

Хмельницький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

**ДИПЛОМНА РОБОТА**

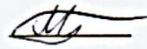
другого (магістерського) рівня  
Освітній рівень

**ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ** 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»  
Шифр і назва галузі  
**СПЕЦІАЛЬНІСТЬ** 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»  
Шифр і назва спеціальності  
**ОСВІТНЯ ПРОГРАМА** «Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі»  
Назва освітньої програми

на тему Антенна решітка GPS сигналу на базі спіральних і патч-антен

Шифр ДРЕКР.024024.01.01.ПЗ

Виконав: здобувач 2 курсу, група ЕКРм-24-1



М.О. Коваль

Підпис

Ініціали, прізвище

Керівник:



С.К. Підченко

Підпис

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

зав. кафедри 

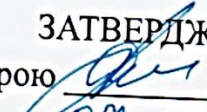
«15» травня 2025 р.

Хмельницький, 2025

## ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Хмельницький національний університет

Факультет	«Інформаційних технологій»
Кафедра	«Телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій»
Освітній рівень	Другий (магістерський)
Галузь знань	17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»
Спеціальність	172 «Електронні комунікації та радіотехніка»
Освітня програма	«Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедру   
« 1 » 09 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Ковалю Максиму Олеговичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1 Тема роботи: Антенна решітка GPS сигналу на базі спіральних і патч-антен  
керівник роботи: Підченко С.К., д.т.н., професор

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом по університету від «25» серпня 2025р. № 65

2 Термін подання здобувачем роботи на кафедру 1.12.2025р

3 Вихідні дані до роботи (Частотний діапазон: 1200-1600 МГц, Коефіцієнт підсилення 15.5 дБ, КСХН < 3, Габарити 400×400×295 (мм)

Мета роботи: Розроблення конструкції та дослідження моделі антенної решітки GPS сигналу на базі спіральних антен

Об'єкт дослідження: Процес формування та приймання GPS-сигналів за допомогою антенної решітки.

Предмет дослідження: Конструктивні параметри та характеристики антенної решітки на базі спіральних антен.

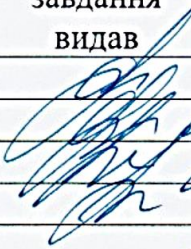

4 Зміст ПЗ (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Аналіз сучасних систем супутникової навігації; 2. Антени для GPS-навігації: конструкції, матеріали, параметри; 3. Теорія антенних решіток для GPS та їх функціональні можливості;

4 Розрахунок і моделювання антенної решітки.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):

19 презентаційних слайдів

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Підченко С.К., д.т.н., професор		
2	Підченко С.К., д.т.н., професор		
3	Підченко С.К., д.т.н., професор		
4	Підченко С.К., д.т.н., професор		

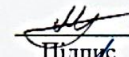

7 Дата видачі завдання 1.09.25р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Найменування етапу (розділу) дипломної роботи	Термін виконання етапу роботи	Примітка
1	Вибір напряму дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.09.2025	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	30.09.2025	виконано
3	Робота над розділом 1 – Аналіз сучасних систем супутникової навігації	10.10.2025	виконано
4	Робота над розділом 2 – Антени для GPS-навігації: конструкції, матеріали, параметри	20.10.2025	виконано
5	Робота над розділом 3 – Теорія антенних решіток для GPS та їх функціональні можливості	15.11.2025	виконано
6	Робота над розділом 4 – Розрахунок і моделювання антенної решітки	19.11.2025	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	23.11.2025	виконано
8	Попередній захист	24.11.2025	виконано
9	Захист роботи на засіданні ЕК	16.12.2025	<i>Виконано</i>

Здобувач

Керівник роботи

  
Підпис  
  
Підпис

М.О. Коваль  
Ініціали, прізвище

С.К. Підченко  
Ініціали, прізвище

## АНОТАЦІЯ

Тема дипломної роботи: «Антенна решітка GPS сигналу на базі спіральних і патч-антен»

Автор роботи: Коваль Максим Олегович

Керівник роботи: д.т.н., професор Підченко С.К.

Пояснювальна записка: 117 сторінок, 23 рисунка, 7 таблиць, 82 джерел,

Графічна частина: 19 презентаційних слайдів.

Ключові слова: GPS, Спіральна антена, Антенна решітка.

Мета роботи: Розроблення конструкції та дослідження моделі антенної решітки GPS сигналу на базі спіральних антен, а також визначення оптимальних параметрів її геометрії, взаємного розташування та узгодження елементів з метою забезпечення високої якості приймання сигналів у відповідних частотних діапазонах.

Об'єкт досліджень: Процес формування та приймання GPS сигналів за допомогою антенної решітки.

Предмет дослідження: конструктивні параметри та характеристики антенної решітки на базі спіральних антен.

Проведено аналіз сучасних супутникових радіонавігаційних систем, розглянуто особливості обробки сигналів GPS (L1/L2/L5), визначено основні джерела похибок позиціонування та сформульовано вимоги до антенних систем нового покоління. Досліджено конструкції та параметри спіральних і патч антен. Обґрунтовано вибір циліндричної спіральної антени як базового елемента решітки завдяки її стабільності фазового центру, широкосмуговості та кращим поляризаційним характеристикам. Розглянуто теоретичні засади побудови антенних решіток для GPS, розглянуто принципи формування електромагнітного поля, методи оптимізації геометричних параметрів та особливості проектування розподільчих мереж живлення. Проведено розрахунок та моделювання спроектованої антенної решітки розмірністю  $2 \times 2$  та представлено їх результати.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	6
ВСТУП .....	7
Розділ 1 Аналіз сучасних систем супутникової навігації.....	11
1.1 Структура та принципи функціонування супутникових навігаційних систем .....	11
1.2 Особливості прийому та обробки сигналів модернізованої системи GPS (L1/L2/L5) .....	16
1.3 Основні джерела похибок позиціонування та методи їх компенсації.....	28
Висновки до розділу 1 .....	37
Розділ 2 Антени для GPS-навігації: конструкції, матеріали, параметри .....	39
2.1 Спіральні антени: типи, геометрія, поляризаційні властивості ...	39
2.2 Патч-антени: діелектричні матеріали, методи збудження, конструктивні варіанти .....	46
2.3 Порівняння спіральних і патч-антен .....	50
2.4 Стабільність фазового центра антен у GPS-приймачах .....	53
Висновки до розділу 2 .....	56
Розділ 3 Теорія антенних решіток для GPS та їх функціональні можливості .....	58
3.1 Теоретичні засади формування електромагнітного поля та принципи побудови антенних решіток супутникової навігації.....	58
3.2 Математичне моделювання та методи оптимізації геометричних параметрів випромінювачів.....	62
3.3 Проектування та електродинамічне узгодження розподільчих мереж живлення антенних решіток.....	65
3.4 Аналіз характеристик та енергетичного бюджету радіоканалів ..	69
Висновки до розділу 3 .....	73
Розділ 4 Розрахунок і моделювання антенної решітки.....	75
4.1 Розрахунок спіральної антени.....	76
4.2 Розрахунок антенної решітки.....	83
4.3 Моделювання одиночного випромінювача та антенної решітки .	88
Висновки до розділу 4 .....	101
ВИСНОВКИ.....	103
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ТА ПОСИЛАННЯ .....	108
ДОДАТОК А .....	118
ДОДАТОК Б.....	128

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АР – Антенна решітка.

ГНСС – Глобальна навігаційна супутникова система.

РЕБ – Радіоелектронна боротьба.

КСХН – Коефіцієнт стоячої хвилі напруги.

КП – Кругова поляризація.

ОВ – Осьове відношення .

ДС – Діаграма спрямованості.

КСА – Квадрифілярна спіральна антена.

ПКП – Права кругова поляризація.

ЛКП – Ліва кругова поляризація.

КРЧ – Кінематика реального часу.

МТП – Метод точного позиціонування.

ВФЦ – Варіація фазового центру.

ВГЦ – Варіація групової затримки.

## ВСТУП

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій та систем навігації характеризується критичною залежністю від супутникових радіонавігаційних систем (ГНСС), таких як GPS (NAVSTAR), Galileo, GLONASS та Beidou. Забезпечення високоточного позиціонування та синхронізації часу є необхідною умовою для функціонування широкого спектру галузей: від цивільної авіації, геодезії та автономного транспорту до систем спеціального призначення та оборонного комплексу.

