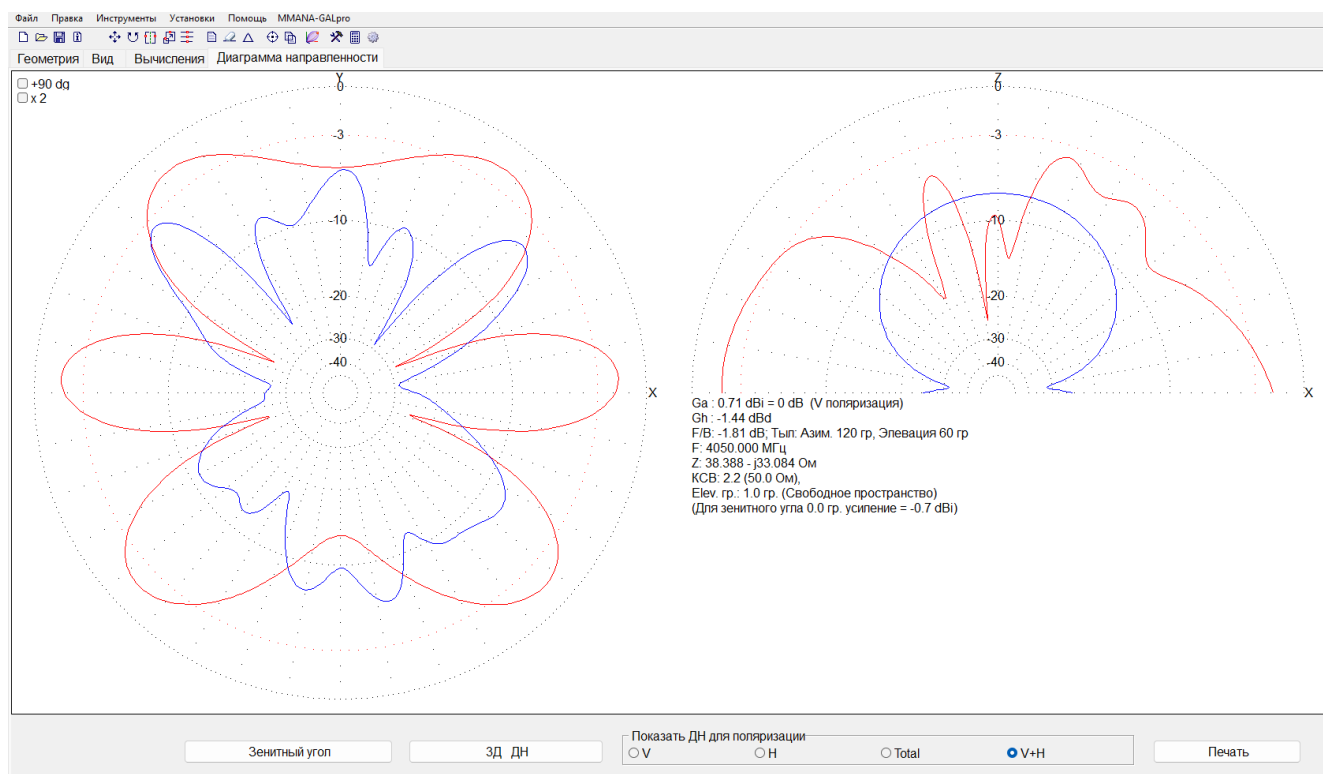


Рисунок 4.6 – ДС при умові ідеальної землі

На резонансній частоті 4050 МГц коефіцієнт стоячої хвилі становить 1,6 разів. Коефіцієнт підсилення дорівнює 0,71 дБ, або 1 разів. Співвідношення вперед/назад становить -1,81 дБ, або 0,7 разів. У цьому режимі антена демонструє збалансовані характеристики. Вид ДС в 3Д на частоті 4050 МГц (рисунок 4.7)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЖВІ.26.172.019.ПЗ

Арк.

