

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій і технічного захисту інформації  
(повна назва)

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалавр)

Проектування та дослідження антен високочастотних діапазонів для радіозв'язку  
на основі технологій 5G  
(тема)

Виконав:

студент 4 курсу, групи ТРРТу-21-1

Бойченко А.А.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і повна назва спеціальності)

Освітня програма Радіотехніка

(повна назва освітньої програми)

Керівник доктор філософії Мерзлікін А.О.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

В.о. зав. кафедри

(підпис)

Зрудний О.А.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіо технологій і технічного захисту інформації

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем

Рівень вищої освіти перший (бакалавр)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(код і повна назва)

Освітня програма радіотехніка  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Бойченко Анні Анатоліївні  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проектування та дослідження антен високочастотних діапазонів для радіозв'язку на основі технологій 5G

затверджена наказом університету від 27.05.2024 р. № 498Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10.06.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи:

літературні джерела та електронні ресурси за темою кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

перелічити назви всіх розділів роботи від вступу до додатків (див. зміст)

Вступ. 1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 5G 2 РАДІОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПАРАМЕТРИ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ І ПРИЙМАЛЬНИХ АНТЕН 3. РОЗРОБКА АНТЕНИ. Висновки. Перелік джерел посилання. Додатки

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) \_\_\_\_\_

Комп'ютерна презентація

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд технічних характеристик високочастотних	06.05.24- 15.05.2024	вик.
2	Теоретичні основи проектування антен для систем 5G	16.05.2024-20.05.2024	вик.
3	Структурна схема антени використовується в	20.05.2024-23.05.2024	вик.
4	Висновки	24.05.2024-30.05.2024	вик.
5	Оформлення пояснювальної записки	01.06.2024-09.06.2024	вик.
6	Представлення роботи на кафедрі	10.06.2024	вик.

Дата видачі завдання 06 05 2024 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Бойченко А.А.  
( прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

PhD Мерзлікін А.О.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи магістра містить 61 сторінки тексту, 17 рисунків, 11 джерел посилання, 2 додатки.

## АНТЕНА. МІЛІМЕТРИ. ДІАГРАМА. СПРЯМОВАНІСТЬ.

Предметом дослідження є дальність роботи антени 5G.

Мета роботи – розробка антени діапазону 28ГГц.

У наслідок виконаної роботи було розроблено всенаправлену антену з частотою 28ГГц та розрахована дальність роботи

Результати дослідження можуть бути використані для побудови масивів антен 5G.

## ABSTRACT

The explanatory note of the master's thesis contains 61 pages of text, 17 figures, 11 references, and 2 appendices.

### ANTENNA. MILLIMETRES. DIAGRAM. DIRECTIONS.

The subject of research is the range of the 5G antenna.

The aim of the work is to develop a 28GHz antenna.

As a result of the work performed, an omnidirectional antenna with a frequency of 28 GHz was developed and the range of operation was calculated.

The results of the study can be used to build 5G antenna arrays.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧОК, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І СКОРОЧЕНЬ..	6
ВСТУП.....	7
1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 5G.....	8
1.1 Огляд технічних характеристик високочастотних антен.....	8
1.2 Теоретичні основи проектування антен для систем 5G.....	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	<b>15</b>
1.3 Поляризація антенн.....	19
2 РАДІОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПАРАМЕТРИ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ І ПРИЙМАЛЬНИХ АНТЕН.....	25
2.1 Структурна схема антени .....	28
2.2 Коефіцієнт спрямованої дії та коефіцієнт підсилення	<b>Error! Bookmark</b>
<b>not defined.</b>	<b>30</b>
2.3 Вібраторні антени .....	31
2.4 Амплітудна діаграма спрямованості.....	33
3 РОЗРОБКА АНТЕНИ .....	38
3.1 Інструмент розробк .....	38
3.2 Вибір та розробка антени .....	39
ВИСНОВКИ.....	46
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	48
Додаток А – КОПІЇ ПРЕЗЕНТАЦІЇ.....	50
Додаток Б – ВІДОМОСТІ АТЕСТАЦІЙНОГО ПРОЕКТУ.....	60

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧОК, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І СКОРОЧЕНЬ

IoT – internet of things;

ММ – міліметрові;

ДХ – діапазон хвиль;

ФАР – фазована антенна решітка;

## ВСТУП

В сучасному світі технологій радіозв'язку набуває все більшої важливості, особливо у зв'язку з поширенням мобільних пристроїв та розвитком Інтернету речей (IoT). Технологія 5G є однією з ключових технологій, що революціонізує спосіб, яким ми спілкуємося та взаємодіємо з оточуючим світом.

Одним із ключових аспектів технології 5G є використання високочастотних діапазонів, що вимагає нових підходів до проектування та дослідження антен. Ця робота присвячена теоретичному аналізу та моделюванню антен високочастотних діапазонів для радіозв'язку на основі технологій 5G з метою визначення їхньої ефективності та можливостей в умовах високочастотних перешкод. [1]

Метою даної роботи є розкриття теоретичних основ проектування високочастотних антен та вивчення їхнього впливу на якість та швидкість передачі даних в системах 5G. Для досягнення цієї мети буде проведений аналіз літературних джерел та результатів попередніх досліджень у цій галузі.

У рамках роботи буде розглянуто основні принципи роботи високочастотних антен, важливі параметри проектування та їх вплив на ефективність зв'язку в системах 5G. Також буде проведений аналіз сучасних підходів до реалізації високочастотних антен, що дозволить визначити найбільш перспективні напрямки подальших досліджень у цій області.

# 1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 5G

## 1.1 Огляд технічних характеристик високочастотних антен

Проектування та дослідження антен високочастотних діапазонів для радіозв'язку на основі технологій 5G

Вступ: Технологія 5G є наступним кроком у розвитку бездротових комунікацій, що забезпечує значно вищу швидкість передачі даних, зменшення затримок та підвищення ємності мережі. Одним з ключових аспектів успішного впровадження 5G є проектування та дослідження антен високочастотних діапазонів, які здатні ефективно працювати в умовах нових вимог.

Основні вимоги до антен для 5G:

**Ширококутність:** Антени повинні забезпечувати роботу в широкому діапазоні частот, що дозволяє підтримувати різні стандарти та технології. **Висока ефективність:** Антени повинні мати високу ефективність для забезпечення стабільного зв'язку та зменшення втрат енергії. **Компактність:** З огляду на обмежений простір для встановлення антен, особливо в мобільних пристроях, антени повинні бути компактними та легкими. **Масивні MIMO:** Використання масивних антенних решіток (Massive MIMO) для підвищення пропускної здатності та покращення якості зв'язку. **Проектування антен:** Процес проектування антен для 5G включає кілька етапів.

**Вибір матеріалів:** Використання високоякісних матеріалів з низькими втратами для забезпечення високої ефективності антен. **Моделювання:** Використання комп'ютерного моделювання для оптимізації форми та розмірів антен, а також для аналізу їх характеристик. **Прототипування:** Створення прототипів антен для проведення експериментальних досліджень та перевірки їх характеристик. **Тестування:** Проведення тестувань антен в реальних умовах для оцінки їх ефективності та надійності. **Дослідження антен:** Дослідження антен для 5G включає вивчення різних аспектів їх роботи.

**Частотні характеристики:** Аналіз частотних характеристик антен для визначення їх здатності працювати в широкому діапазоні частот. **Діаграма спрямованості:** Вивчення діаграми спрямованості антен для визначення їх здатності забезпечувати стабільний зв'язок у різних напрямках. **Вплив навколишнього середовища:** Дослідження впливу різних факторів навколишнього середовища, таких як погодні умови та перешкоди, на роботу антен. **Інтеграція з іншими компонентами:** Вивчення можливостей інтеграції антен з іншими компонентами системи для забезпечення їх сумісності та ефективної роботи. **Проектування та дослідження антен високочастотних діапазонів для радіозв'язку на основі технологій 5G** є важливим етапом у розвитку сучасних бездротових комунікацій. Використання новітніх технологій та підходів дозволяє створювати антени, які забезпечують високу швидкість передачі даних, стабільний зв'язок та надійність роботи в умовах нових вимог.

**Втрати сигналу:** Високочастотні сигнали мають більші втрати при проходженні через матеріали та атмосферу, що може знижувати ефективність зв'язку. [2]

**Інтерференція:** Високочастотні діапазони більш схильні до інтерференції від інших джерел сигналу, що може впливати на якість зв'язку.

**Складність проектування:**

Проектування антен для високочастотних діапазонів вимагає високої точності та використання передових технологій, що може збільшувати вартість розробки. **Перспективи: Покращення матеріалів:** Розробка нових матеріалів з низькими втратами та високою ефективністю може значно покращити характеристики антен. **Інноваційні технології:** Використання новітніх технологій, таких як метаматеріали та нанотехнології, може дозволити створювати антени з унікальними властивостями. **Інтеграція з іншими системами:** Інтеграція антен з іншими компонентами системи, такими як підсилювачі та фільтри, може покращити їх ефективність та зменшити втрати сигналу.

Основні типи антен для 5G включають:

Всенаправлені антени: Ці антени випромінюють сигнали рівномірно у всіх напрямках. Вони часто використовуються для внутрішніх застосувань, таких як чипсети та маршрутизатори Wi-Fi.

Полунаправлені антени: Ці антени підходять для передачі сигналів в певному напрямку. Вони забезпечують кращу спрямованість порівняно з всенаправленими антенами.

Однонаправлені антени: Ці антени передають сигнали тільки в одному напрямку і дуже корисні для зв'язку "точка-точка". Вони також допомагають зменшити інтерференцію від небажаного шуму.

Фазовані антенні решітки (ФАР): Ці антени використовують масиви антен, які можуть змінювати напрямок випромінювання сигналу без фізичного переміщення антени. Це дозволяє швидко змінювати напрямок сигналу та покращувати якість зв'язку.

Антени з обробкою сигналу: Ці антени використовують технології обробки сигналу для покращення якості зв'язку та зменшення втрат сигналу. Ці типи антен забезпечують різні підходи до передачі та прийому сигналів, що дозволяє оптимізувати роботу мереж 5G в різних умовах.

Огляд технічних характеристик високочастотних антен - це важлива частина дослідження, оскільки вона дозволяє краще розуміти та аналізувати їхні властивості та особливості.

Частотний діапазон антен для систем 5G є важливим параметром, оскільки він визначає, на яких частотах антена може працювати ефективно. Технологія 5G використовує високочастотні діапазони, що відрізняються від традиційних діапазонів, використаних у попередніх поколіннях мобільних мереж.

Для технології 5G використовуються такі частотні діапазони:

Міліметрові хвилі (mmWave): Цей діапазон знаходиться в діапазоні від 30 ГГц до 300 ГГц. Він надає велику пропускну здатність та швидкість передачі даних, але має обмежену дальність передачі і високу чутливість до перешкод.

Середні частоти: Цей діапазон зазвичай знаходиться в діапазоні від 2 ГГц до 6 ГГц. Він використовується для забезпечення покриття великих площ і кращої проникності в будівлях.[3]

Низькі частоти: Діапазон низьких частот (до 2 ГГц) використовується для забезпечення широкого покриття та підтримки внутрішнього проникнення сигналу.