Однак, із зростанням ролі ГНСС, пропорційно зростають і вимоги до надійності приймального обладнання. Суттєвою проблемою сучасних навігаційних систем є їх вразливість до навмисних та ненавмисних завад. Низький рівень потужності сигналу, що надходить від супутників, робить його легкою мішенню для засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) або індустріальних перешкод. Крім того, в умовах щільної міської забудови або складного рельєфу виникає ефект багатопроменевого поширення сигналу, що суттєво знижує точність визначення координат.

Традиційні рішення на базі поодиноких мікросмужкових (патч) антен, незважаючи на їх низький профіль та дешевизну, часто виявляються неспроможними забезпечити стабільний прийом в умовах складної електромагнітної обстановки. Вузька смуга робочих частот та обмежені можливості щодо формування діаграми спрямованості (ДС) патч-антен стимулюють пошук більш ефективних рішень.

Найбільш перспективним напрямом вирішення цієї проблеми є використання адаптивних антенних решіток (АР). Використання просторово-часової обробки сигналів в антенних решітках дозволяє

формувати "нулі" в ДС у напрямку джерел завад та підсилювати корисний сигнал.

У цьому контексті особливої уваги заслуговує вибір випромінювального елемента решітки. Хоча патч-антени є стандартом "де-факто" для мобільних пристроїв, спіральні антени мають ряд електродинамічних переваг, які є критичними для високоточних систем. Спіральні антени в режимі осьового випромінювання забезпечують стабільну кругову поляризацію в широкому кутовому секторі, мають ширшу смугу пропускання та високий коефіцієнт підсилення. Саме тому дослідження можливості побудови АР на базі спіральних випромінювачів, їх моделювання та порівняння з класичними патч-рішеннями є актуальним науково-технічним завданням.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності та завадозахищеності систем GPS-навігації шляхом розробки та електродинамічного моделювання АР на базі спіральних антен, а також порівняльний аналіз її характеристик з аналогічною решіткою на основі мікросмужкових випромінювачів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- Провести аналітичний огляд сучасних методів побудови антенних систем для ГНСС, проаналізувати переваги та недоліки спіральних та мікросмужкових антен.
- Розрахувати геометричні та електродинамічні параметри поодинокого спірального випромінювача для діапазонів GPS L1/L2, забезпечивши необхідний коефіцієнт еліптичності.
- Синтезувати конструкцію антенної решітки на основі розрахованих спіральних елементів, визначити

оптимальну топологію розміщення випромінювачів для мінімізації взаємного впливу.

- Створити комп'ютерні електродинамічні моделі (у середовищі Ansys HFSS) для АР: на базі спіральних антен.
- Провести імітаційне моделювання та отримати основні характеристики: ДС, коефіцієнт підсилення, рівень бічних пелюсток, узгодження (S-параметри) та коефіцієнт еліптичності.

Об'єкт дослідження — процес прийому та обробки електромагнітних хвиль супутникових навігаційних систем антенними решітками.

Предмет дослідження — конструктивні параметри та електродинамічні характеристики (ДС, коефіцієнт підсилення, поляризаційні властивості) антенної решітки на базі спіральних антен.

Методи дослідження. У роботі використано комплексний підхід, що базується на:

- теорії антен і поширення радіохвиль — для розрахунку параметрів спіральних та патч-антен;
- метод скінченних елементів (МСЕ) та метод скінченних інтегралів — для чисельного електродинамічного моделювання антенних структур у спеціалізованих програмних пакетах;
- методах порівняльного аналізу — для оцінки ефективності запропонованих конструкцій.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- Отримано подальший розвиток моделі спіральної антени для дводіапазонного режиму роботи GPS, яка відрізняється оптимізованими геометричними параметрами витків, що дозволило покращити коефіцієнт еліптичності на краях робочого діапазону.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблена модель та рекомендації можуть бути використані при проектуванні вітчизняних завадостійких антенних систем для безпілотних літальних апаратів (БПЛА), наземних геодезичних станцій та транспортних засобів. Запропонована конструкція спіральної АР забезпечує кращі показники прийому сигналів супутників, що знаходяться під низькими кутами до горизонту, порівняно з планарними аналогами, що є критичним для роботи в складних умовах рельєфу. Результати моделювання можуть слугувати основою для створення фізичних прототипів навігаційних антен нового покоління.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи доповідались та обговорювались на XVII Всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН – 2025», м. Хмельницький, ХНУ, 14-15 листопада 2025.

## 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ СУПУТНИКОВОЇ НАВІГАЦІЇ

Сучасний розвиток радіонавігаційних технологій характеризується переходом до мультисистемних та багаточастотних рішень, що вимагає глибокого переосмислення підходів до проектування антенних систем. Цей розділ присвячено комплексному аналізу теоретичних засад побудови глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), зокрема GPS, а також детальному розгляду електродинамічних характеристик антен та антенних решіток. Особлива увага приділяється фізичним механізмам формування сигналів, джерелам похибок та методам їх мінімізації на рівні антенного пристрою. Детально розглядаються спіральні антени як клас широкосмугових випромінювачів зі стабільним фазовим центром, а також методи адаптивної просторово-часової обробки сигналів в АР для підвищення завадостійкості навігаційної апаратури.

### 1.1. Структура та принципи функціонування супутникових навігаційних систем

Глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС) являють собою вершину еволюції радіонавігаційних технологій, інтегруючи досягнення небесної механіки, квантової фізики, цифрової обробки сигналів та геодезії. Для магістерської дипломної роботи, присвяченої розробці АР (зокрема на основі спіральних та патч-антен), критично важливо сформулювати фундаментальне розуміння фізичних принципів роботи системи GPS, оскільки параметри антенної системи (смуга пропускання, ДС, поляризаційні характеристики, фазовий центр) жорстко детерміновані структурою сигналів та архітектурою

навігаційного поля. У цьому підрозділі представлено вичерпний аналіз структури, математичних моделей та сигнально-кодових конструкцій системи GPS, які є вихідними даними для проектування АР. Загальна архітектура системи NAVSTAR GPS:

Система NAVSTAR GPS є пасивною радіонавігаційною системою, що базується на вимірюванні часу затримки проходження радіосигналу від супутників, положення яких відоме з високою точністю, до споживача. Організаційно та технічно система декомпонується на три функціональні сегменти: космічний сегмент, сегмент управління та сегмент користувача [1].

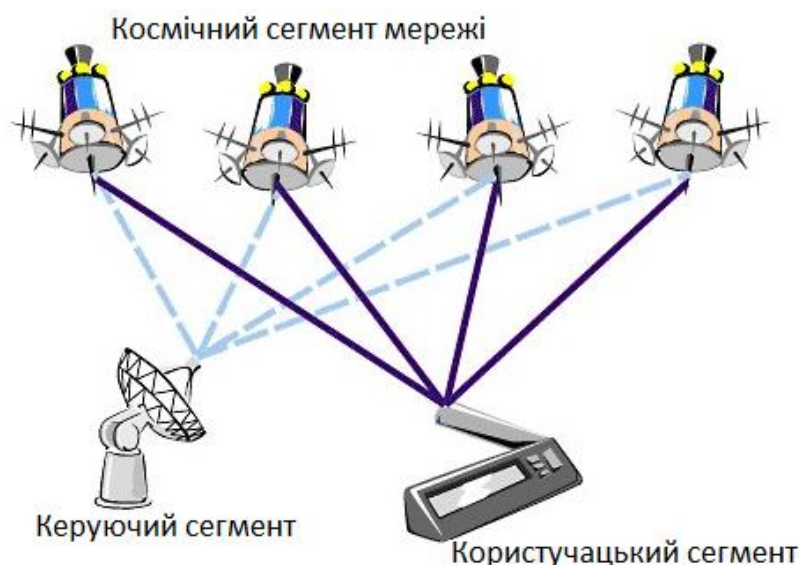


Рисунок 1.1 – Сегменти системи супутникової навігації

Космічний сегмент.

Космічний сегмент формує динамічне навігаційне поле над поверхнею Землі. Ефективність функціонування АР користувача прямо залежить від геометричної конфігурації сузір'я супутників, оскільки вона визначає кути приходу сигналів, рівні енергетичного потенціалу та геометричний фактор зниження точності.