45

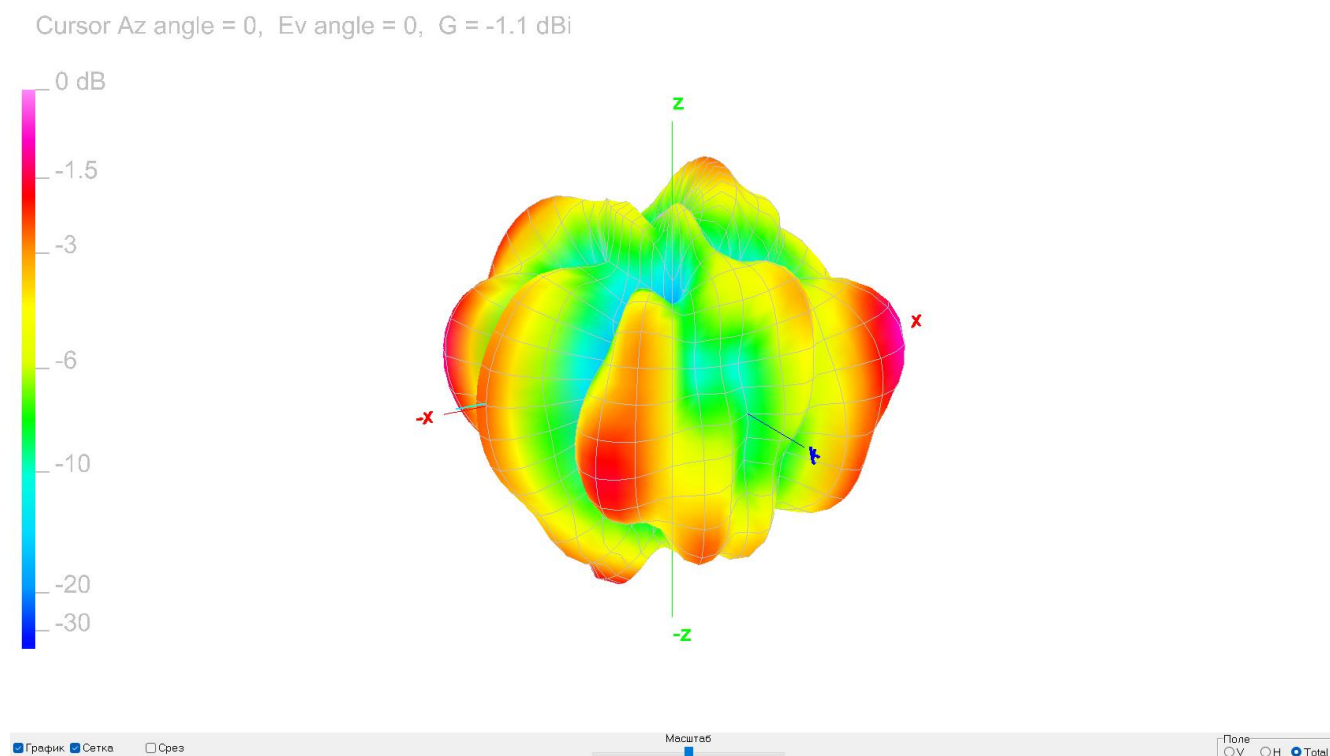


Рисунок 4.7 – ДС у вигляді 3Д

Дана методика дозволяє зменшити габаритні розміри антени при збереженні основних електричних характеристик. Це робить її більш придатною для практичного застосування.

Отримані результати доцільно використати для створення програмного засобу автоматизованого розрахунку геометричних параметрів логоперіодичних антен. Це дозволить прискорити процес проєктування та підвищити точність розрахунків.

ВИСНОВКИ

У роботі виконано повний цикл розробки логоперіодичної антени для пеленгаторних систем у діапазоні частот 2100–6000 МГц. Обрано тип антени, який забезпечує стабільні характеристики у широкому діапазоні та відповідає вимогам сучасних радіотехнічних систем.