Коефіцієнт підсилення (gain) антени є одним із ключових параметрів, що визначає ефективність антени в перетворенні електричної потужності на радіаційну енергію в певному напрямку. Для антен високочастотних діапазонів, таких як ті, що використовуються в системах 5G, важливо мати високий коефіцієнт підсилення для компенсації високих втрат на цих частотах.

Коефіцієнт підсилення вимірюється в децибелах (dB) і зазвичай порівнюється з ідеальною антеною, яка має підсилення 0 дБ (яка розподіляє енергію рівномірно у всіх напрямках). Зазвичай для антен у системах 5G очікується коефіцієнт підсилення в діапазоні від кількох децибел до десятків децибел, в залежності від конкретного застосування та вимог до зв'язку.

Для дослідження технічних характеристик антен високочастотних діапазонів для систем 5G важливо вивчити і аналізувати коефіцієнт підсилення, оскільки він впливає на дальність зв'язку, якість сигналу та інші параметри ефективності антени.

Напрявленість (directivity) антени є ще одним важливим параметром, який визначає, наскільки антена концентрує енергію в певному напрямку. Для високочастотних антен, які використовуються в системах 5G, спрявленість має велике значення, оскільки вони часто призначені для точного спрямування сигналу на конкретні користувацькі пристрої чи базові станції.

Напрямлени́сть антени вимірюється у децибелах (dB) і зазвичай вказується у вигляді діаграми напрямленості, яка показує, як сигнал розподіляється у просторі. Високочастотні антени зазвичай мають вузькі кутові діаграми напрямленості, що означає, що вони спрямовані на вузький сектор простору.

Для дослідження технічних характеристик антен для систем 5G важливо аналізувати напрямленість, оскільки вона впливає на зону покриття антени, ефективність передачі сигналу та мінімізацію взаємовпливу між різними антенами в системі.

Полоса пропускання (bandwidth) антени - це діапазон частот, в якому антена може ефективно працювати без істотних втрат сигналу. Для високочастотних антен, які використовуються в системах 5G, важливо мати широку полосу пропускання для підтримки високих швидкостей передачі даних та різноманітних послуг.

Полоса пропускання антени визначається її конструкцією та матеріалами, з яких вона виготовлена. Широка полоса пропускання означає, що антена може працювати на широкому спектрі частот, що є важливим для забезпечення сумісності з різними стандартами та частотними діапазонами, що використовуються у системах 5G.

Для дослідження технічних характеристик антен для систем 5G важливо вивчати полосу пропускання, оскільки вона впливає на швидкість передачі даних, якість сигналу та загальну ефективність системи зв'язку.

Кутова діаграма напрямленості (antenna radiation pattern) антени є графічним представленням напрямленості антени у просторі. Ця діаграма вказує, як енергія випромінюється антеною у різних напрямках і може бути представлена у двох або тривимірному вигляді.

Для антен високочастотних діапазонів, таких як у системах 5G, важливо мати вузьку кутову діаграму напрямленості, щоб ефективно направляти сигнал на конкретні користувачькі пристрої чи базові станції. Це дозволяє забезпечити

високу якість зв'язку та уникнути зайвого випромінювання сигналу в непотрібних напрямках.[4]

Для дослідження технічних характеристик антен для систем 5G важливо вивчати кутову діаграму напрямленості, оскільки вона впливає на зону покриття антени, ефективність передачі сигналу та мінімізацію взаємовпливу між різними антенами в системі.

Ефективна площа (effective aperture) антени є мірою її здатності збирати енергію з випромінюваного поля. Цей параметр визначається геометричними та електричними характеристиками антени і вимірюється у квадратних метрах ( $m^2$ ).

Для високочастотних антен, що використовуються в системах 5G, ефективна площа важлива для визначення їхньої ефективності в зборі сигналу. Чим більша ефективна площа, тим краще антена може збирати енергію з випромінюваного поля, що може покращити якість зв'язку та збільшити дальність передачі.

Для дослідження технічних характеристик антен для систем 5G важливо враховувати ефективну площу, оскільки вона впливає на ефективність зв'язку та може бути важливою для визначення оптимальних параметрів антени для конкретного застосування.

Поляризація антени визначає орієнтацію електричного поля її електромагнітного випромінювання. Вона може бути вертикальною, горизонтальною або круговою. Поляризація горизонтальна тоді, коли електричне поле коливається паралельно з землею, вертикальна - коли поляризація перпендикулярна землі, а кругова - коли поляризація обертається на однаковий кут кожен період коливань.

В системах 5G часто використовується вертикальна поляризація для забезпечення кращої проникності сигналу в середовища, такі як містобудівлі, де рефлексія від вертикальних поверхонь може призвести до кращого збереження сигналу. Проте, у відкритих місцевостях можуть

використовуватися обидві поляризації в залежності від конкретної архітектури мережі та умов передачі.

Дослідження поляризації антен важливе для визначення оптимального вибору поляризації для конкретного середовища експлуатації системи 5G, що може покращити ефективність зв'язку та якість обслуговування.

Втрати сигналу в антенні включають в себе різноманітні втрати, які виникають в процесі передачі сигналу через антену. Ці втрати можуть бути спричинені різними факторами, такими як втрати в радіаційних елементах антени, втрати в кабелях, втрати внаслідок розсіювання сигналу та втрати внаслідок відбивання від оточуючих об'єктів.

У високочастотних антен, що використовуються в системах 5G, втрати можуть бути особливо значними через високі частоти, на яких вони працюють. Такі втрати можуть впливати на ефективність зв'язку та дальність передачі сигналу.

Для дослідження технічних характеристик антен для систем 5G важливо враховувати різноманітні види втрат, що можуть виникати в антені, та вживати заходи для їх мінімізації, що може покращити якість зв'язку та ефективність системи.

Компактність антени є важливою характеристикою, особливо в контексті високочастотних антен для систем 5G. Компактні антени займають мало місця та можуть бути легше розміщені на різних пристроях, таких як мобільні телефони, роутери або інші пристрої Інтернету речей (IoT).

Для систем 5G, де використовуються високі частоти, компактність антен може бути особливо важливою, оскільки вона дозволяє ефективно використовувати обмежений обсяг пристрою для розміщення антени. Крім того, компактні антени можуть мати менші втрати сигналу і кращу ефективність, оскільки вони мають менше елементів і коротші дротики.

Дослідження компактності антен важливе для визначення оптимальних розмірів антени для конкретного застосування в системах 5G, що може

покращити якість зв'язку та забезпечити ефективне використання обмеженого простору в пристроях.

## 1.2 Теоретичні основи проектування антен для систем 5G

Проектування антен для систем 5G вимагає розуміння ряду теоретичних концепцій і принципів, що стосуються високочастотних антен та їхньої взаємодії з сучасними мережами зв'язку. Основні теоретичні аспекти включають:[5]

Типи антен: Різні типи антен, такі як патч-антени, Yagi-антени (риунок 1.1), мікрополоскові антени, дипольні антени тощо, мають різні характеристики та використовуються для різних застосувань в системах 5G.

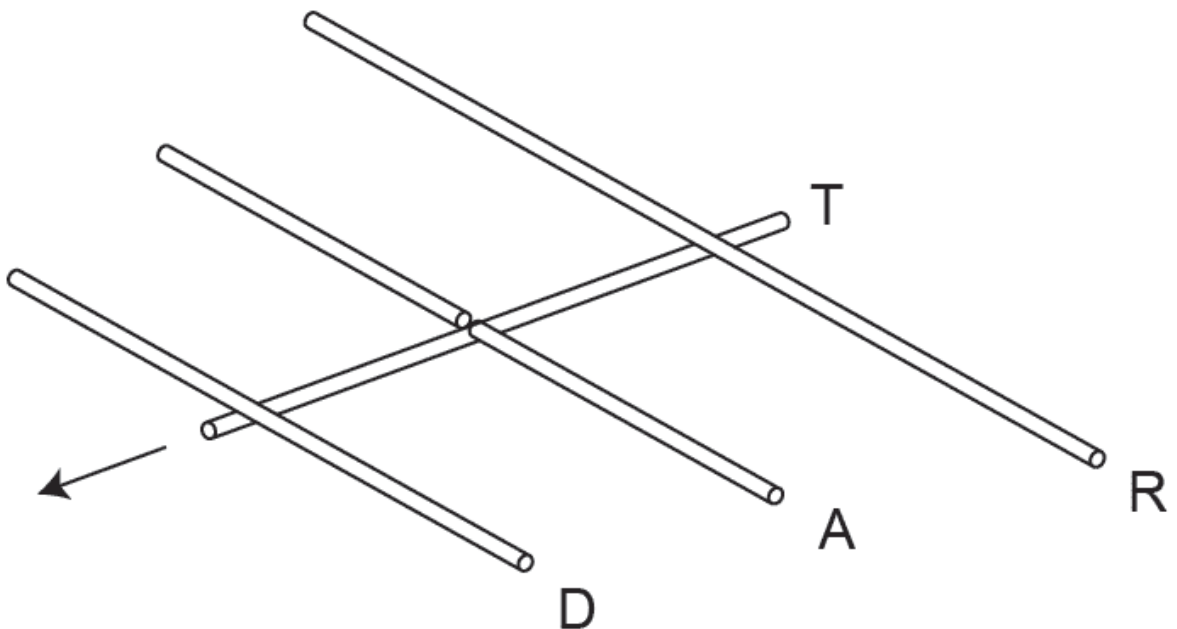


Рисунок 1.1 - Yagi-антена R - рефлектор; A - активний елемент[англ.]  
(тут - симетричний вібратор); D - директор; T - траверса.

Частотні діапазони: Розуміння частотних діапазонів, які використовуються в системах 5G (наприклад, міліметрові хвилі), дозволяє підібрати оптимальні параметри антени для роботи в цих діапазонах.

Системи 5G використовують широкий спектр частот, включаючи мікрохвильові та міліметрові діапазони, для забезпечення високошвидкісного та висококапацитетного бездротового зв'язку. Основні частотні діапазони в системах 5G включають:

Частоти нижнього діапазону (sub-6 GHz): Цей діапазон включає частоти до 6 ГГц і використовується для забезпечення широкого покриття та підтримки масових підключень в міських та сільських районах.

Частоти міліметрового діапазону (mmWave): Цей діапазон включає частоти від 24 ГГц до 100 ГГц і використовується для надання високошвидкісного бездротового доступу в ультраплотних міських середовищах та великих концертних заливах.

Частоти високого діапазону (high-band): Цей діапазон включає частоти від 2 ГГц до 6 ГГц і використовується для підтримки високих швидкостей передачі даних у міських районах з високою щільністю населення.

Частоти середнього діапазону (mid-band): Цей діапазон включає частоти від 6 ГГц до 24 ГГц і використовується для поєднання високої швидкості та широкого покриття у міських та підміських районах.