Орбітальне угруповання.

Архітектура орбітального угруповання GPS спроектована таким чином, щоб забезпечити глобальне покриття з мінімальною кількістю "мертвих зон" та достатньою надлишковістю. Номінальна констеляція складається з 24 основних супутників, розташованих на середніх навколоземних орбітах. Фактична кількість супутників станом на 2025 рік перевищує 30 одиниць (зазвичай 31-32 активних апарати) завдяки наявності резервних супутників та апаратів, що знаходяться на етапі введення в експлуатацію або виведення з неї.

Параметри орбіт є критичними для розрахунку енергетичного бюджету радіолінії "супутник-антена":

- Висота орбіти: Приблизно 20 180 км (10 900 морських миль) над поверхнею Землі, що відповідає великій півосі орбіти  $a \approx 26\,560$  км [2].

- Період обертання: 11 годин 58 хвилин (половина сидеричної доби). Це означає, що супутник здійснює два повних оберти навколо Землі за одну зоряну добу. Траса польоту супутника повторюється над поверхнею Землі кожного сидеричного дня, при цьому супутник з'являється над конкретною точкою спостереження приблизно на 4 хвилини раніше кожного сонячного дня [2].

- Нахил орбіти :  $55^\circ$  відносно екваторіальної площини. Такий кут нахилу є компромісним рішенням, що дозволяє забезпечити покриття полярних регіонів (хоча супутники не пролітають безпосередньо над полюсами, вони залишаються видимими під низькими кутами місця) та високу щільність покриття в екваторіальних та помірних широтах [2,4].

- Структура площин: Угруповання організовано у шість орбітальних площин (позначених від А до F), рознесених за довготою висхідного вузла на  $60^\circ$ . У кожній площині номінально знаходиться 4 супутники, розподілені нерівномірно для оптимізації покриття у випадку виходу з ладу окремих апаратів [4].

Для антенної решітки, що розробляється, така конфігурація означає, що в будь-який момент часу у верхній півсфері знаходиться від 4 до 10 (іноді до 12) супутників. Це висуває вимогу до ДС елементарних випромінювачів (патчів або спіралей) бути квазіізотропною у верхній півсфері, або ж вимагає застосування методів цифрового формування променя для одночасного супроводження декількох джерел [7].

#### Еволюція поколінь супутників

Космічний сегмент є гетерогенним і складається з супутників різних поколінь (блоків), що мають відмінні сигнальні характеристики. Це необхідно враховувати при проектуванні ширококосмугових АР, оскільки нові покоління супутників транслюють сигнали в ширших смугах частот та з новими видами модуляції.

Таблиця 1.1 - Характеристика поколінь супутників GPS [4,5]

Покоління (Block)	Період запуску	Особливості сигналів та апаратури	Статус (орієнтовно 2025)
Block IIR (Replenishment)	1997–2004	Базові сигнали L1 C/A, L1/L2 P(Y). Можливість перепрограмування на орбіті.	Експлуатуються, поступово виводяться
Block IIR-M (Modernized)	2005–2009	Додано новий цивільний сигнал L2C (для покращення точності та надійності) та військовий M-код (L1M, L2M). Збільшена потужність передавача.	Активні
Block IIF (Follow-on)	2010–2016	Впроваджено третій цивільний сигнал L5 (Safety-of-Life) на частоті 1176.45 МГц. Покращені атомні годинники (рубідієві та цезієві).	Активні, основа сучасного угруповання
Block III (GPS III)	2018–2025+	Новий цивільний сигнал L1C (сумісний з Galileo). Підвищена потужність (+3-5 дБ) та точність (у 3 рази краща за IIF). Відсутність селективного доступу (SA).	Активне розгортання, 8-10 одиниць на орбіті
Block IIF3 (Follow-on)	з кінця 2020-х	Лазерні ретрорефлектори, повністю цифрова корисне навантаження, регіональний захист військового сигналу (RMP).	У розробці/виробництві



Рисунок 1.2 – Супутник GPS Block III

### Сегмент управління

Сегмент управління забезпечує цілісність системи, синхронізацію часу та точність ефемеридних даних. Він являє собою замкнену петлю зворотного зв'язку, де наземні станції вимірюють параметри сигналів супутників, а головна станція обчислює корекції, які завантажуються назад на борт [3].

#### Складові сегмента управління:

1. Головна станція управління: Розташована на авіабазі Шрівер (Колорадо). MCS є "мозком" системи, де виконується обробка вимірювань за допомогою фільтра Калмана для оцінки станів супутників (орбіта, похибка годинника, параметри сонячного тиску).

2. Станції моніторингу: Глобальна мережа, що включає 6 станцій Космічних сил США та 11 станцій NGA. Станції оснащені прецизійними двочастотними приймачами на основі цезієвих стандартів частоти. Вони збирають дані про псевдодальності та фазу несучої кожні 1.5 секунди, а також метеорологічні дані для корекції тропосферної затримки.

3. Наземні антени: Чотири спеціалізовані антени (S-діапазон) для передачі даних на борт супутників. Передача навігаційного повідомлення здійснюється зазвичай 1-3 рази на добу, однак у разі потреби корекції можуть вноситися частіше [3].

### Модернізація ОСХ:

Станом на 2025 рік відбувається перехід до системи управління нового покоління ОСХ. Це критично для повноцінного використання сигналів L1C та L5, які підтримуються AP, що розробляється в даній роботі. ОСХ забезпечує керування всіма сучасними сигналами, реалізує вдосконалені алгоритми оцінки орбіт та підвищує рівень кіберзахисту каналів управління [5]. Повна операційна готовність ОСХ дозволяє зменшити похибку ефемерид і годинників, що безпосередньо впливає на помилку діапазону еквівалента користувача.

### Сегмент користувача

Сегмент користувача включає апаратуру, що приймає сигнали, декодує навігаційне повідомлення та розв'язує навігаційну задачу. У контексті дипломної роботи, сегмент користувача представляє собою антенну решітку та пов'язаний з нею приймальний тракт. Сучасні приймачі є багатоканальними, здатними обробляти сигнали не лише GPS, а й інших ГНСС (Galileo, GLONASS, BeiDou), що вимагає від антени широкосмуговості та стабільності фазового центру в широкому діапазоні частот [17].

## 1.2 Особливості прийому та обробки сигналів модернізованої системи GPS (L1/L2/L5)

Сучасний етап еволюції глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) характеризується переходом від консервативної архітектури сигналів, закладеної у 1970-х роках, до адаптивної багаточастотної структури. Для системи GPS це означає фундаментальну модернізацію, що включає введення нових цивільних сигналів L2C, L5 та L1C на супутниках блоків IIR-M, IIF та III. Аналіз особливостей прийому цих сигналів є критично важливим для розробки навігаційної апаратури споживача нового покоління,

оскільки кожен із них використовує унікальні методи модуляції, схеми каналного кодування та енергетичні параметри. У цьому підрозділі проводиться вичерпний аналіз спектрально-часових характеристик сигналів у діапазонах L1, L2 та L5, математичних моделей їх формування, специфіки кореляційної обробки, а також вимог до апаратної частини приймачів, зокрема антенно-фідерних пристроїв.

Архітектура та еволюція частотно-часового забезпечення GPS.

Історично система GPS базувалася на використанні двох несучих частот: L1 (1575,42 МГц) та L2 (1227,60 МГц). Однак, доступ цивільних користувачів обмежувався кодом грубого визначення місцеположення C/A на частоті L1. Військовий код високої точності P(Y) транслювався на обох частотах, але був закритий для прямого використання без криптографічних ключів. Це створювало суттєві обмеження для точності цивільної навігації, насамперед через неможливість прямої компенсації іоносферної рефракції, яка є частотно-залежною [1].

Модернізація GPS, розпочата з запуском супутника блоку PR-M у 2005 році, спрямована на подолання цих обмежень шляхом впровадження трьох нових цивільних сигналів:

1. L2C (L2 Civil): Забезпечує можливість двочастотної корекції іоносфери для цивільних користувачів та покращує прийом у слабких умовах.
2. L5 (Safety-of-Life): Транслюється у захищеному авіаційному діапазоні (1176,45 МГц), має високу потужність та широку смугу пропускання для прецизійних застосувань.
3. L1C (Interoperable): Сигнал нового покоління на частоті L1, розроблений для повної сумісності з європейською системою Galileo та японською QZSS, що використовує передові методи модуляції MBOC [7].