Проведено аналіз принципів радіопеленгування та антен, що застосовуються в таких системах. Визначено ключові параметри антени: коефіцієнт направленої дії не менше 10 дБ, вхідний опір 50 Ом, допустимий рівень коефіцієнта стоячої хвилі та необхідне співвідношення переднього і заднього випромінювання. Ці вимоги враховано під час подальших розрахунків.

Виконано розрахунок геометричних параметрів антени. Визначено кількість вібраторів, їх довжини та відстані між ними. Обрано коефіцієнти масштабування та рознесення, що забезпечують роботу антени у всьому заданому діапазоні частот. Отримані параметри дають змогу забезпечити узгодження з фідером та стабільний вхідний опір.

Оцінено вплив коефіцієнта укорочення вібраторів на резонансні властивості антени. Враховано взаємний вплив елементів, що дозволило підвищити точність розрахунку та наблизити його до реальних умов роботи.

Проведено моделювання антени у програмному середовищі MMANA. За результатами моделювання отримано частотні характеристики, діаграми направленості та значення вхідного опору. Результати підтвердили відповідність розрахованих параметрів заданим вимогам. Забезпечено роботу антени в усьому діапазоні частот із необхідним рівнем направленості та узгодження.

Порівняння розрахункових і модельних даних показало їх узгодженість. Це підтверджує правильність обраної методики розрахунку та ефективність застосованих підходів.

Розроблена антена має практичну цінність. Її можна використовувати у системах радіопеленгування, моніторингу спектра, бездротового зв'язку та

					ЖВІ.26.172.019.ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інших радіотехнічних пристроях. Отримані результати можна застосовувати для подальшого вдосконалення конструкції та оптимізації антен під конкретні умови експлуатації.

Виконана робота дає готову основу для виготовлення антени та її впровадження у реальні системи.

					ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. NextGen Implementation Plan [Електронний ресурс] : NextGen Implementation Plan 2013 : FAA NextGen implementation plan 2013 / Federal Aviation Administration. — Washington, DC : FAA, 2013. — 90 с. — Режим доступу:

https://web.archive.org/web/20131023032013/http://www.faa.gov/nextgen/implementation/media/NextGen_Implementation_Plan_2013.pdf. (дата звернення: 24.01.2026).

2. Battle of Britain 1940 – Document 12 [Електронний ресурс] / Battle of Britain 1940 — ... —
<https://web.archive.org/web/20181010061042/http://www.battleofbritain1940.net/document-12.html> (дата звернення: 24.01.2026).

3. E. Tserne, C. Zhyla, A. Popov, Ye. Volkov, S. Shevchuk, O. Hrybskyi, D. Vlasenko, V. Kosharskyi, D. Kovalchuk. Combining measurements in the airborne direction finder as part of the uav autonomous navigation system, 2024. doi: 10.26906/SUNZ.2024.4.011.

4. M. Bondarenko and V.I. Slyusar. (August 2011). "Influence of jitter in ADC on precision of direction-finding by digital antenna arrays" (PDF). Radioelectronics and Communications Systems. 54 (8): 436–445. Bibcode:2011RCSys..54..436B. doi:10.3103/S0735272711080061. S2CID 110506568.

5. Demmel, F. Practical Aspects of Design and Application of Direction-Finding Systems. In Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2009; pp. 53–92.
<https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B9780123745248000088?via%3Dihub>.

6. Chen, Z.; Zhang, Y. Monostatic Multi-Source Direction Finding Based on I/Q Radio Frequency Data. AEU—Int. J. Electron. Commun. 2018, 97, 137–148.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1434841118311774?via%3Dihub>.

					ЖБІ.26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. Gao, H.; Chen, M.; Du, Y.; Jakobsson, A. Monostatic MIMO Radar Direction Finding in Impulse Noise. Digit. Signal Process. 2021,117, 103198. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1051200421002372?via%3Dihub>.

8. Serge Stroobandt, Michael McCue, Log Periodic Antenna Design Calculator, Available at: <https://hamwaves.com/lpda/en/lpda.a4.pdf>.

9. Hucheng Sun; Yong-xin Guo; Miao He; Zheng Zhong "Design of a High-Efficiency 2.45-GHz Rectenna for Low-Input-Power Energy Harvesting" in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6262453>.