Кожен з цих діапазонів має свої переваги та обмеження, і оптимальний вибір частотного діапазону залежить від конкретних умов впровадження та вимог до мережі 5G. Для забезпечення оптимальної ефективності та продуктивності системи 5G може використовуватися комбінація різних частотних діапазонів.

Спрямовані антени є ключовими компонентами сучасних систем бездротового зв'язку, включаючи технології 5G, завдяки їх здатності фокусувати випромінювання в певному напрямку. Це дозволяє досягти високої ефективності передачі сигналу та мінімізації перешкод.

Основні характеристики спрямованих антен. Коефіцієнт підсилення (Gain): Відображає, наскільки ефективно антена фокусує радіохвилі в одному напрямку порівняно з ідеальною ізотропною антеною. Спрямованість (Directivity): Відношення випромінювання в максимальному напрямку до середнього випромінювання по всіх напрямках. Коефіцієнт стоячої хвилі (VSWR): Відображає, наскільки добре антена узгоджена з лінією передачі, що впливає на відбиття сигналу.[6]

Параболічні антени (рисунок 1.2) (Parabolic Antennas). Використовують параболічне відбивач для фокусування сигналу в одному напрямку. Мають високий коефіцієнт підсилення та вузький кут випромінювання. Застосовуються в супутниковому зв'язку та радіорелейних лініях.



Рисунок 1.2 - Антена параболічна RDX-0224D

Антени типу рупор (Horn Antennas) (рисунок 1.3). Використовуються для випромінювання або прийому сигналів в мікрохвильовому діапазоні. Мають високу спрямованість і низький рівень бічних пелюсток. Часто використовуються в якості випромінювачів для параболічних антен.

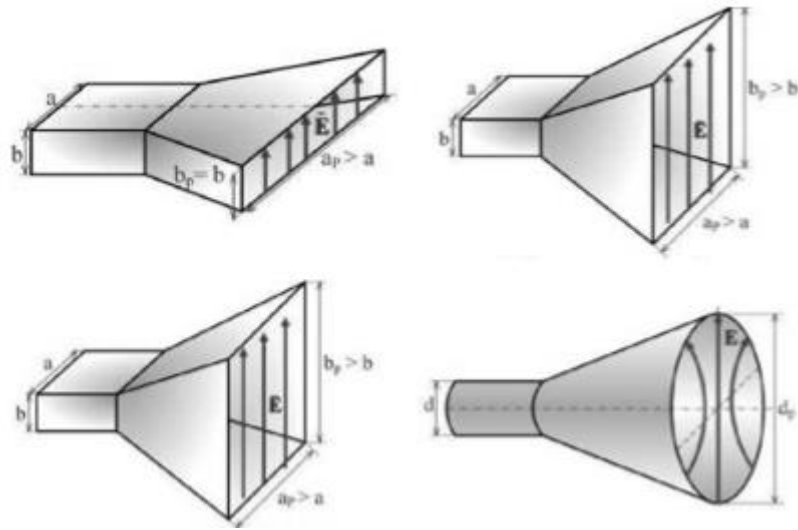
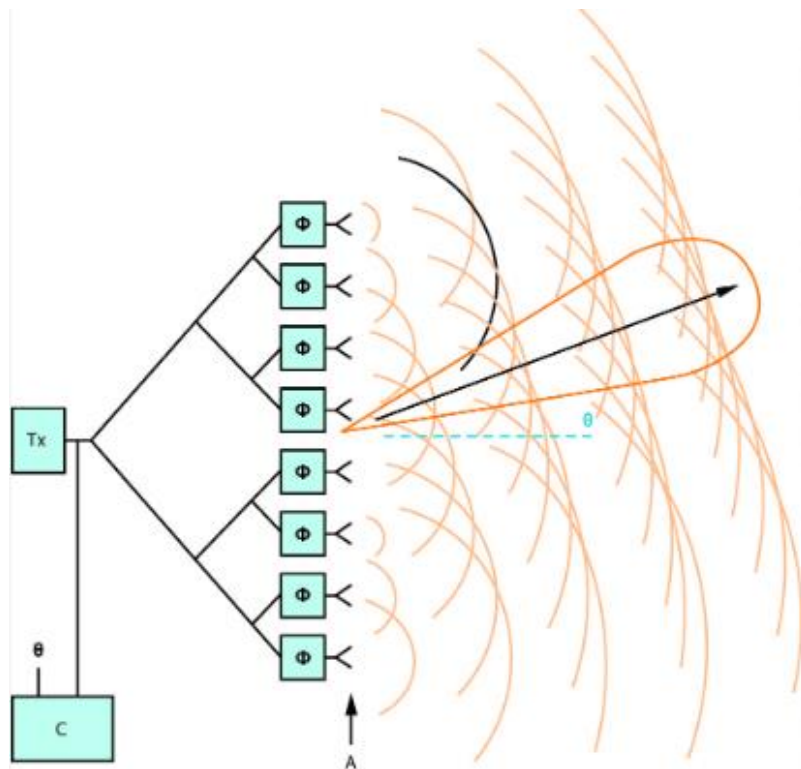


Рисунок 1.3 - антени типу рупор

Масиви фазованих антен (Phased Array Antennas) (рисунок 1.4). Складаються з множини антенних елементів, які можуть змінювати фазу випромінювання для зміни напрямку головного променя без фізичного руху антени. Застосовуються в радіолокаційних системах, супутниковому зв'язку та 5G.



## Рисунок 1.4 - Масиви фазованих антен

Переваги та недоліки спрямованих антен

Переваги:

- високий коефіцієнт підсилення;
- зниження впливу перешкод завдяки вузькому куту випромінювання;
- підвищена ефективність використання спектра.

Недоліки:

- складність конструкції та налаштування;
- висока вартість виробництва та експлуатації;
- необхідність точного направлення на приймач або передавач.

Застосування спрямованих антен у 5G. Масивів антен (Massive MIMO):

Значна кількість антен для покращення пропускної здатності та зниження інтерференції. Формування променя (Beamforming): Технологія, що дозволяє спрямовувати сигнал безпосередньо до користувача, покращуючи якість з'єднання та зменшуючи споживання енергії. Мікрохвильові та міліметрові хвилі (Microwave and Millimeter Wave): Використання частот в діапазоні 24 GHz і вище для забезпечення високої швидкості передачі даних.

### 1.3 Поляризація антенн

Поляризація антен є важливим аспектом їхньої роботи, оскільки вона визначає орієнтацію електромагнітних хвиль, що випромінюються або приймаються антеною. Правильний вибір поляризації може значно покращити ефективність системи зв'язку, особливо в умовах технологій 5G.[7]

Горизонтальна поляризація (рисунок 1.5): Електричне поле хвилі орієнтоване горизонтально. Використовується в телебаченні, радіозв'язку та деяких системах Wi-Fi.

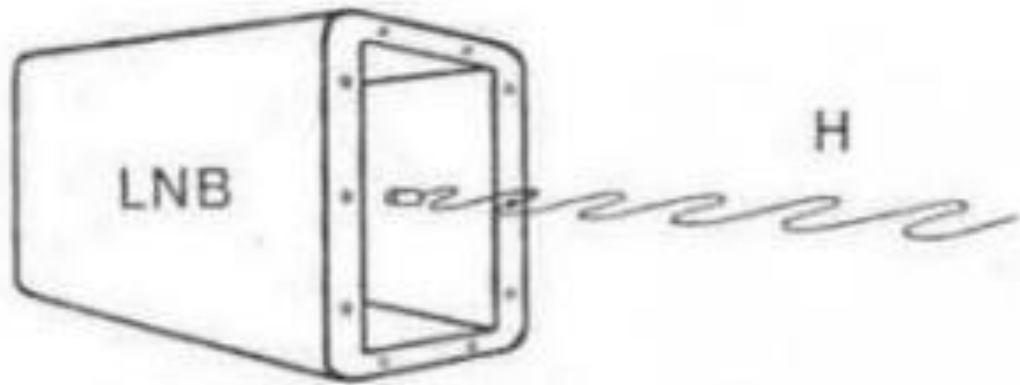


Рисунок 1.5 - Горизонтальна поляризація

Вертикальна поляризація (рисунок 1.6): Електричне поле орієнтоване вертикально. Застосовується в мобільних мережах та автомобільних системах зв'язку.

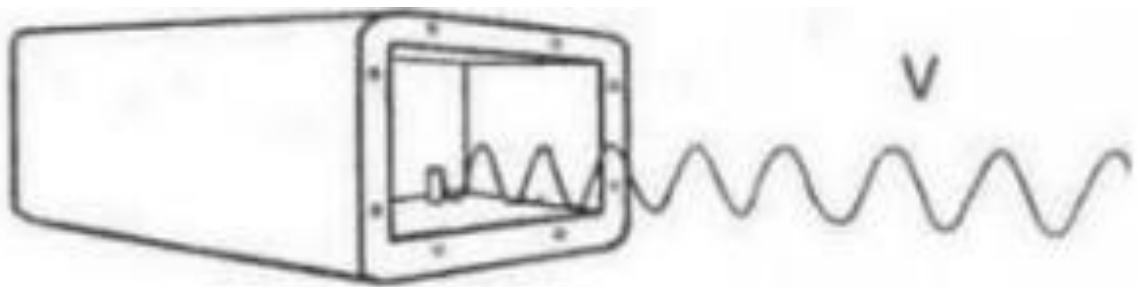


Рисунок 1.6 - Вертикальна поляризація

Кругова поляризація (рисунок 1.7). Правополярна (RHCP): Вектор електричного поля обертається за годинниковою стрілкою при погляді вздовж напрямку поширення хвилі. Лівополярна (LHCP): Вектор електричного поля обертається проти годинникової стрілки. Використовується в супутниковому зв'язку, GPS та деяких системах 5G для зменшення впливу багатошляхових інтерференцій.

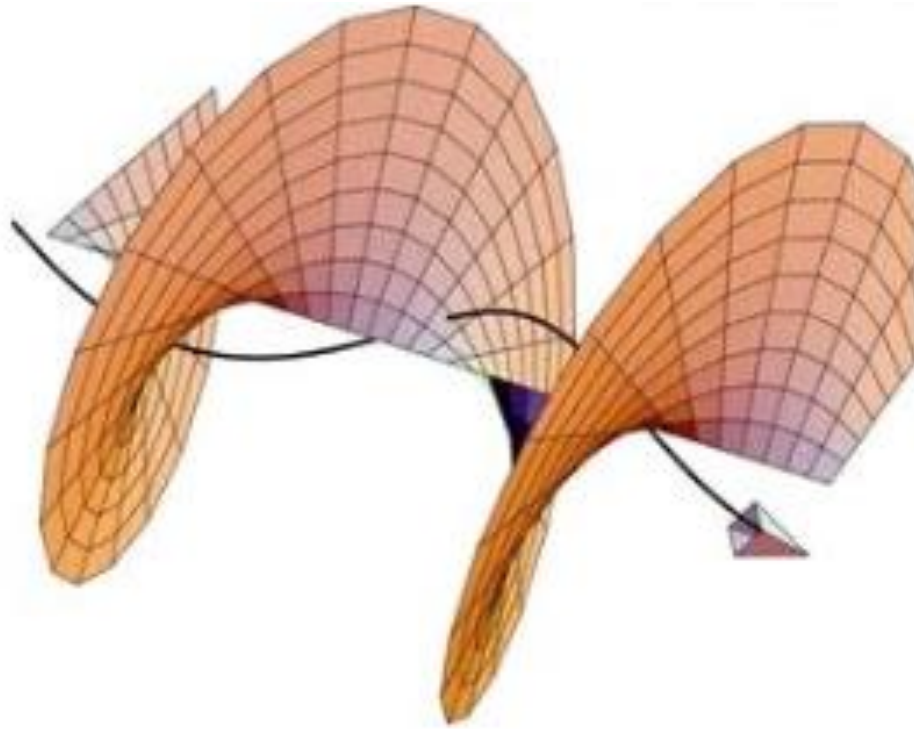


Рисунок 1.7 - Кругова поляризація

Застосування поляризації в 5G. Масиви антен (Massive MIMO). Використання антен з різною поляризацією для покращення пропускну здатності та стійкості до інтерференцій. Дозволяє реалізувати техніку поляризаційного рознесення.