Така архітектура дозволяє реалізувати концепцію "Частотного рознесення", що значно підвищує надійність навігаційного рішення. Приймач, здатний обробляти комбінацію L1/L2/L5, отримує надлишковість вимірювань, що дозволяє не лише компенсувати атмосферні затримки, але й ефективно боротися з навмисними та ненавмисними завадами, а також вирішувати задачу неоднозначності фазових вимірювань у методах кінематики реального часу (КРЧ) та метода точного позиціонування (МТП) значно швидше [6].

Діапазон L1 залишається найбільш завантаженим та важливим, оскільки тут співіснують спадкові сигнали, що забезпечують зворотну сумісність для мільярдів існуючих приймачів, та нові сигнали, що пропонують якісно новий рівень сервісу.

Таблиця 1.2. Зведені характеристики цивільних сигналів GPS [6,8,10].

Характеристика	L1 C/A (Legacy)	L1C (Modernized)	L2C (Modernized)	L5 (Safety-of-Life)
Несуча частота	1575,42 МГц	1575,42 МГц	1227,60 МГц	1176,45 МГц
Довжина хвилі	~19,0 см	~19,0 см	~24,4 см	~25,5 см
Тип модуляції	BPSK	TMBOC	BPSK (TDM)	QPSK
Частота чіпування	1,023 МГц	1,023 МГц	1,023 МГц	10,23 МГц
Період повторення коду	1 мс	10 мс	20 мс / 1,5 с	1 мс
Вторинне кодування	Відсутнє	Overlay Code (L1Co)	Відсутнє	Neumann-Hoffman (10/20 біт)
Мін. потужність (на Землі)	-158,5 дБВт	-157,0 дБВт	-160,0 дБВт	-154,9 дБВт
Тип повідомлення	NAV (Legacy)	CNAV-2	CNAV	CNAV
Смуга (Null-to-Null)	2,046 МГц	4 МГц	2,046 МГц	20,46 МГц

Детальний аналіз сигналів діапазону L1.

Сигнал L1 C/A: Базова архітектура та обмеження.

Класичний сигнал L1 C/A використовує бінарну фазову маніпуляцію BPSK (1.1). Математично сигнал можна представити як:

$$S_{L1C/A}(t) = \sqrt{2P_{C/A}}D(t)C(t) \cos(2\pi f_{L1}t + \theta_{L1}), \quad (1.1)$$

де  $P_{C/A}$  — потужність сигналу,  $D(t)$  — навігаційні дані (50 біт/с),  $C(t)$  — псевдовипадковий код Голда довжиною 1023 чіпи,  $f_{L1}$  — несуча частота.

Період повторення коду становить 1 мс, що відповідає просторовій довжині близько 300 км. Основною проблемою BPSK (1) є форма автокореляційної функції (АКФ), яка має трикутний вигляд з основою у 2 чіпи (близько 600 м). Така широка кореляційна функція робить сигнал вразливим до багатопроменевості: відбитий сигнал із затримкою до 1,5 чіпа може суттєво спотворити форму піку АКФ, зміщуючи точку відстеження та вносячи похибку у вимірювання псевдовідстані, що може досягати десятків метрів [8].

Сигнал L1C: Інноваційна структура та модуляція TMBOC.

Сигнал L1C розроблений для забезпечення сумісності з сигналом Galileo E1 Open Service. Обидва сигнали займають одну й ту ж частоту і мають схожу спектральну маску, що дозволяє створювати єдині входні тракти для обох систем. Ключовою інновацією L1C є використання модуляції BOC у її специфічній реалізації TMBOC [7].

Структура L1C розділена на дві компоненти, що передаються в квадратурі або з фазовим ущільненням:

1. Пілотний канал (L1C-P): Не містить навігаційних даних. Призначений для чистого вимірювання дальності, захоплення частоти

та фази. На пілотний канал виділяється 75% загальної потужності сигналу L1C, що забезпечує підвищення чутливості приймача на 1,5–4,75 дБ порівняно з L1 C/A [7].

2. Інформаційний канал (L1C-D): Містить навігаційне повідомлення CNAV-2. На нього припадає 25% потужності.

Математична модель ТМВОС модуляції

Модуляція ТМВОС (6,1,4/33), що використовується в пілотному каналі L1C-P, є гібридною схемою. Вона поєднує вузькосмугову компоненту ВОС (1,1) та широкосмугову ВОС (6,1) шляхом часового мультиплексування. Специфікація IS-GPS-800 визначає, що послідовність, яка модулює пілотний канал, складається з 33 символів:

- 29 символів модулюються як ВОС (1,1) (піднесуча частота  $f_{sc} = 1,023$  МГц).
- 4 символи модулюються як ВОС (6,1) (піднесуча частота  $f_{sc} = 6,138$  МГц).[10]

Інформаційний канал L1C-D використовує чисту модуляцію ВОС (1,1).

Спектральна густина потужності (PSD) сигналу ТМВОС описується виразом:

$$G_{ТМВОС}(f) = \frac{10}{11} G_{ВОС(1,1)}(f) + \frac{1}{11} G_{ВОС(6,1)}(f). \quad (1.2)$$

Коефіцієнт 10/11 відображає домінуючий внесок ВОС(1,1), тоді як 1/11 енергії, зосередженої в ВОС(6,1), відповідає за формування високочастотних складових спектру. Саме наявність компонентів на частотах  $\pm 6$  МГц від несучої дозволяє сформувати автокореляційну функцію з дуже гострим основним піком і крутими схилами. Це забезпечує дві критичні переваги:

1. Висока точність: Крутизна дискримінаційної характеристики прямо пропорційна середньоквадратичній ширині спектру.

2. Придушення багатопроменевості: Вузкий кореляційний пік дозволяє розрізнити прямий сигнал і відбитий, якщо затримка останнього перевищує ширину піку (близько 30-50 м, на відміну від 300 м для C/A коду) [7,10].

Для розширення спектру в L1C використовуються не коди Голда, а сімейство кодів Вейля. Довжина первинного коду становить 10 230 чіпів (період 10 мс). Це в 10 разів довше за C/A код, що покращує властивості взаємної кореляції на 20-24 дБ і знижує поріг "проблеми близького-далекого" [6].

Пілотний канал додатково модулюється вторинним кодом L1C<sub>0</sub>, який слугує для синхронізації та покращення спектральних ліній при дуже тривалому когерентному накопиченні [10].

Особливості прийому сигналів діапазону L2 (L2C)

Діапазон L2 (1227,60 МГц) історично був "ахіллесовою п'ятою" цивільних приймачів. До появи L2C, для використання L2 доводилося застосовувати методи безкодового або напів-безкодового відстеження P(Y)-коду. Ці методи базувалися на зведенні сигналу в квадрат або перехресній кореляції L1/L2, що призводило до втрати 20–30 дБ у відношенні сигнал/шум і робило прийом неможливим у складних умовах або при низькій потужності супутника. Сигнал L2C вирішує цю проблему, надаючи відкритий код з повною потужністю.

Структура L2C: Мультиплексування з розділенням часу (TDM).

Сигнал L2C має унікальну структуру, відмінну від інших сигналів GPS. Він використовує модуляцію BPSK, але потік чіпів формується шляхом побітового мультиплексування двох різних кодів: L2 CM та L2 CL.

1. Код L2 CM:

- Довжина: 10 230 чіпів.
- Період: 20 мс.
- Модулюється навігаційними даними CNAV (25 біт/с, з

FEC — 50 символів/с).

- Призначений для швидкого захоплення сигналу.
- 2. Код L2 CL:
  - Довжина: 767 250 чіпів.
  - Період: 1,5 с (75 періодів СМ коду).
  - Не містить даних (Pilot).
  - Призначений для забезпечення максимальної кореляційної переваги та стійкості до зриву стеження.

Ефективна частота чіпування L2C становить 1,023 МГц, однак кожен компонент (СМ та СL) передається з частотою 511,5 кГц. Це мультиплексування вимагає від приймача специфічної організації корелятора: він повинен генерувати локальну копію, що точно відтворює чергування чіпів СМ і СL [17].