10. S. B. Alam, M. S. Ullah and S. Moury, "Design of a low power 2.45 GHz RF energy harvesting circuit for rectenna," 2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV), Dhaka, pp. 1-4, 2013. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6572628>.

11. Martian, A.; Paleacu, C.; Marcu, I.M.; Vladeanu, C. Direction-Finding for Unmanned Aerial Vehicles Using Radio Frequency Methods. Measurement 2024, 235, 114883. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224124007681?via%3Dihub>.

12. Eduard Tserne, Anatoliy Popov, Oleksandr Pidlisnyi, Danyil Kovalchuk, Oleksandr Sereda. Four-antenna amplitude direction finder: statistical synthesis and experimental research of signal processing algorithm. Radioelectronic and Computer System, 2023, no. 4(108). <https://nti.khai.edu/ojs/index.php/reks/article/view/reks.2023.4.08/2182>.

13. J. Tissier and M. Latrach, "Broadband rectenna for ambient RF energy harvesting applications," 2017 IInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), Montreal, QC, pp. 1-3, 2017. [https://www.ursi.org/proceedings/procGA17/papers/Paper_DBC30-1\(2618\).pdf](https://www.ursi.org/proceedings/procGA17/papers/Paper_DBC30-1(2618).pdf).

14. Yan, E.; Zhang, L.; Dong, M.; Lin, Z.; Xie, L.; Tian, Z.; Sun, X.; Cao, Y. Improving Accuracy of an Amplitude Comparison-Based Direction-Finding System by

Neural Network Optimization. IEEE Access 2020,8, 169688–169700.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9195881>.

15. FCC. FCC First Report and Order on Ultra-Wideband Technology. Available online:
https://transition.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/Orders/2002/fcc02048.pdf
(accessed on 25 June 2021).

16. Cook, H.A.; Kahn, M.T.E.; Balyan, V. Radio Direction-Finding Techniques for an Unmanned Aerial Vehicle. In Micro-Electronics and Telecommunication Engineering; Lecture Notes in Networks and Systems; Sharma, D.K., Balas, V.E., Son, L.H., Sharma, R., Cengiz, K., Eds.; Springer: Singapore, 2020; Volume 106.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-2329-8_1.

17. P. Nintanavongsa, U. Muncuk, D. R. Lewis and K. R. Chowdhury, “Design Optimization and Implementation for RF Energy Harvesting Circuits,” in IEEE Journal On Emerging And Selected Topics In Circuits And Systems, vol. 2, no. 1, March 2012.
https://www.researchgate.net/publication/260619140_Design_Optimization_and_Implementation_for_RF_Energy_Harvesting_Circuits.

18. Лінії радіозв’язку та антенні пристрої. Навчальний посібник / [М.Д. ЛЬІНОВ, Т.Г. Гурський, І.В. Борисов, К.М. Гриценко]. – К.: BITI, 2018. – 250 с.
<https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2023/05/%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%96%D0%BB%D1%96%D0%BD%D1%96%D1%97.pdf>.

19. Bakhvalov, V.; Zhyrov, G.; Khrashchevsky, R.; Romanenko, E.; Druzhynin, V. Phase Direction Finding Radio Engineering System. In Proceedings of the 2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD), Kyiv, Ukraine, 21–23 September 2021; IEEE: New York, NY, USA, 2021; pp. 200–203. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9615434>.

20. Polikarovskiykh, O.; Hula, I. Implementing the Search Algorithm of the Correlation Interferometer Direction Finder through the GNU Radio Software

Platform. Secur. Infocommunication Syst. Internet Things 2023,1, 02006.
<https://journals.chnu.edu.ua/sisiot/article/view/376>.

21. Johnson R. C. Antenna engineering handbook [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://seklad69associates.com/seklad69associates.com/EEG_808_and_815_files/Antenna%20Engineering%20Handbook.pdf (дата звернення: 20.03.2026).