Формування променя (Beamforming). Оптимізація напрямку та поляризації сигналу для кожного користувача, що підвищує ефективність використання спектра та зменшує перешкоди. Використання поляризаційної адаптації для динамічного налаштування антенних систем.

Інтеграція в мобільні пристрої. Вбудовування антен з круговою або еліптичною поляризацією в мобільні пристрої для покращення якості прийому сигналу в умовах багатошляхового розповсюдження.

Поляризація антен відіграє важливу роль у забезпеченні ефективності та надійності систем зв'язку, особливо в умовах високочастотних діапазонів і технологій 5G. Розуміння та правильний вибір поляризації дозволяє

оптимізувати передачу сигналів, зменшити інтерференцію та покращити загальну продуктивність системи зв'язку.

В реальних умовах роботи системи зв'язку вплив поляризації антен може суттєво змінюватися залежно від середовища, в якому вони працюють. Високочастотні діапазони, що використовуються в технологіях 5G, зокрема міліметрові хвилі (24 GHz і вище), є особливо чутливими до впливу навколишнього середовища.

Поширення сигналу в міських умовах. У міських умовах сигнал може відбиватися від будівель, транспортних засобів та інших об'єктів, що створює ефект багатошляхового поширення (multipath propagation). Використання поляризаційного рознесення може зменшити негативний вплив цього ефекту та покращити якість прийому сигналу.[8]

Вплив атмосферних явищ. Високочастотні сигнали більш чутливі до поглинання та розсіювання в атмосфері, зокрема через дощ, сніг та інші атмосферні явища. Використання кругової або еліптичної поляризації може допомогти зменшити втрати сигналу за рахунок кращого проникнення через атмосферні перешкоди.

Використання в приміщеннях. Внутрішні умови, такі як наявність стін та інших конструкцій, також можуть впливати на поляризацію сигналу. Антени з вертикальною поляризацією можуть краще працювати в умовах прямої видимості (Line-of-Sight, LOS), тоді як антени з круговою поляризацією можуть бути ефективнішими в умовах непрямой видимості (Non-Line-of-Sight, NLOS).

Поляризаційна гнучкість та адаптивність. Одна з ключових переваг сучасних антенних систем для 5G – це можливість динамічної зміни поляризації для оптимізації зв'язку в реальному часі. Це дозволяє системам автоматично підлаштовуватися під змінні умови навколишнього середовища та вимоги користувачів.

Адаптивні антенні системи. Адаптивні антенні системи можуть змінювати поляризацію сигналу залежно від умов розповсюдження та поточних

перешкод. Це дозволяє покращити якість зв'язку та зменшити втрати потужності сигналу.

Використання технологій штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) допомагає оптимізувати процес адаптації антен для забезпечення найкращої продуктивності в умовах змінного середовища.

Поляризаційне формування променя (Beamforming). Технологія формування променя дозволяє не тільки направляти сигнал у потрібному напрямку, але й змінювати його поляризацію для досягнення оптимальної якості зв'язку. Це особливо важливо для масивів антен (Massive MIMO), які використовуються в системах 5G.

Поляризаційне формування променя забезпечує ефективне використання спектра та зменшує взаємні перешкоди між різними користувачами та системами.

Поляризація та безпека зв'язку. Поляризація також відіграє важливу роль у забезпеченні безпеки зв'язку. Використання різних типів поляризації може допомогти захистити інформацію від несанкціонованого доступу та перешкоджання.

Захист від перехоплення. Використання кругової або еліптичної поляризації може зменшити ймовірність перехоплення сигналу, оскільки такі сигнали важче виявити та аналізувати.

Адаптивні антенні системи можуть змінювати поляризацію сигналу в реальному часі, що ускладнює завдання перехоплення для потенційних злоумисників.

Стійкість до перешкод. Використання різних типів поляризації допомагає зменшити вплив навмисних та ненавмисних перешкод. Наприклад, вертикально поляризовані сигнали можуть бути менш чутливі до горизонтально поляризованих перешкод і навпаки.

Поляризація антен є важливим фактором, що визначає ефективність та надійність систем зв'язку. В умовах високочастотних діапазонів і технологій 5G

правильний вибір та налаштування поляризації дозволяють значно покращити якість зв'язку, зменшити вплив перешкод та підвищити загальну продуктивність системи.

Розуміння поляризаційних властивостей антен і їхнього впливу на поширення сигналу є критично важливим для проектування сучасних систем бездротового зв'язку. Використання адаптивних антенних систем та технологій формування променя дозволяє забезпечити оптимальну продуктивність зв'язку навіть в умовах змінного навколишнього середовища.

Таким чином, поляризація антен залишається ключовим елементом у розробці та впровадженні нових технологій зв'язку, зокрема 5G, що забезпечує високу швидкість передачі даних, стабільність з'єднання та надійність зв'язку в різних умовах експлуатації.

## 2. РАДІОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПАРАМЕТРИ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ І ПРИЙМАЛЬНИХ АНТЕН

Анени є ключовими компонентами будь-якої системи радіозв'язку, забезпечуючи передачу і прийом електромагнітних хвиль. Від ефективності їх роботи залежить якість та надійність зв'язку. Розглянемо основні радіотехнічні характеристики та параметри передавальних і приймальних антен.

Основні характеристики антен. Коефіцієнт підсилення (Gain) відображає, наскільки ефективно антена може підсилити сигнал в певному напрямку порівняно з ідеальною ізотропною антеною. Зазвичай виражається в дБ (децибелах). Високий коефіцієнт підсилення означає, що антена спрямовує більшу частину випромінювання в одному напрямку, що підвищує ефективність передачі та прийому сигналу.[9]

Спрямованість (Directivity) показує, наскільки антена концентрує випромінювання в певному напрямку. Спрямованість безпосередньо пов'язана з коефіцієнтом підсилення, але не враховує втрат потужності в самій антені.

Ширина діаграми спрямованості (Beamwidth) визначає кут, під яким випромінювання антени зменшується до половини свого максимального значення. Вузька ширина діаграми спрямованості дозволяє краще концентрувати сигнал, але може вимагати точного наведення антени.

Поляризація (Polarization) визначає орієнтацію електромагнітних хвиль, які випромінює або приймає антена. Існує лінійна (горизонтальна або вертикальна), кругова (права або ліва) та еліптична поляризація. Важливо, щоб поляризація передавальної і приймальної антен співпадала для максимальної ефективності зв'язку.

КСХН (Коефіцієнт стоячої хвилі на вході антени) показує, наскільки добре антена узгоджена з лінією передачі. Низький КСХН означає, що більша частина енергії передається антеною і не повертається назад, що мінімізує втрати і покращує ефективність системи.

Правильний вибір та налаштування антен є ключовими для забезпечення ефективного і надійного радіозв'язку. Знання радіотехнічних характеристик та параметрів передавальних і приймальних антен дозволяє оптимізувати роботу радіосистем, покращити якість сигналу та зменшити втрати.

Основне призначення антен - випромінювання або приймання електромагнітних хвиль.

Антенною називається пристрій, що здійснює перетворення спрямованих електромагнітних хвиль у радіохвилі, і навпаки, радіохвиль у спрямовані електромагнітні хвилі.

Антени належать до пасивних компонентів радіосистем, і в конструктивному відношенні вони являють собою поєднання провідників і магнітодіелектриків. Поряд із випромінюванням і прийомом радіохвиль антени виконують функції просторової фільтрації радіосигналів, забезпечуючи спрямованість дії радіосистем і здійснюючи пеленгацію джерел радіовипромінювання.

Якість функціонування антен оцінюється низкою радіотехнічних, конструктивних та інших характеристик і параметрів. Конструктивне виконання антен і досяжні значення параметрів істотно залежать від діапазону застосовуваних радіохвиль. Розрізняють антени довгих хвиль (10 000 - 1 000 м), середніх хвиль (1 000 - 100 м), короткохвильові антени (100 - 10 м), антени УКХ, НВЧ-антени (300 МГц - 300 ГГц), антени оптичних хвиль.

Класифікацію антен можна проводити за різними ознаками.

По-перше, антени можна розділити на передавальні та приймально-передавальні, однак, згідно з теоремою взаємності, властивості антени на передачу і на приймання не відрізняються.

По-друге, це поділ за використовуваним діапазоном частот на широкопasmові та вузькопasmові.

По-третє, серед антен за їхніми спрямованими властивостями можна виокремити гостроспрямовані, слабоспрямовані та ненаправлені.

Найбільший поділ за пристроєм антен являє собою поділ на три групи: антени з лінійними струмами - лінійні антени, апертурні антени, антени поверхневих хвиль.

Лінійні антени - це антени, у яких струми протікають каналами, вузькими порівняно з поздовжніми розмірами і довжиною хвилі. Вони поділяються на дротяні та щілинні. Дротяні антени бувають як відкриті (система дротів, ізольованих на кінці, наприклад вібраторні антени), так і закриті (замкнуті контури, наприклад петльові антени). Відкриті антени широко застосовуються в радіозв'язку, в радіопередачі, закриті - головним чином у радіонавігації. Антени можна також поділити на симетричні (потенціали затискачів антени однакові за величиною і протилежні за значенням; така антена складається з двох однакових половин) і несиметричні (один із затискачів антени з'єднується із заземленням або противагою і має нульовий потенціал).

Апертурні антени - антени, випромінювання яких відбувається через розкриття, званий апертурою (наприклад, рупорні, лінзові, дзеркальні). У розкриттях таких антен зазвичай створюється поле, близьке до синфазного, тому максимальне випромінювання відбувається в напрямку, перпендикулярному до площини розкриття, тобто апертурні антени - високонправлені. Вони є основним типом радіолокаційних антен, використовуються в радіонавігації, радіоастрономії, радіозв'язку.[10]

Антени поверхневих хвиль збуджуються електромагнітними хвилями, що біжать та поширюються вздовж антени, і випромінюють у напрямку поширення (наприклад, стрижнева діелектрична антена, що є продовженням відкритого на кінці круглого хвилеводу). Це відносно компактні антени, тому застосовуються в радіообладнанні літальних апаратів.