Переваги довгого коду та чутливість приймача

Наявність пілотного коду L2 CL довжиною 1,5 секунди є революційною для цивільної GPS. Відсутність інверсії фази через біти даних дозволяє приймачу виконувати когерентне інтегрування протягом сотень мілісекунд.

Теоретично, збільшення часу накопичення з 20 мс (типово для L1 C/A) до 1,5 с дозволяє підвищити чутливість приймача на

$$Gain = 10 \log_{10} \left( \frac{1500}{20} \right) \approx 18,75 \text{ дБ.}$$

Це дозволяє відстежувати сигнали з рівнем потужності нижче -160 дБВт, що характерно для приміщень, густого лісу або міських каньйонів. Однак, на практиці час когерентного накопичення обмежується стабільністю опорного генератора приймача (ТСХО/ОСХО) та динамікою руху користувача. При русі зміна доплерівського зсуву обмежує ефективний час інтегрування, тому в

динамічних сценаріях приймачі часто використовують комбінацію когерентного та некогерентного накопичення [17].

Ширококутові сигнали діапазону L5: Архітектура та прийом

Сигнал L5 (1176,45 МГц) вважається найбільш досконалим цивільним сигналом GPS. Він транслюється в діапазоні ARNS (Аеронавігаційна радіонавігаційна служба), який захищений міжнародним регламентом радіозв'язку від завад з боку інших служб. Це робить L5 ідеальним для застосувань, пов'язаних із безпекою життя, наприклад, для заходу літаків на посадку.

Квадратурна фазова маніпуляція QPSK та висока частота чіпування

На відміну від сигналів L1 та L2, що використовують BPSK, сигнал L5 використовує квадратурну фазову маніпуляцію QPSK. Він складається з двох компонентів, що передаються на одній частоті зі зсувом фази несучої на  $90^\circ$ :

1. Синфазна компонента (I5): Модулюється кодом дальності та навігаційними даними CNAV.
2. Квадратурна компонента (Q5): Модулюється лише кодом дальності (пілотний сигнал).

Частота чіпування для обох компонентів становить 10,23 МГц, що в 10 разів перевищує частоту L1 C/A. Це фундаментально змінює характеристики прийому:

- Енергетика: Широкий спектр вимагає більшої потужності передавача. Мінімальна гарантована потужність прийому L5 становить -154,9 дБВт, що є найвищим показником серед усіх цивільних сигналів GPS (на 3,6 дБ вище за L1 C/A) [9].
- Точність: Висока частота чіпування означає, що тривалість одного чіпа становить менше 100 нс (або близько 29,3 метра у просторі). Це забезпечує надзвичайно крутий фронт кореляційного

піку, що мінімізує шумову складову помилки вимірювання псевдовідстані.

Вторинне кодування Неймана-Хоффмана.

Ще однією унікальною особливістю L5 є використання кодів Неймана-Хоффмана (NH) як вторинного шару модуляції поверх основного коду дальності. Це необхідно для покращення спектральних характеристик та синхронізації, особливо враховуючи високу потужність сигналу, яка могла б створювати інтерференцію іншим системам.

- Канал даних I5: Використовує 10-бітний код NH (NH10: 0000110101). Кожен символ даних тривалістю 10 мс (100 символів/с) модулюється одним повним періодом коду NH10 (частота 1 кГц).
- Пілотний канал Q5: Використовує 20-бітний код NH (NH20: 00000100110101001110). Оскільки даних немає, код повторюється кожні 20 мс [6, 9].

Функціональне призначення кодів NH:

1. Синхронізація даних: Коди NH гарантують наявність частотних переходів (транзицій) у потоці сигналу, навіть якщо передаються довгі послідовності однакових бітів даних. Це критично для роботи схем відновлення символної синхронізації.
2. Придушення вузькосмугових завад: Вторинне кодування додатково "розмиває" спектр, зменшуючи спектральну густину потужності окремих ліній спектру (spectral lines reduction), що знижує ймовірність інтерференції.[9]
3. Покращення взаємної кореляції: Коди NH фактично подовжують період кодової послідовності до 10 мс (I5) та 20 мс (Q5), що покращує властивості взаємної кореляції між супутниками та зменшує вплив ефекту "Близько-далеко".

Вимоги до смуги пропускання радіочастотного тракту

Прийом сигналу L5 висуває безпрецедентні вимоги до апаратної частини приймача. Основна пелюстка спектру BPSK(10) має ширину 20,46 МГц. Для збереження форми кореляційного піку та мінімізації кореляційних втрат смуга пропускання фільтрів проміжної частоти повинна бути не меншою за 20–24 МГц.

Використання вузької смуги (наприклад, стандартних для L1 2–4 МГц) призведе до "зрізання" енергії сигналу L5, перетворюючи його переваги на недоліки: сигнал втратить свою точність і стане подібним до звичайного вузькосмугового сигналу, але з меншим Відношення сигнал/шум.[6] Це вимагає використання високошвидкісних АЦП з частотою дискретизації не менше 40–50 МГц, що збільшує енергоспоживання цифрової частини приймача.

Аналіз завадостійкості та придушення багатопроменевості.

Багатопроменеве поширення є основним джерелом похибок для ГНСС у міських умовах, де сигнал відбивається від будівель, землі та інших об'єктів. Відбитий сигнал завжди затримується відносно прямого і має меншу амплітуду, що призводить до спотворення форми кореляційної функції і зміщення оцінки часу приходу.

Обвідна похибки багатопроменевості.

Ефективність придушення багатопроменевості залежить від ширини спектру сигналу та типу модуляції. Ключовим параметром є "Оригинальна помилка багатопроменевості" — графік максимальної похибки вимірювання дальності в залежності від затримки відбитого променя.

1. L1 C/A (BPSK(1)):
  - Тривалість чіпа: ~977 нс (293 м).
  - Відбитий сигнал впливає на корелятор при затримках до 1,5 чіпа (440 м).

- Максимальна похибка може досягати 150 метрів при конструктивній/деструктивній інтерференції.[21]

2. L5 (BPSK(10)):

- Тривалість чіпа:  $\sim 97,7$  нс (29,3 м).

- Завдяки короткому чіпу, кореляційна функція дуже вузька.

Відбиті сигнали з затримкою більше 30 метрів (типово для відбиттів від дальніх будівель) практично не перекриваються з основним піком і не впливають на вимірювання.

- Для коротких затримок (менше 30 м) максимальна похибка на порядок менша, ніж у L1 C/A [21].

- Дослідження показують, що в умовах глибокого "міського каньйону" точність позиціонування приймача L1/L5 може становити  $< 4$  м, тоді як L1-only приймач дає похибку  $> 30$  м [6].

3. L1C (TMBOC):

- Модуляція TMBOC спеціально оптимізована для боротьби з багатопроблемністю. Наявність провалу в центрі спектру та перенесення енергії на краї смуги робить кореляційний пік ще гострішим, ніж у звичайного BPSK.

- TMBOC демонструє кращі характеристики придушення багатопроблемності для середніх затримок (75–150 нс) порівняно навіть з L5, незважаючи на меншу частоту чіпування основного коду, завдяки наявності компоненти ВОС(6,1) [19].

Вимоги до антенно-фідерних пристроїв приймачів нового покоління

Перехід до широкосмугових та багаточастотних сигналів накладає нові, більш жорсткі вимоги до антенних систем, які раніше ігнорувалися в одночастотній апаратурі.

Стабільність фазового центру

Фазовий центр антени — це уявна точка, відносно якої вимірюється фаза сигналу. Для геодезичних вимірювань та КРЧ

критично, щоб ця точка була стабільною. Однак, фізично положення РС залежить від частоти та кута приходу хвилі. Варіація фазового центру (ВФЦ) для широкосмугових сигналів є критичною проблемою. У системах, що працюють з комбінацією L1/L2/L5 (смуга частот  $> 400$  МГц), антена повинна забезпечувати стабільність РС у всьому діапазоні. Для прецизійних антен допустима варіація ВФЦ становить 1–2 мм. Якщо антена має різні ВФЦ для L1 та L5, це призводить до помилок у формуванні лінійних комбінацій сигналів, які можуть досягати сантиметрового рівня [37].

Варіація групової затримки.

Групова затримка визначає час проходження огинаючої сигналу через тракт антени та приймача. Для коректної роботи кореляторів, особливо для широкосмугових сигналів L5 та L1С, групова затримка має бути постійною (плоскою) у всій смузі пропускання сигналу.