22. Keyur K. Mistry, Pavlos I. Lazaridis, Zaharias D. Zaharis and Tian Hong Loh. Design and Optimization of Compact Printed Log-Periodic Dipole Array Antennas with Extended Low-Frequency Response. Electronics 2021, 10(17), 2044; <https://doi.org/10.3390/electronics10172044>.

23. Пристрої надвисоких частот та антени: навч. посіб. / Л. Я. Ільницький, Л. В. Сібрук, О. А. Щербина. — К. : НАУ, 2013. — 188 с. https://kafelec.nau.edu.ua/Materialu/Ultrahigh-frequency_and_antenna_devices_training_text.pdf.

24. Li, G., Zhang, F., & Wang, B. (2024). Compact VHF/UHF Ultrawideband Discone Antenna with Consistent Pattern. Sensors, 24(18), 6147. <https://doi.org/10.3390/s24186147>.

25. Навчальний посібник до виконання лабораторних робіт бакалаврів з дисципліни «Антени» по освітній програмі «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія» за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка / Укл. О. М. Купрій, С. Є. Мартинюк, С. М. Літвінцев. — К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. — 42 с. Видання 5-е, перероблене. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/240516cf-efce-4453-8045-3f2281c65d5d/content>.

26. Zaharis, Z.D.; Skeberis, C.; Xenos, T.D.; Lazaridis, P.I.; Stratakis, D.I. IWO-based synthesis of log-periodic dipole array. In Proceedings of the 2014 International Conference on Telecommunications and Multimedia (TEMU), Heraklion, Greece, 28–30 July 2014; pp. 150–154. [[Google Scholar](#)]

					ЖБІ.26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

27. Song, Q.; Shen, Z.; Lu, J. Log-periodic monopole array with uniform spacing and uniform height. *IEEE Trans. Antennas Propag.* **2018**, 66, 4687–4694. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

28. Andrea, N. Improvements of Antennas, Particularly Log-Periodic Antennas. Patent EP2549587B1, 24 July 2013. [[Google Scholar](#)]

29. Garg R., Bhartia P., Bahl I., Ittipiboon A. Microstrip Antenna Design Handbook. Boston: Artech House, 2019. 846 p. <https://uodiyala.edu.iq/uploads/PDF%20ELIBRARY%20UODIYALA/EL37/Microstri%20Antenna%20Design%20Handbook.pdf>.

30. Zaharis, Z.; Gravas, I.; Lazaridis, P.; Glover, I.; Antonopoulos, C.; Xenos, T. Optimal LTE-protected LPDA design for DVB-T reception using particle swarm optimization with velocity mutation. *IEEE Trans. Antennas Propag.* **2018**, 66, 3926–3935. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

31. Compact circularly polarized monopole antenna for millimeter-wave applications. Journal of Electromagnetic Engineering and Science. URL: <https://www.jees.kr/journal/view.php?number=3570> (дата звернення: 15.03.2026).

32. Heo H., Kang M.-J., Park S., Lee J., Qu L., Jung K.-Y. Design of a UWB circularly-polarized planar monopole antenna using characteristic mode analysis. Scientific Reports. 2024. Vol. 14. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-78131-w> (дата звернення: 15.03.2026).

33. Антенні системи: Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / С. Є. Мартинюк, С. І. Пільтай, О. Ю. Сушко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Електронні текстові дані (1 файл 1,83 Мбайт). — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. — 30 с. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/ba5aac7c-0618-4487-8082-2cfc0630d5e4/content> (дата звернення: 21.03.2026).

34. Eliyahu G., Maor A. M., Meshar R., Mukamal R., Weiss A. J. Single Transmitter Direction Finding Using a Single Moving Omnidirectional Antenna. Sensors. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/10/3131> (дата звернення: 15.03.2026).