Антени всіх типів можуть групуватися в багатоеlementні антенні решітки, що дає змогу отримувати керовані характеристики.

## 2.1 Структурна схема антени

У схемі конкретної антени можна виокремити такі елементи: вхід, узгоджувальний пристрій, розподільник і випромінювальну систему (рисунок 2.1).

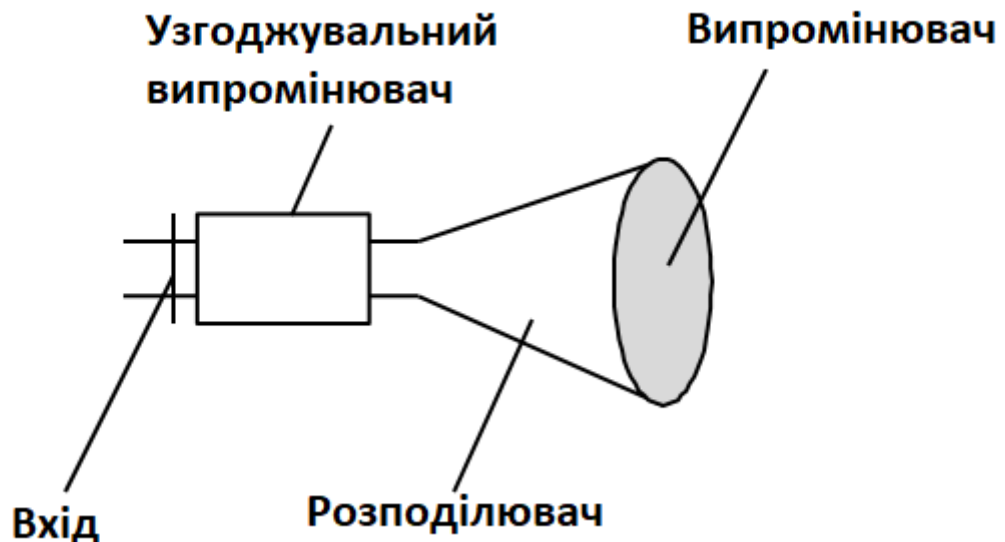


Рисунок 2.1 - Структурна схема антени

Під входом антени зазвичай розуміють перетин лінії передачі з хвилею заданого типу. Положення цього перерізу має бути точно вказано, що необхідно для однозначного електричного розрахунку тракту. Сучасні антени можуть мати сотні, а іноді тисячі входів. Ці входи використовуються для одночасної роботи антени на різних частотах або для незалежного формування декількох різних характеристик спрямованості.

Узгоджувальний пристрій призначається для забезпечення режиму живильної лінії, якомога ближчого до режиму біжучої хвилі.

Розподільник антени являє собою конструкцію з провідників і діелектриків і призначений для створення потрібного закону розподілу випромінювальних струмів, що забезпечує формування необхідної характеристики спрямованості.

Випромінювальна система являє собою область простору, в якій протікають струми, що збуджують електромагнітні хвилі. З огляду на принцип оборотності антен таку саму назву може бути збережено і для приймальних антен. Як випромінювальна система можуть фігурувати як реальні електричні струми, що протікають по металевих поверхнях, так і еквівалентні фіктивні електричні та магнітні струми на замкнених поверхнях, що оточують антену.

Виділення розподільника і випромінювальної системи пов'язане з традиційним підходом, згідно з яким, розрахунок антени розділяється на дві частини: внутрішнє і зовнішнє завдання. Внутрішнє завдання полягає в знаходженні функцій розподілу високочастотних струмів у випромінювальній системі. Зовнішнє завдання за відомим розподілом струмів визначає електромагнітне поле антени і параметри, що його характеризують (ширина променя, рівень бічного випромінювання, КНД тощо).

З фізичної точки зору антену можна уявити розімкненим коливальним контуром. Замкнений контур не випромінює, оскільки електричне і магнітне поля в ньому розділені в просторі, що неприродно для електромагнітної хвилі. Перейдемо від замкненого коливального контуру до розімкнутого, розсуваючи пластини конденсатора й одночасно збільшуючи їхні розміри для збереження незмінної власної частоти контуру. Антена, отримана в результаті такого переходу, являє собою симетричний вібратор. При цьому під впливом змінної напруги, прикладеної до вхідних клем антени, в індуктивностях виникає струм провідності, а в ємностях - струм зміщення. Оскільки наявний струм зміщення охоплює великий обсяг простору, то стає можливим ефективно випромінювання електромагнітних хвиль. Спрямовані, поляризаційні та інші властивості антен описуються низкою характеристик.

## 2.2 Коефіцієнт спрямованої дії та коефіцієнт підсилення

Коефіцієнтом спрямованої дії (КНД) називається відношення густини потоку потужності, випромінюваної даною антеною, у певному напрямі, до густини потоку потужності, що випромінювалася б абсолютно неспрямованою антеною в будь-якому напрямі за рівності повної потужності випромінювання обох антен та за умови, що вимірювання проводять на однаковій віддалі від них у дальній зоні:

$$D = \frac{P_{\text{дослід.антена}}}{P_{\text{ненаправ.антена}}} \quad (2.1)$$

Існує ще одне визначення КНД. Коефіцієнт спрямованої дії - це число, що показує, у скільки разів довелося б збільшити потужність випромінювання антени під час переходу від спрямованої антени до неспрямованої за умови збереження однакової напруженості поля в місці прийому (за інших рівних умов):

$$D = \frac{P_{\text{ненаправ.антена}}}{P_{\text{дослід.антена}}} \quad (2.2)$$

КНД є функцією напрямку. Виділяють напрямок максимального випромінювання і відповідний йому КНД. КНД може мати величину від одиниць (в елементарного вібратора - 1,5; у симетричного вібратора - 1,64) до багатьох тисяч (у дзеркальних антен  $10^8$ ). Він показує вигравш у потужності, який можна отримати за рахунок використання спрямованої дії антени, але не враховує можливих втрат у спрямованій антені. Втрати враховуються коефіцієнтом корисної дії (ККД).

Коефіцієнт посилення антени (КП) дорівнює добутку КНД на ККД.

## 2.3 Вібраторні антени

Різні види симетричних вібраторних антен наведено на рисунку 2.2.

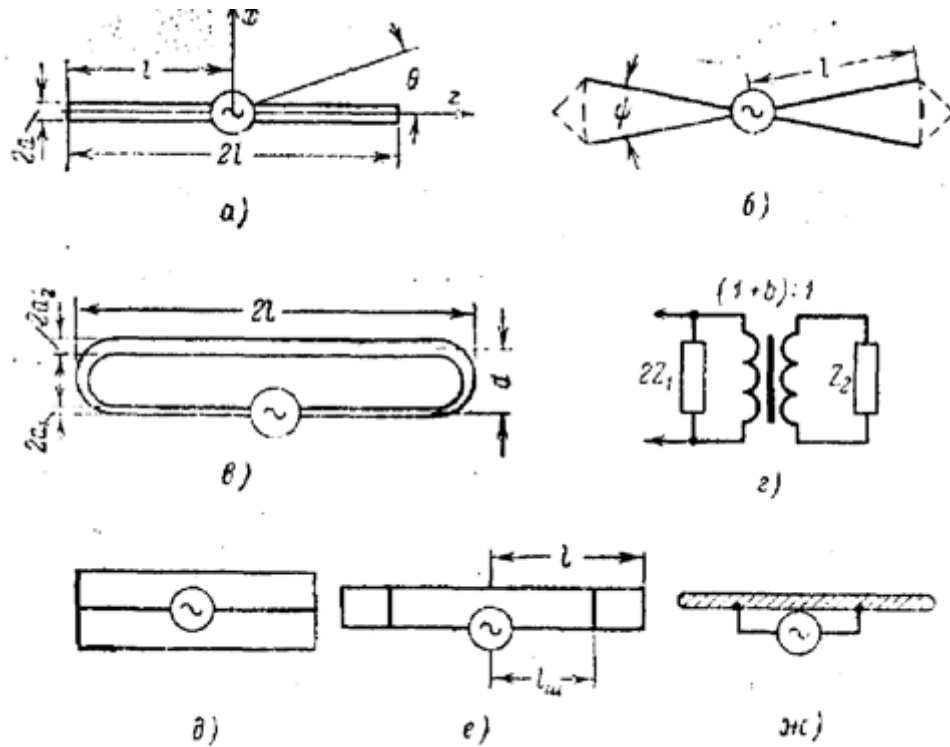


Рисунок 2.2 - Симетричні вібратори:

- а - циліндричний вібратор; б - біконічний вібратор;  
 в - петльовий вібратор Пістолькорса; г - еквівалентна схема петльових вібраторів; д - двопетльовий вібратор;  
 е - петльовий вібратор із додатковими перемичками; ж - шунтовий вібратор

Симетричний вібратор являє собою прямолінійний провідник циліндричної форми із симетричним відносно середини провідника розподілом струму (рисунок 2.2, а). Параметри такої антени можуть бути легко визначені, якщо відомий розподіл струму вздовж дроту. Однак строгого розв'язання задачі про розподіл струму вздовж вібратора виробничого діаметра поки що немає.[11]

Вельми діапазонним є шунтовий вібратор. Ідея такого вібратора полягає в застосуванні шунта у вигляді короткозамкненої лінії, приєднаного до

симетричних відносно центру вібратора точок, що компенсує зміну вхідного опору вібратора, а саме вхідного опору вібратора зі зміною частоти. На практиці знайшов широке застосування дротяний варіант шунт-тового вібратора. Зазвичай вібратор виконують із шести проводів, причому шлейф утворюють два верхні дроти, з'єднані разом, і чотири нижні дроти, також з'єднані разом (рисунок 2.3, б).

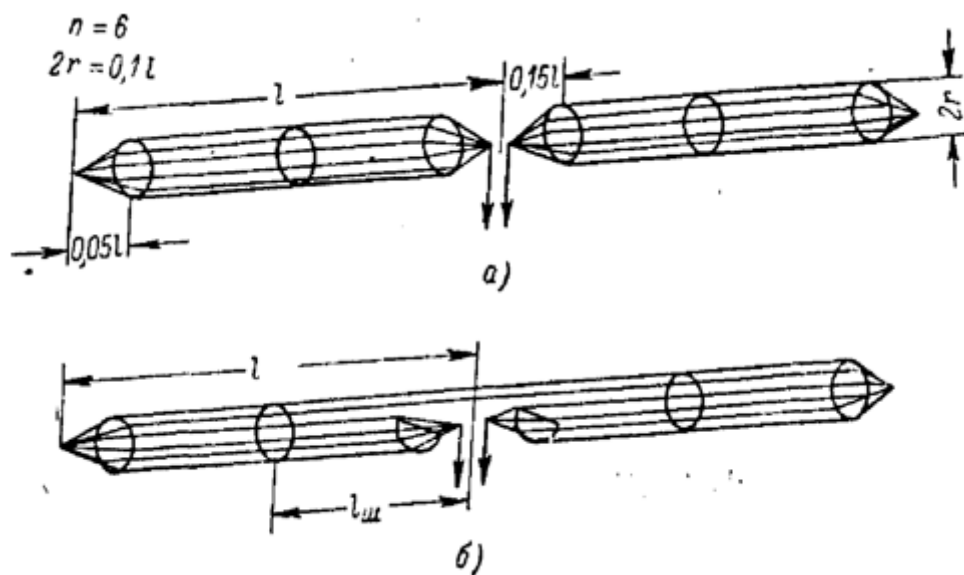


Рисунок 2.3 - Диполь Надененка:

а - звичайний варіант; б - варіант із шунтовим живленням

Біконічний вібратор являє собою два кругові металеві конуси, що мають спільну вісь і звернені одна до одної вершини (рисунок 2.2, б).