Варіація групової затримки (ВГЗ) в залежності від азимута та кута місця може вносити похибки у вимірювання кодової псевдовідстані. Дослідження [30] показують, що для високоточних антен ВГЗ не повинна перевищувати 3 нс (приблизно 1 м) у робочій смузі. Різкі зміни ВГЗ на краях смуги пропускання можуть призвести до асиметрії кореляційного піку і виникнення зміщення оцінки дальності, яке неможливо усунути диференціальними методами, якщо воно залежить від індивідуальних характеристик антени користувача.

Для забезпечення стабільності ВГЗ та ВФЦ у сучасному обладнанні використовуються багатоточкові схеми живлення випромінювачів або спіральні антени, які забезпечують кращу осьову симетрію та стабільність параметрів у широкому куті огляду [37].

Проблема інтерференції в діапазоні L5

Хоча діапазон L5 є захищеним, він межує з частотами системи DME/TACAN, яка широко використовується в авіації. Потужні імпульсні сигнали DME можуть перевантажувати вхідні каскади

широкосмугових приймачів GPS L5. Це вимагає застосування спеціальних схем, таких як Pulse Blanking (короткочасне вимкнення входу при детектуванні потужного імпульсу) або високодобротних смугових фільтрів, що, в свою чергу, може впливати на ВГЗ.[9]

### 1.3 Основні джерела похибок позиціонування та методи їх компенсації

У сучасному науково-технічному дискурсі проблема точного позиціонування рухомих об'єктів трансформувалася з чисто прикладної інженерної задачі у фундаментальну проблему стохастичного оцінювання стану динамічних систем. Розробка робастних навігаційних комплексів для магістерського дослідження вимагає відмови від спрощеного детермінованого погляду на похибки на користь імовірнісного підходу, де кожне вимірювання розглядається як реалізація випадкового процесу. Точність навігаційної системи не є скалярною величиною, а векторним полем невизначеності, що еволюціонує у часі та просторі під впливом різноманітних збурень.

#### Фундаментальні визначення точності

Перед детальним аналізом фізичної природи похибок необхідно формалізувати математичний апарат їх опису. У навігації розрізняють поняття "точність" та "прецизійність".

- Точність характеризує близькість математичного сподівання результатів вимірювань до істинного значення вимірюваної величини (відсутність систематичного зміщення).
- Прецизійність характеризує ступінь розкиду результатів вимірювань відносно їхнього середнього значення (дисперсія).

Для кількісної оцінки похибок у двовимірному (2D) та тривимірному (3D) просторі використовуються статистичні метрики, що базуються на припущенні про нормальний розподіл помилок.

Таблиця 1.3. Статистичні метрики точності позиціонування

Метрика	Розшифровка	Імовірність накриття	Опис та застосування
CEP	Circular Error Probable	50%	Радіус кола, в яке потрапляє 50% точок вимірювань. Використовується переважно для 2D навігації.
RMS	Root Mean Square	~68.3% (1D), ~63-68% (2D/3D)	Середньоквадратичне відхилення. Стандартна метрика для опису шумів датчиків.
2dRMS	Twice Distance RMS	95.4% - 98.2%	Подвоєне середньоквадратичне відхилення радіальної помилки. "Золотий стандарт" для цивільної навігації.
SEP	Spherical Error Probable	50%	Радіус сфери у 3D просторі, що містить 50% вимірювань. Важливо для БПЛА.
R95 / R99	Accuracy Radius	95% / 99%	Радіус кола, що гарантовано містить вказаний відсоток вимірювань. Критично для систем безпеки.

Важливо зазначити, що наведені метрики є коректними лише за умови, що похибки підпорядковуються нормальному розподілу. Однак, як буде показано далі, реальні джерела похибок, такі як багатопроменевість або атмосферні сцинтиляції, часто призводять до розподілів з "важкими хвостами", що вимагає застосування більш складних методів оцінювання, ніж прості середньоквадратичні метрики.

Аналіз джерел похибок неможливий без чіткого визначення систем відліку. Похибки часто виникають не через неточність датчика,

а через некоректне перетворення між системами координат або неузгодженість часових шкал.

1. Інерціальна система координат: *i*-frame. Центр у центрі мас Землі, осі не обертаються разом із Землею. Це фундаментальна система для роботи інерціальних датчиків (акселерометрів та гіроскопів), оскільки закони Ньютона виконуються саме в інерціальній системі. Ігнорування обертання Землі при інтегруванні даних ІНС призводить до накопичення помилок через сили Коріоліса.

2. Загальноземна система координат: *e*-frame. Обертається разом із Землею. ГНСС надають координати саме в цій системі (наприклад, WGS-84 для GPS або PZ-90 для GLONASS). Невідповідність між реалізаціями (наприклад, ITRF2014 проти WGS-84) може вносити сантиметрові систематичні похибки, що є критичним для геодезичних застосувань.

3. Навігаційна система координат: *n*-frame. Локальна система, прив'язана до дотичної площини в точці знаходження користувача. Помилки орієнтації навігаційного тригранника відносно істинного горизонту призводять до перехресного впливу (cross-coupling) прискорення вільного падіння на канали горизонтального прискорення.

Принцип роботи ГНСС базується на трилатерації — визначенні положення приймача шляхом вимірювання часу поширення сигналу від супутників. Рівняння вимірювання псевдодальності  $P^k$  від приймача  $u$  до супутника  $k$  є фундаментальним для аналізу похибок:

$$P_u^k = p_u^k + c(dt_u - dt^k) + I_u^k + T_u^k + M_u^k + \epsilon_u^k, \quad (1.3)$$

де  $p_u^k$  — геометрична дальність,  $c$  — швидкість світла,  $dt_u$  та  $dt^k$  — зміщення годинників приймача та супутника,  $I$  та  $T$  —

іоносферна та тропосферна затримки,  $M$  — багатопроменевість,  $\epsilon$  — залишковий шум [11, 12].

Розглянемо кожну компоненту детально, фокусуючись на механізмах виникнення та фізичних процесах.

Похибки космічного сегмента: Ефемериди та релятивістські ефекти

Динаміка орбітальних похибок

Супутники рухаються по орбітах, які лише у першому наближенні є кеплеровими еліпсами. У реальності на супутник діє складний комплекс збурюючих сил:

- Несферичність геопотенціалу Землі (гармоніки  $J_2$ ,  $J_3$  і вище).
- Гравітаційний вплив Місяця та Сонця.
- Тиск сонячного випромінювання. Це джерело є найскладнішим для моделювання, оскільки залежить від орієнтації сонячних панелей, відбивної здатності матеріалів ("альbedo" супутника) та входу супутника в тінь Землі. Похибка моделювання SRP є основним лімітуючим фактором для точності прогнозу ефемерид на тривалий час.[13]

Наземний сегмент управління завантажує на супутники параметри орбіти, які є результатом апроксимації прогнозованої траєкторії. Залишкова похибка ефемерид становить порядку 1-2 метрів (RMS). Для високоточних застосувань (МТП) використовуються точні ефемериди, що розраховуються постфактум міжнародними службами (IGS) з точністю до 2-5 см.

Квантова фізика атомних стандартів частоти.

Серцем навігаційного супутника є атомний годинник. Супутники GPS використовують цезієві та рубідієві стандарти, Galileo — пасивні водневі мазери (найстабільніші у космосі).

Незважаючи на високу стабільність ( $10^{-13} - 10^{-14}$ ), годинники схильні до дрейфу частоти та стохастичних шумів (фліккер-шум). Похибка годинника супутника  $dt^k$  моделюється поліномом другого порядку, коефіцієнти якого передаються у навігаційному повідомленні. Однак, короткочасні флуктуації, не охоплені поліномом, вносять похибку дальності порядку 0.5-1.5 м.

Релятивістські ефекти як джерело похибок ГНСС — це єдина інженерна система, що вимагає прямого врахування обох теорій відносності Ейнштейна для коректного функціонування [14].

1. Спеціальна теорія відносності (СТВ): Через рух супутника зі швидкістю  $\sim 3.9$  км/с відбувається релятивістське сповільнення часу. Це призводить до відставання бортового годинника на  $\sim 7$  мкс/добу.