					ЖБІ.26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

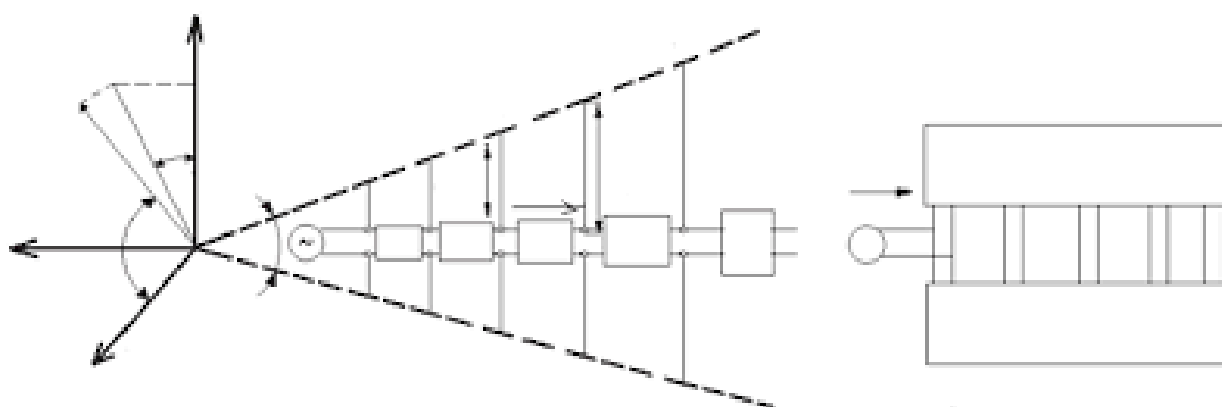
35. Wolff C. Radar tutorial: Antennas [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/an20.uk.html> (дата звернення: 20.03.2026).

36. Grundmann L., Gerlach M., Schafer W., Manteuffel D. A Cupola-Shaped Multimode Multiport Antenna for Aerial Direction Finding. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. URL: <https://arxiv.org/abs/2409.14958> (дата звернення: 15.03.2026).

37. Abdulhameed, A.A.; Kubík, Z. Design a Compact Printed Log-Periodic Biconical Dipole Array Antenna for EMC Measurements. Electronics 2022, 11, 2877. <https://doi.org/10.3390/electronics11182877>, LINK: <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/18/2877>.

38. Розрахунок логоперіодичної антени. Веб-сайт. URL: <https://3g-aerial.biz/onlajn-raschety/raschety-antenn/raschet-logoperiodicheskoyantenny> (дата звернення: 21.03.2026).

Додаток А. Структурна схема радіопеленгатора



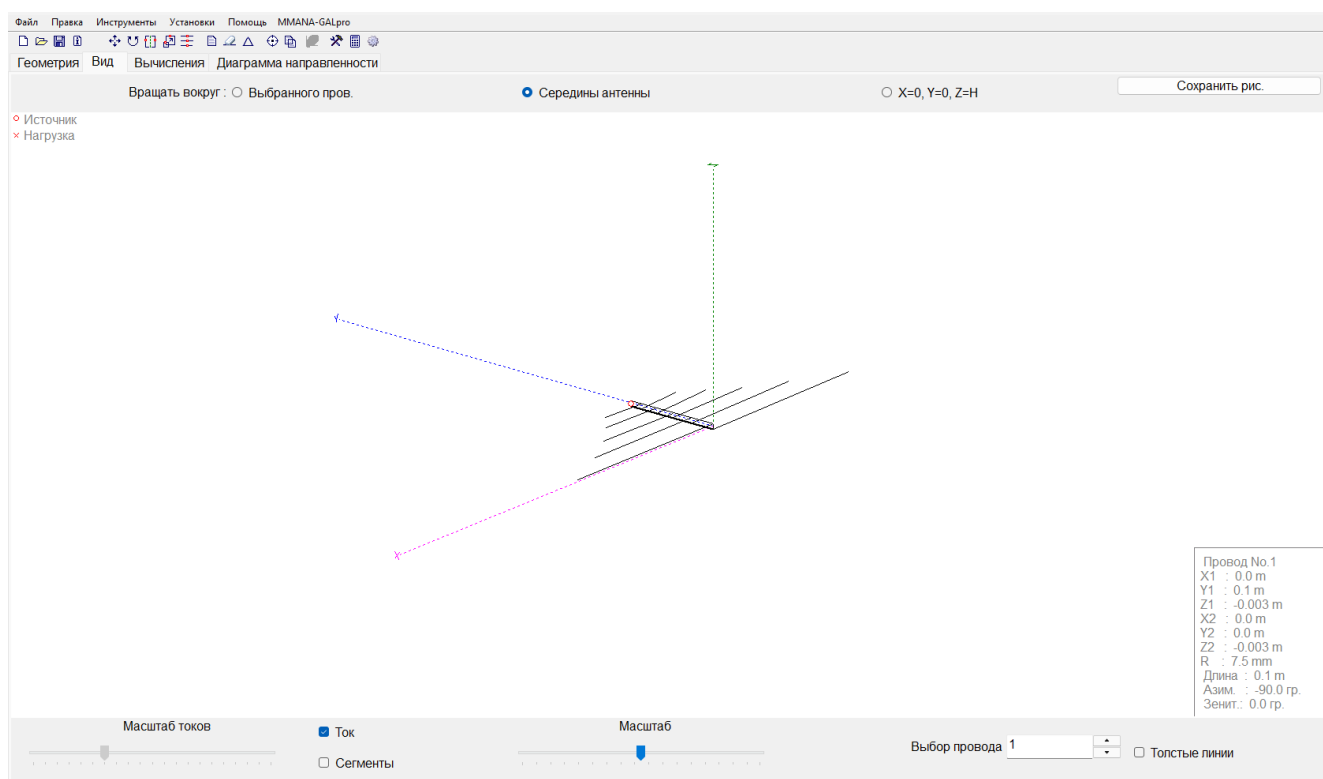
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ

Арк.

55

Додаток Б. Геометрична модель логоперіодичної антени

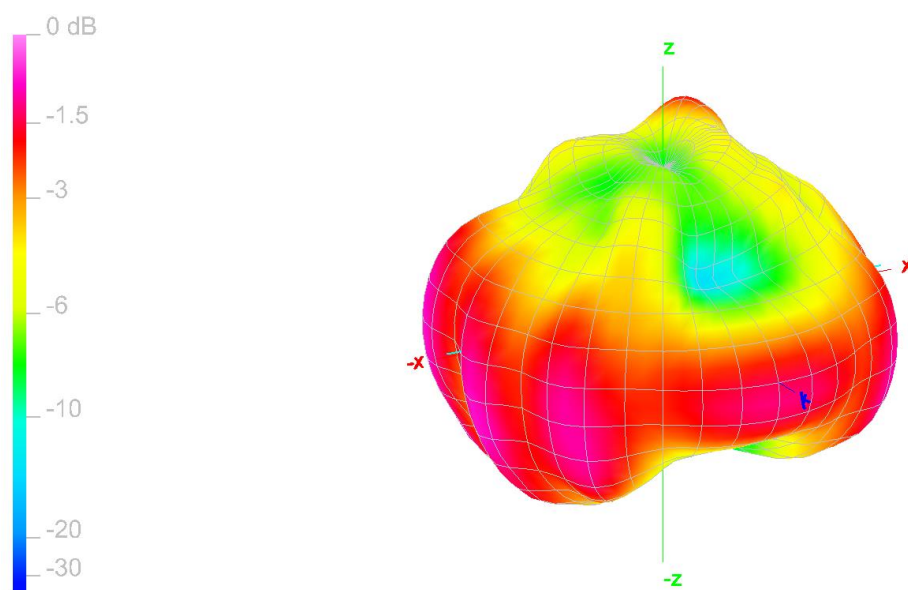


					ЖВІ.26. 172. 019. ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток В. Діаграми спрямованості антени

Файл Вид Шкала Цвета Шрифт Установки Помощь

Cursor Az angle = 0, Ev angle = 0, G = 16.3 dBi



☒ График ☒ Сетка ☐ Срез

Масштаб

Полн ☐ OV ☐ OH ☒ Total

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЖВІ .26. 172. 019. ПЗ

Арк.

57