ДН біконічних вібраторів має тільки один провал до нуля в напрямку осі вібратора. В інших напрямках, навіть за відношення довжини плеча вібратора  $l$  до довжини хвилі, більших за одиницю, провалів до нуля немає.

Біконічний вібратор є широко діапазонною антеною як за вхідним опором, так і за спрямованими властивостями. Максимум ДН орієнтований перпендикулярно до осі вібратора в дуже великих межах зміни.

Петльовий вібратор являє собою два (або кілька) близько розташованих і паралельних один одному циліндричних вібратори, кінці яких з'єднані перемичками (рисунок 2.2, в). Діаметри вібраторів можуть бути або однакові, або

різні. В останньому випадку підбором діаметрів можна в деяких межах змінювати вхідний опір петлевого вібратора.

Зазвичай використовують петльові вібратори, що мають довжину  $0,5 \lambda$ . У цьому випадку ДН петлевого вібратора практично збігається з ДН звичайного симетричного напівхвильового вібратора.

#### 2.4 Амплітудна діаграма спрямованості

Амплітудна ДН передавальної антени - залежність інтенсивності електромагнітного поля, випромінюваного антеною, або його окремих компонент від кутових координат у просторі.

Амплітудна ДН безпосередньо характеризує спрямовані властивості антени, тобто її здатність концентрувати електромагнітну енергію в заздалегідь обраному секторі простору. Визначається за полем або за потужністю. Діаграма спрямованості антени є графічним представленням випромінювальних властивостей антени як функції напрямку випромінювання.

ДН за відносною величиною поля. Цей тип діаграм показує, яким чином на заданій відстані від антени залежно від кутових координат змінюється напруженість електричного поля. ДН за полем зазвичай забезпечує гарнішу роздільну здатність під час реєстрації бічних пелюсток і водночас дає змогу виявити невеликі зміни величини поля поблизу точок, що відповідають його максимальному значенню.

Якщо ДН випромінювання відноситься до напруженості полів, виражених в електричних одиницях, таких, наприклад, як вольт на метр, то потік потужності має розмірність ват на квадратний метр, і така ДН називається абсолютною. Абсолютна ДН, нанесена у вигляді ліній рівних напруженості поля на географічну карту, виявляється надзвичайно корисною для радіопередавальних станцій, оскільки вона дає змогу визначити географічні зони, у межах яких здійснюється впевнене приймання мовлення.

Діаграма спрямованості за відсноною потужністю. Дані діаграми спрямованості показують зміну щільності потужності на заданій відстані від антени як функцію кутових координат. Використання ДН за потужністю найдоцільніше при визначенні малих змін потужності, що лежать у діапазоні значень від 10% до 100% від максимального значення потужності. Зміни потужності, що лежать нижче 10% рівня повної потужності, важко вирішити без зміни рівня посилення. ДН за потужністю використовують під час розрахунків КНД антен та іноді під час проведення вимірювань із визначення ширини променя антени за рівнем половинної потужності, тому що на високих рівнях сигналу досяжна більш роздільна здатність. Використання ДН такого типу, очевидно, недоцільне у випадках, коли розглядаються антени з низьким рівнем бічних пелюсток і антени з великим відношенням ефективності випромінювання вперед/назад.

Однак найчастіше ДН антен характеризуються відносними одиницями, тобто напруженість поля, або густина потужності представляються у вигляді їхнього відношення до певної величини, за яку зазвичай приймають відповідну величину в напрямку максимуму променя, тобто в місці максимальної напруженості поля. Нормована ДН випромінювання є функцією двох змінних і характеризує кутовий розподіл поля, що формується антеною в її дальній зоні.

Діаграма спрямованості за полем

зазвичай нормується таким чином, що її максимум дорівнює одиниці. Квадрат цієї функції збігається з нормованим кутовим розподілом вектора Пойтінга.

Ампліудна ДН може бути отримана як розрахунковим, так і експериментальним шляхом.

Для перерізів ДН використовують полярні або декартові координати в різних масштабах: лінійному (за полем), квадратичному (за потужністю) або логарифмічному (шкала децибел).

Доцільність використання логарифмічного масштабу під час реєстрації

ДН антени, в основному, визначається двома факторами.

Є кілька методів подання даних, що характеризують ДН антени. При цьому вважають, що ДН антени є функцією кутових координат за заданих значень поляризації, частоти і фіксованих умов. Тривимірний графік. Тривимірний графік. Внаслідок того, що сама ДН тривимірна, часто ДН також представляють у тривимірному вигляді. Подібне подання має низку очевидних недоліків, через які воно використовується дуже рідко: - труднощі передавання даних у стислій формі та їхнього зберігання; - незручність відображення кількісних даних; - труднощі швидкого й точного відновлення поверхні на основі отриманих під час вимірювань або обчислень даних.

Перерізи відносного посилення як функції кута. ДН антени може бути описана за допомогою сімейства двовимірних графіків. Зазвичай ці двовимірні графіки отримують під час запису величини відносного посилення як функції однієї з кутових координат. При цьому в кожному перерізі фіксується взаємно ортогональна координата, величина якої змінюється при переході від перерізу до перерізу. Результати подаються в цікавому кутовому діапазоні.

Оскільки ДН у будь-якій площині або на конічній поверхні містить у собі як змінну тільки одну кутову координату, вона може бути представлена в полярній системі координат (рисунок 2.4) або в прямокутній (декартовій) системі координат (рисунок 2.5). Варто зазначити, що подання в полярній системі координат містить зручну наочну інформацію про просторовий розподіл пелюсток випромінювання. Під час розгляду антен з вузьким променем часто використовують подання в прямокутній системі координат, оскільки при цьому легко досягається зміна масштабу запису даних.

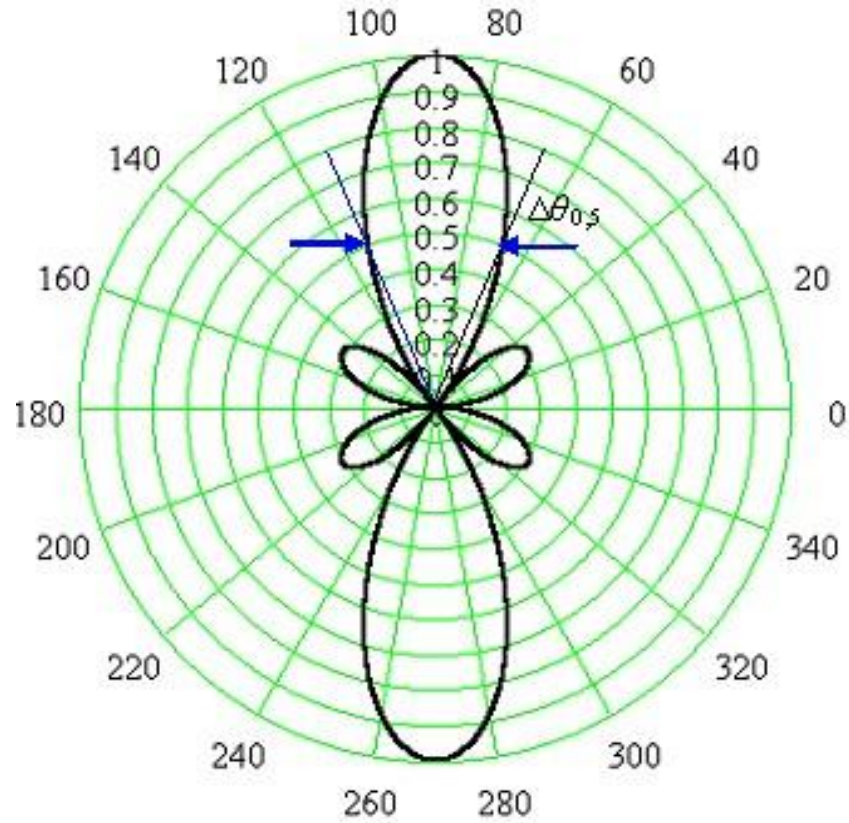


Рисунок 2.4 - ДС у полярних координатах

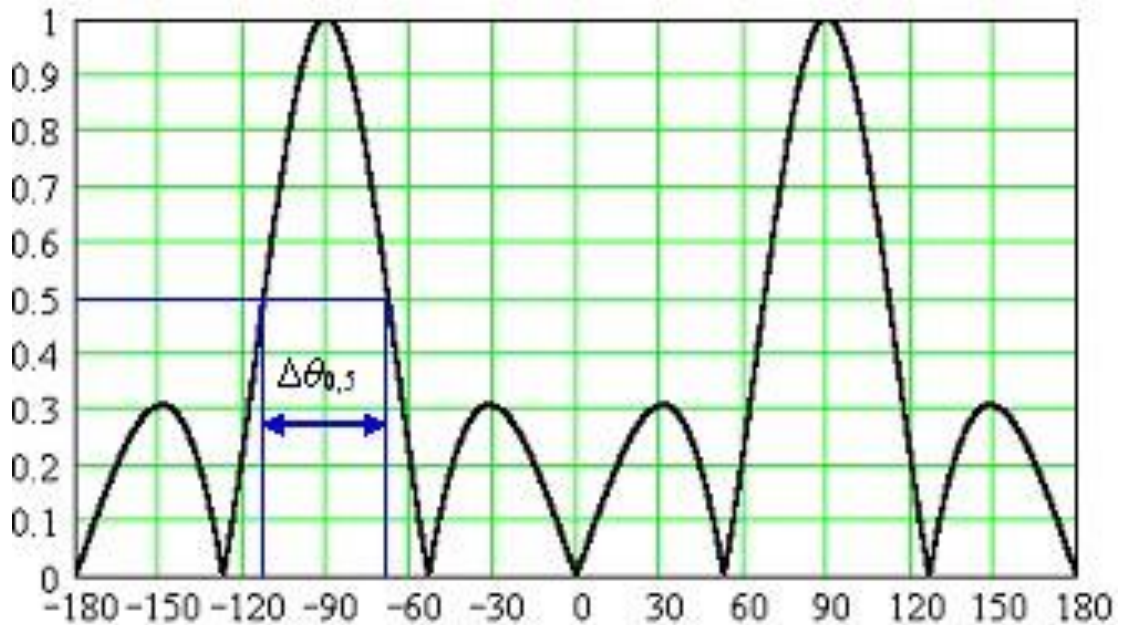


Рисунок 2.5 - ДС у декартових координатах

Під час побудови ДН у їхніх різних уявленнях у якості ординат найчастіше використовують такі величини - відносна потужність, відносна

величина поля і логарифм відносного посилення.