2. Загальна теорія відносності (ЗТВ): Супутник знаходиться у слабшому гравітаційному полі, ніж годинник на поверхні Землі. Згідно з принципом еквівалентності, час на орбіті плине швидше. Цей ефект призводить до випередження на  $\sim 45$  мкс/добу. Результируючий ефект становить випередження на 38 мкс/добу, що еквівалентно накопиченню помилки позиціонування у 11.4 км щодня.[15] Ця похибка компенсується апаратно зміщенням номінальної частоти генератора (наприклад, для GPS з 10.23 МГц до 10.22999999543 МГц). Другорядний ефект (ефект ексцентриситету): Оскільки орбіти не є ідеально круговими, швидкість супутника і гравітаційний потенціал змінюються протягом оберту. Це викликає періодичну похибку часу  $\Delta t_r$ , яка компенсується приймачем за формулою:

$$\Delta t_r = Fe\sqrt{A} \sin E_k, \quad (1.4)$$

де  $e$  — ексцентриситет,  $A$  — велика піввісь,  $E_k$  — ексцентрична

аномалія. Ігнорування цього члена дає похибку до 20-30 нс (6-9 метрів) [16].

Атмосферний канал поширення: Дисперсійні та недисперсійні середовища

Іоносфера: Фізика плазми та дисперсія. Іоносфера (60-1000 км) містить вільні електрони, концентрація яких визначається сонячною активністю (ультрафіолетове та рентгенівське випромінювання). Фазова швидкість  $v_p$  електромагнітної хвилі в плазмі перевищує швидкість світла у вакуумі  $c$ , а групова швидкість  $v_g$  є меншою за  $c$ . Це явище називається іоносферною рефракцією. Відповідно до формули Епплтона-Хартрі, показник заломлення іоносфери залежить від частоти сигналу  $f$ . Затримка (для коду) або випередження (для фази) виражається як:

$$I = \pm \frac{40.3 * TEC}{f^2} \quad (1.5)$$

де TEC — інтегральна кількість електронів у стовпчику перерізом  $1 \text{ м}^2$  вздовж шляху променя (вимірюється в TECU,  $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ ел/м}^2$ ). Знак "+" відноситься до групової затримки (код), знак "-" — до фазового випередження. Ця властивість використовується у алгоритмах згладжування коду фазою. Компенсація:

1. Одночастотні приймачі: Використовують модель Клобучара (GPS) або модель NeQuick (Galileo). Модель Клобучара усуває лише ~50% іоносферної похибки, оскільки базується на усереднених кліматичних даних.

2. Двочастотні приймачі: Використання лінійної комбінації (Ionosphere-Free combination) дозволяє виключити вплив іоносфери першого порядку (99.9% похибки)

$$P_{IF} = \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (1.6)$$

Проте, така комбінація збільшує шумову складову вимірювання  $y \approx 3$  рази порівняно з сигналом на одній частоті [13].

Тропосферна затримка не залежить від частоти (до 15 ГГц), тому не може бути усунена двочастотним методом. Вона моделюється як сума гідростатичної та вологої складових, спроектованих на лінію візування за допомогою функцій відображення:

$$T = ZHD * MF_h(E) + ZWD * MF_w(E), \quad (1.7)$$

де  $ZHD$  — затримка (гідростатична) в зеніті, що добре розраховується за даними тиску (модель Саастамойнена), а  $ZWD$  (затримка (волога) в зеніті) залежить від парціального тиску водяної пари і є високодинамічною. Похибка моделювання вологої складової є основним обмежуючим фактором для високоточної висотної навігації (вертикальна помилка зазвичай у 2-3 рази більша за планову через кореляцію тропосферної затримки та висотної компоненти у матриці  $A^T A$ ).

Багатопроменевість є найбільш підступним джерелом похибок у міських умовах. Вона виникає внаслідок відбиття сигналу від поверхонь (скло, бетон, метал). Фізично це призводить до спотворення кореляційного трикутника у приймачі. Якщо відбитий сигнал приходиться із затримкою, меншою за 1 чіп коду (для GPS L1 C/A це 293 м), він накладається на прямий сигнал, зміщуючи пік кореляційної функції. Петля стеження за затримкою (DLL) "захоплює" зміщений пік, що призводить до помилки вимірювання псевдодальності [20].

На відміну від білого шуму, похибка багатопроменевості не усувається звичайним усередненням, оскільки вона може мати періодичність від кількох хвилин до годин (залежно від зміни геометрії супутник-відбивач-антена).

Методи компенсації:

- Апаратні: Антени типу Choke Ring (придушення сигналів з від'ємними кутами місця/відбитих від землі), використання лівосторонньої кругової поляризації (ЛКП) для відсіювання відбитих сигналів (які змінюють поляризацію при відбитті).
- Алгоритмічні: Вузкий корелятор — зменшення відстані між ранньою та пізньою копіями коду в DLL, що знижує чутливість до відбитих сигналів з великою затримкою. Технології MEDLL (Multipath Estimating Delay Lock Loop) оцінюють параметри відбитих сигналів і віднімають їх.

Інерціальна навігація: Стохастичні процеси та еволюція похибок.

Якщо ГНСС страждає від зовнішніх факторів, то інерціальна навігаційна система є замкненою, і її похибки визначаються виключно внутрішніми властивостями датчиків та математикою інтегрування. Фізика похибок MEMS сенсорів. Сучасні масові застосування базуються на мікроелектромеханічних системах (MEMS). Гіроскопи: Більшість MEMS гіроскопів — вібраційні. Вони використовують ефект Коріоліса: віброюча маса під дією кутового обертання зазнає дії сили Коріоліса, перпендикулярної до напрямку вібрації та осі обертання

$$F_c = -2m(\omega \times v) \quad (1.8)$$

Основні джерела похибок:

1. G-чутливість: Деформація мікроструктури під дією лінійного прискорення викликає зміщення вихідного сигналу гіроскопа. Це критично для високодинамічних об'єктів (ракет, дронів, БПЛА).
2. Анізоеластичність: Залежність зміщення від добутку прискорень по різних осях.

Акселерометри: Зазвичай ємнісного типу (вимірювання зміщення інерційної маси). Основні проблеми: нелінійність масштабного коефіцієнта (особливо при великих перевантаженнях) та температурний дрейф зміщення нуля.

Для детальної характеристики шумів інерціальних датчиків стандартна дисперсія є недостатньою, оскільки вона не розрізняє типи шумів та не сходиться для деяких процесів (наприклад, фліккер-шуму). Стандартом де-факто є метод варіації Аллана  $\sigma^2(\tau)$ , який аналізує залежність дисперсії від часу осереднення  $\tau$ .

Таблиця 1.4 Ідентифікація шумових компонент за графіком Аллана

Тип шуму	Нахил графіка	Фізична природа	Математична модель у фільтрі Калмана
Шум квантування	-1	Похибка АЦП, дискретизація сигналу.	Додається до $R$ (матриця шумів вимірювань).
Білий шум / Випадкове блукання кута	-1/2	Тепловий шум електроніки, флуктуації фотонів (для FOG/RLG).	Основна компонента процесного шуму $Q$ .
Нестабільність зміщення	0 (плато)	Фліккер-шум ( $1/f$ ), зміни температури електроніки.	Моделюється як процес Гаусса-Маркова 1-го порядку. Визначає межу точності при статистиці.
Випадкове блукання частоти	+1/2	Довготривалий дрейф параметрів матеріалу, старіння.	Інтеграл від білого шуму, додається як окремий стан.
Лінійний дрейф	+1	Детермінований тренд (наприклад, розігрів).	Апроксимується лінійною функцією часу.

## Висновки до розділу 1

Проведений у першому розділі комплексний аналіз сучасного стану та перспектив розвитку глобальних навігаційних супутникових систем засвідчив, що еволюція технологій позиціонування перебуває на етапі переходу від класичних одночастотних рішень до складних мультисистемних та багаточастотних комплексів. Детальне вивчення архітектури системи GPS NAVSTAR дозволило встановити, що її функціональна стабільність забезпечується взаємодією трьох ключових сегментів — космічного, наземного керування та користувацького, кожен з яких відіграє критичну роль у формуванні навігаційного поля. Особливу увагу в аналізі було приділено космічному сегменту, який є гетерогенним і складається з супутників різних поколінь, що детально відображено в Таблиці 1.1. Ця таблиця демонструє еволюційний шлях від блоків IIR до новітніх GPS III, які забезпечують підтримку нових сигналів та підвищену потужність випромінювання, що є визначальним фактором для проектування перспективних антенних систем.