Контурний графік. Повна ДН антени може бути представлена на одному графіку. Для цього необхідно з'єднати лініями точки з однаковими значеннями величини сигналу, які при цьому утворюють контурні лінії рівного сигналу, подібно до ізоліній топографічних контурних карт. Для інтерпретації графіків на ключових лініях ставлять числові позначення. Головна незручність при такому поданні даних полягає в тому, що надзвичайно ускладнене отримання даних для автоматичного оброблення діаграм.

## 3. РОЗРОБКА АНТЕНИ

### 3.1 Інструмент розробки

Розробка антени проводилась в MMANA GAL. Це потужний і популярний інструмент для моделювання антен, який використовують радіоаматори та професіонали.

MMANA-GAL використовується для моделювання та аналізу різних типів антен. Вона дає змогу користувачам створювати, редагувати й тестувати антени у віртуальному середовищі, перш ніж розпочати їхнє реальне складання та встановлення.

Функціональні можливості:

Графічний інтерфейс: Зручний графічний інтерфейс дає змогу користувачам легко створювати і модифікувати моделі антен.

Розрахунок характеристик: Програма розраховує важливі параметри антен, такі як діаграми спрямованості, коефіцієнт посилення, вхідний опір і КСВ (коефіцієнт стоячої хвилі).

3D-візуалізація: MMANA-GAL підтримує тривимірне відображення діаграм спрямованості антен, що допомагає краще розуміти їхню поведінку.

Оптимізація: Програма включає інструменти для автоматичної оптимізації параметрів антени для досягнення найкращих характеристик.

Основні компоненти програми:

Редактор антен: Дозволяє створювати і редагувати моделі антен з використанням простих геометричних примітивів і елементів.

Симулятор: Виконує розрахунки електромагнітного поля і характеристик антени на основі методу моментів (МоМ).

Аналізатор результатів: Надає різні графіки та звіти за результатами моделювання, включно з імпедансом, КСВ, діаграмами спрямованості та посиленням.

Приклади використання:

Радіоаматори: Радіоаматори використовують MMANA-GAL для проектування та оптимізації антен для своїх радіостанцій.

Професійні інженери: Професіонали в галузі радіозв'язку та радіолокації застосовують програму для розроблення та аналізу антен у різних додатках.

Сумісність і вимоги:

Операційні системи: Програма працює на Windows, але може бути запущена і на інших платформах з використанням емуляторів.

Формати файлів: Підтримує імпорт і експорт моделей у різних форматах, що полегшує обмін даними з іншими інструментами.

### 3.2 Вибір та розробка антени

Вибір антени для 5G мереж залежить від багатьох факторів, включаючи тип середовища, в якому вона буде використовуватись, а також вимоги до покриття та швидкості передачі даних. Всенаправлена антена (рисунок 3.1) може бути кращим вибором в деяких випадках з наступних причин.

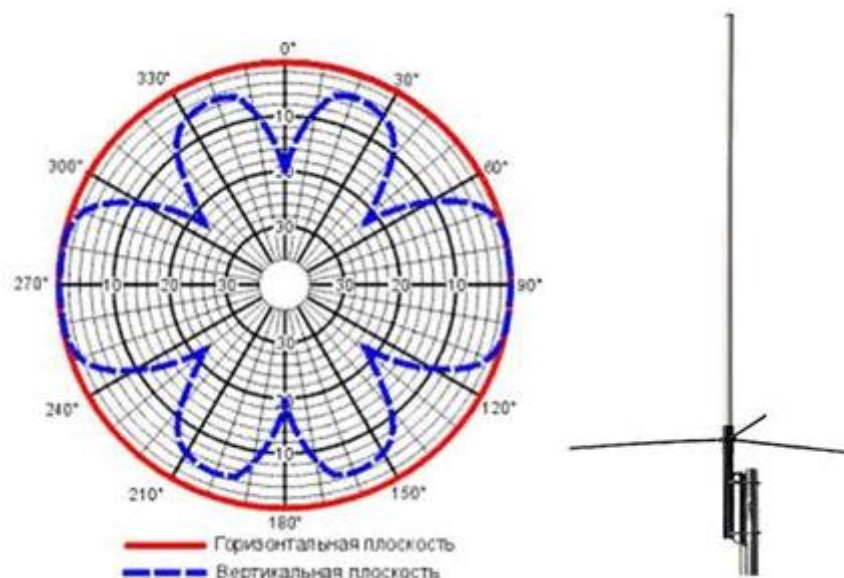


Рисунок 3.1 - Всенаправлена антена

Широке покриття: Всенаправлена антена випромінює сигнал в усіх напрямках, забезпечуючи рівномірне покриття у всіх напрямках навколо антени. Це може бути корисним у міських середовищах або в місцях з високою щільністю користувачів, де необхідно покрити велику площу без значного зниження рівня сигналу.

Зручність встановлення: Всенаправлену антену легше встановити, оскільки не потрібно точно спрямовувати її в бік базової станції або користувачів. Це може зекономити час і кошти на монтаж.

Рухомі користувачі: Якщо передбачається, що користувачі будуть рухатися, наприклад, в транспортних засобах або на пішохідних доріжках, всенаправлена антена забезпечить стабільний зв'язок незалежно від зміни їхнього положення.

Простота у використанні в різних умовах: Всенаправлені антени добре підходять для встановлення в місцях з обмеженими можливостями для точного налаштування направлених антен, таких як будівлі з великою кількістю перепон або в місцях зі складними умовами для установки.

Однак, варто зазначити, що всенаправлені антени також мають свої обмеження, такі як менший коефіцієнт посилення в порівнянні з направленими антенами, що може знижувати ефективність використання частотного спектру і зменшувати максимальну досяжну швидкість передачі даних. Тому вибір антени повинен бути збалансованим і враховувати конкретні вимоги мережі та умов експлуатації.

Геометрія антени для частоти 28 ГГц.

Довжина хвилі  $\lambda = \frac{c}{f}$  де  $c$  - швидкість світла,  $f$  - частота.

Для 28 ГГц ( $28 \times 10^9$ )

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{28 \times 10^9} = 0.0107 \text{ м} \quad (3.1)$$

Чвертьхвильова довжина:  $\frac{\lambda}{4} \approx 0.002675$  м (або 2.675 мм).

Для проектування антени, що працює на частоті 28 ГГц, ми можемо використовувати просту плоску мікросмужкову антену, таку як мікросмужкова друкована антена.

Субстрат: FR4 з діелектричною проникністю 4.4 і товщиною 1.6 мм.

Провідник: Мідь, товщиною 35 мкм.

Розміри антени:

Довжина антени (L): 8.5 мм

Ширина антени (W): 6 мм

Ширина подачі (Feed width): 1 мм

Відстань від краю антени до подачі (Feed offset): 2 мм

Подача живлення: Мікросмужкова лінія з імпедансом 50 Ом.

Розміщення антени: На односторонній друкованій платі, знизу від неї.

Геометрія провідника:

Провідник антени прямокутної форми, розташований на поверхні субстрату.

Подача живлення під'єднана до одного з країв провідника (зазвичай до короткої сторони).

Геометрія зображена на рисунку 3.2

Геометрія								
Вид Вьчислення Диаграмма направленности								
Имя *	Частота 28000 МГц						<input type="checkbox"/> в лямбдах	
Проводов 5	Автосегментация: DM1 800		DM2 80	SC 2.0	EC 2	<input type="checkbox"/> Не разрывать		
No.	X1(m)	Y1(m)	Z1(m)	X2(m)	Y2(m)	Z2(m)	R(mm)	Seg.
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0085	0.1	-1
2	0.0	0.0	0.0	0.0085	0.0	0.0	0.0	-1
3	0.0	0.0	0.0	-0.0085	0.0	0.0	0.0	-1
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.006	0.0	0.0	-1
5	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.006	0.0	0.0	-1
след.								

Рисунок 3.2 – Геометрія антени

У MMANA-GAL можна вказати матеріал провідників антени, щоб врахувати його вплив на характеристики антени. Зазвичай матеріали

провідників задаються через їхній питомий опір (resistivity) і діелектричну проникність (permittivity). У MMANA-GAL є зумовлені значення для стандартних матеріалів, таких як мідь, алюміній та інші. Нами був обраний мідний дріт. Питомий опір (resistivity):  $1.72 \times 10^{-8}$  Ом. Діелектрична проникність (permittivity): 1 (оскільки провідник)

У MMANA-GAL можна задати параметри реальної землі, як-от провідність (conductivity) і діелектрична проникність (permittivity), щоб врахувати вплив землі на характеристики антени. Ці параметри можна встановити в налаштуваннях землі.

Для реальної землі використовуються два основні параметри:

Conductivity (провідність): зазвичай вимірюється в Сіменсах на метр (S/m).

Permittivity (діелектрична проникність): безрозмірна величина, яка зазвичай більша за 1.

Для моделювання антени, встановленої в міському середовищі, важливо враховувати параметри землі, характерні для таких умов. У містах ґрунт зазвичай має вищу провідність через присутність різних матеріалів, таких як бетон, асфальт і метал. Під час моделювання антен у міських умовах можна використовувати такі приблизні параметри:

Параметри землі для міського середовища:

Conductivity (провідність): 0.03 S/m

Permittivity (діелектрична проникність): 15

Ці значення є усередненими характеристиками для міського середовища, що включає бетонні будівлі, асфальтові покриття та металеві конструкції.

На рисунку 3.3 представлені розрахунки антени

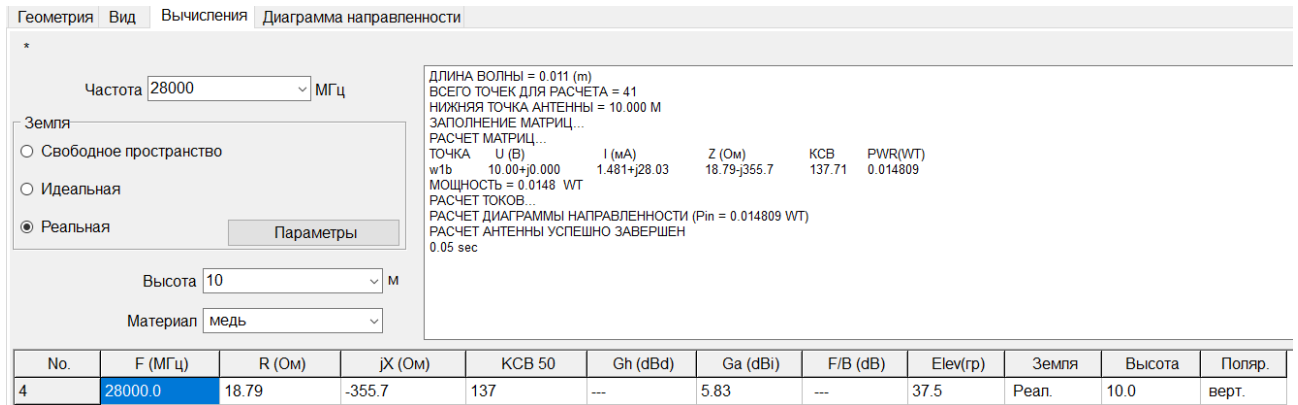


Рисунок 3.3 – Розрахунки антени

Отримані значення  $R=18.76$  Ом,  $jX=-355.8$  Ом, і  $KСХ=137$  вказують на хороше узгодження антени.

$R$  близько до 50 Ом, що є хорошим результатом для узгодженої антени.

$jX$  показує невеликий реактивний опір, що може бути покращено, але не є критичним при поточному значенні.

$KСВ=137$  також вказує на поліпшення узгодження, хоча і не є ідеальним значенням 1.

Загалом, ці значення свідчать про те, що антена близька до правильного узгодження з фідером на частоті 28 ГГц, але є невеликий простір для поліпшення. На рисунках 3.4 та 3.5 показані діаграми спрямованості антени

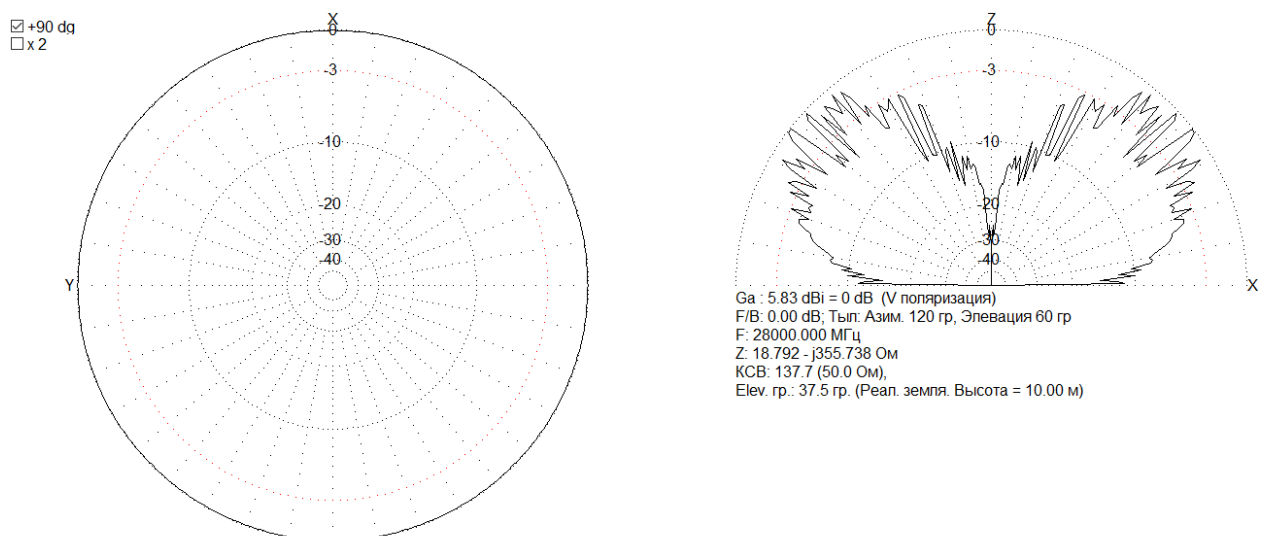


Рисунок 3.4 – 2D діаграма спрямованості антени

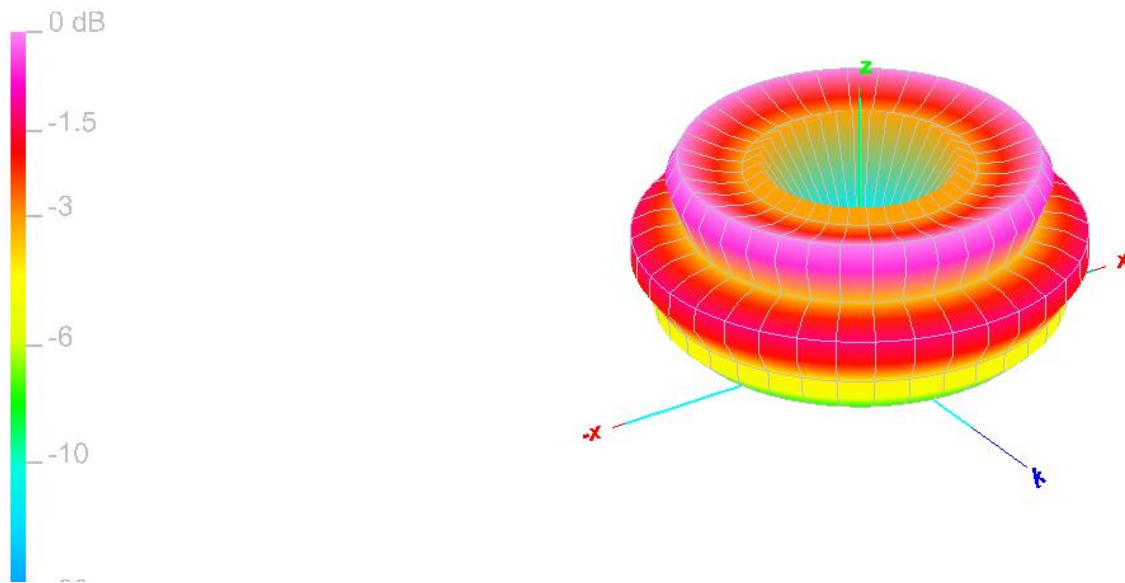


Рисунок 3.5 – 3D діаграма спрямованості антени

Для визначення відстані, на якій випромінюватиме антена, важливо враховувати кілька чинників, як-от потужність випромінювання, чутливість приймача, перешкоди на шляху поширення сигналу та ефективність антени.

Для цієї антени, що працює на частоті 28 ГГц, радіус покриття залежатиме від цих факторів. У загальному випадку, на відкритій місцевості без перешкод, антена може забезпечити зв'язок на відстань від кількох десятків до кількох сотень метрів.

При характеристиках

Частота роботи: 28 ГГц

Потужність передавача (Pt): 1 Вт (30 dBm)

Коефіцієнт посилення передавальної антени (Gt): 20 dBi

Коефіцієнт посилення приймальної антени (Gr): 20 dBi

Чутливість приймача (Pr): -90 dBm

Системні втрати (Lsys): 10 dB

Розрахунок загасання на вільному просторі (FSPL) для 100 метрів

$$FSPL = 20 \log_{10}(100) + 20 \log_{10}(28 \times 10^9) - 147.55$$

$$FSPL \approx 40 + 88.94 + 180 - 147.55$$

FSPL $\approx$ 161.39 дБ

Перерахунок потужності на приймачі (Pr)

Формула для розрахунку потужності на приймачі:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - FSPL - L_{sys} \quad (3.3)$$

$$P_r = -96.39 \text{ dBm}$$

За системних втрат у 5 dB, потужність на приймачі становитиме -96.39 dBm, таким чином, для досягнення зв'язку на 100 метрів на частоті 28 ГГц з надійністю, необхідно використовувати наступні показники:

Потужність передавача: 1 Вт (30 dBm)

Посилення антен: 20 dBi

Системні втрати: мінімізовані до 5 dB

## ВИСНОВКИ

У процесі дослідження теоретичних основ та моделювання антен високочастотних діапазонів для радіозв'язку на основі технологій 5G було досягнуто таких висновків:

Значення 5G у сучасних технологіях: Технологія 5G відіграє ключову роль у розвитку мобільних комунікацій та Інтернету речей (IoT), забезпечуючи високі швидкості передачі даних та покращену якість зв'язку.

Використання високочастотних діапазонів: Використання високочастотних діапазонів у технології 5G вимагає нових підходів до проектування антен, що зумовлено необхідністю забезпечення високої ефективності та стійкості до перешкод.

Аналіз літератури та попередніх досліджень: Аналіз літературних джерел та результатів попередніх досліджень дозволив визначити основні принципи роботи високочастотних антен, важливі параметри проектування та їх вплив на ефективність зв'язку.

Основні принципи роботи антен: Розглянуті основні принципи роботи високочастотних антен, такі як випромінювальна здатність, спрямованість, коефіцієнт посилення та інші параметри, що визначають їхню ефективність у системах 5G.

Сучасні підходи до реалізації антен: Проведений аналіз сучасних підходів до реалізації високочастотних антен дозволив визначити найбільш перспективні напрямки подальших досліджень у цій області, зокрема використання нових матеріалів та технологій для покращення параметрів антен.

Розробка всенаправленої антени: У рамках роботи була розроблена всенаправлена антена та розрахована її дальність роботи, що є важливим кроком у напрямку підвищення ефективності систем 5G.

Таким чином, проведене дослідження підтвердило важливість та перспективність використання високочастотних антен у технології 5G, а також окреслило основні напрямки для подальших досліджень та розробок у цій сфері.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. de Looper, Крістіан "Що таке 5G? Мережа нового покоління пояснила". // Цифрові тренди. 27 березня 2020 р. 103 с.
2. ITU towards “IMT for 2020 and beyond”// M.2083 : IMT Vision — "Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond" (англ.). // Approved in 2015-09 International Telecommunications Union.//Recommendation M.2083-0 - Updated: 2015-10-12. 21 р.
3. Horwitz, Jeremy "Остаточний посібник щодо 5G низьких, середніх і високих діапазонів швидкості"//Інтернет-журнал VentureBeat. 10 грудня 2019 р. 1008 с.
4. Tsora O., Dudka O., Merzlikin A., Astrashkov M. Performance Evaluation of 5G MillimeterWave Cellular Network in dense Urban Development / Journal Review of International Geographical Education. – SPRING, 2021; – №11(8); – pp. 15921600. (Scopus)
5. Шатруган Сінгх "Вісім причин, чому 5G краще, ніж 4G" . Altran . 25 травня 2019 року. 305 с.
6. Rapraort, TS; Сонце, Шу; Майзус, Р .; Чжао, повісити; Азар, Ю .; Ван, К .; Вонг, GN; Шульц, Ж.К .; Самімі, М. "Мобільний зв'язок міліметрової хвилі для стільникового зв'язку 5G: це буде працювати!". Доступ до IEEE . 1 : 335–349. doi : 10.1109 / ДОСТУП.2013.2260813 . ISSN 2169-3536. 1 січня 2013 р
7. Романенко Є.С., Гагіна О.М. Система збору даних із використанням технології WIMAX : ФЕЕ :: 2021.
8. Романенко Є.С., Гагіна О.М., Погуляй О.Р. Коди Фібоначчі в системах обробки інформації : ФЕЕ :: 2021.
9. Gurinder Kaur and Komal Sharma, "Review paper on 5G technology" assistant professor of department of electronics and communication, rayatbakra university, ISSN NO: 2321-0613
10. “Wireless Technology Evolution Towards 5G: 3GPP Release 13 to Release 15 and Beyond.” 5G Americas, Feb. 2017

11. “LTE to 5G: The Global Impact of Wireless Innovation.” 5G Americas/Rysavy Research White Paper, Rysavy Research/5G Americas, Aug. 2018.