Ключовим аспектом дослідження став аналіз сигнально-кодових конструкцій, який виявив фундаментальні відмінності між спадковими сигналами L1 C/A та модернізованими сигналами L1C, L2C і L5. Як показано в Таблиці 1.2, нові сигнали характеризуються покращеними спектральними властивостями, використанням передових методів модуляції, таких як TMBOC та QPSK, а також наявністю пілотних компонент, що не містять даних. Впровадження сигналу L5 у захищеному авіаційному діапазоні з широкою смугою пропускання відкриває нові можливості для високоточного позиціонування та ефективної боротьби з багатопрореневістю, що вимагає від антенних систем забезпечення стабільності фазового центру та групової затримки у широкій смузі частот [18].

Окремим важливим напрямком аналізу стало дослідження джерел похибок позиціонування, які мають як детерміновану, так і стохастичну природу. Розгляд впливу іоносферної та тропосферної рефракції, ефемеридних помилок та релятивістських ефектів дозволив сформувати цілісну картину факторів, що обмежують точність навігації. Для кількісної оцінки цих похибок було проаналізовано статистичні метрики, наведені в Таблиці 1.3, які дозволяють стандартизувати підходи до оцінки точності в 2D та 3D просторі. Крім того, аналіз шумових складових інерціальних датчиків, представлений у Таблиці 1.4, підкреслив необхідність врахування стохастичних процесів при комплексуванні ГНСС з інерціальними системами. Підсумовуючи, можна стверджувати, що сучасні умови експлуатації, зокрема наявність завод та складний рельєф, вимагають переходу до використання адаптивних антенних решіток, здатних реалізувати методи просторової селекції сигналів та забезпечити високу заводозахищеність навігаційної апаратури.

## РОЗДІЛ 2. АНТЕНИ ДЛЯ GPS-НАВІГАЦІЇ: КОНСТРУКЦІЇ, МАТЕРІАЛИ, ПАРАМЕТРИ

### 2.1. Спіральні антени: типи, геометрія, поляризаційні властивості

У сучасних системах глобального позиціонування (ГНСС), де вимоги до точності та надійності прийому сигналів постійно зростають, спіральні антени займають провідне місце завдяки своїм унікальним електродинамічним характеристикам. Спіральна антена, концепція якої була вперше детально описана Джоном Краусом у 1946 році, являє собою фундаментальний клас антен біжучої хвилі, що забезпечують природну генерацію хвиль із круговою поляризацією (КП). Ця властивість є критичною для супутникової навігації, оскільки сигнали супутників GPS передаються саме з КП правого напрямку обертання (ПКП), що дозволяє мінімізувати втрати при проходженні крізь іоносферу (ефект фарадеївського обертання) та знизити вплив багатопробеневого поширення. Геометрично спіральна антена утворюється шляхом намотування провідника по гвинтовій лінії на циліндричній або конічній поверхні, причому ключовими параметрами, що визначають режим роботи антени, є діаметр спіралі, крок намотки та кількість витків. Залежно від співвідношення довжини витка спіралі та довжини робочої хвилі, антена може працювати в режимі нормального (перпендикулярного до осі) або осьового (вздовж осі) випромінювання. Для задач GPS-навігації виключний інтерес становить саме режим осьового випромінювання, який забезпечує формування гостроспрямованої діаграми з максимумом уздовж осі симетрії антени та широку робочу смугу частот [22].

Класифікація спіральних антен для навігаційних застосувань базується на кількості спіральних гілок (витків), які формують випромінюючу структуру. Найпростішим варіантом є монофілярна (одновитково) спіральна антена, яка складається з одного провідника, що живиться відносно екрана. У режимі осьового випромінювання довжина витка такої антени має наближатися до довжини хвилі  $\lambda$  (оптимальний діапазон  $0.75\lambda < C < 1.3\lambda$ ), що забезпечує узгодження фазових швидкостей хвиль струму в провіднику та хвилі у вільному просторі. Це явище, відоме як умова Хансена-Вуд'ярда, дозволяє отримати ефект надспрямованості [22]

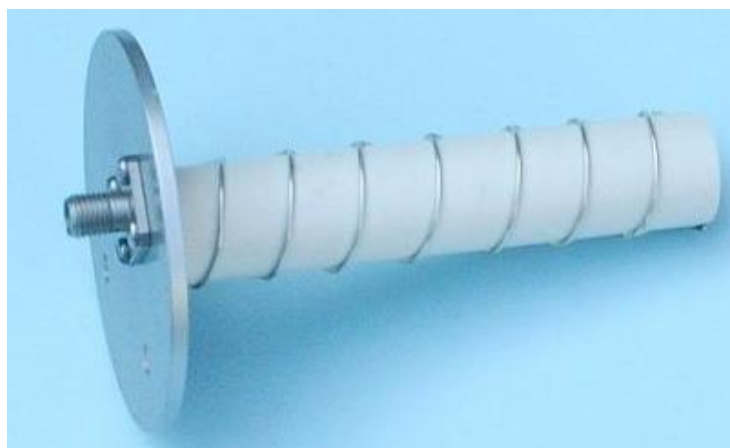


Рисунок 2.1 – Циліндрична спіральна антена



Рисунок 2.2 – Конічна спіральна антена

Однак, монофілярні антени характеризуються певною асиметрією ДС та зміщенням головної пелюстки від осі при зміні частоти, що може бути недоліком для високоточних фазових вимірювань. Більш досконаліми є мультифілярні структури, зокрема біфілярні (двовиткові) та квадрифілярні (чотирьохвиткові) спіральні антени (КСА).

Плоска архімедова спіраль є прикладом біфілярної антени. Для ГНСС потрібне односпрямоване випромінювання вгору. Це досягається розміщенням спіралі над поглинаючим резонатором. Це забезпечує широку смугу, але знижує ККД на 50% (3 дБ), оскільки випромінювання назад поглинається. Використання металевого рефлектора замість поглиначи підвищує ККД, але обмежує смугу через інтерференцію прямої та відбитої хвиль [24, 25]. Для підключення до стандартного 50-омного тракту необхідний ширококутовий балун-трансформатор.



Рисунок 2.3 – Плоска архімедова спіральна антена

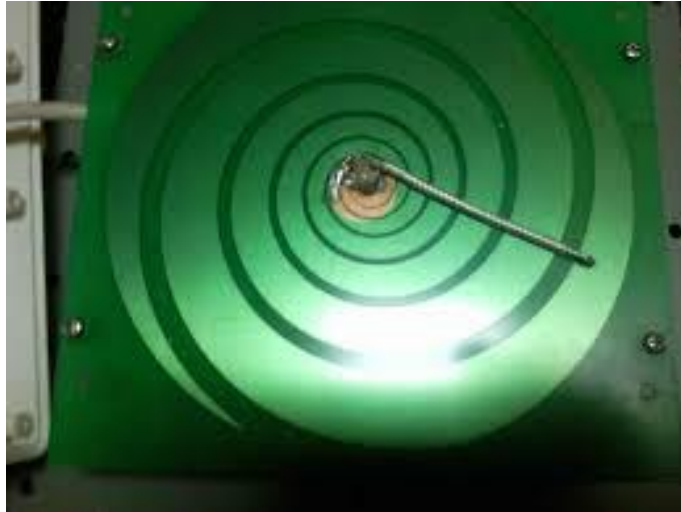


Рисунок 2.4 – Плоска логарифмічна спіральна антена

Квадрифілярна спіральна антена (КСА) складається з чотирьох ідентичних спіральних провідників, зсунутих у просторі на 90 градусів один відносно одного навколо спільної осі. Живлення таких антен здійснюється з фазовим зсувом  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  та  $270^\circ$ , що дозволяє сформувати ідеальну кардіоїдну ДС з чудовим відношенням вперед/назад та високою фазовою стабільністю. Саме КСА вважаються еталоном для приймачів ГНСС, які працюють у складних умовах, оскільки вони не потребують великого екрана та забезпечують прийом сигналів від супутників, що знаходяться як у зеніті, так і біля горизонту [23].



Рисунок 2.5 – Квадрифілярна логарифмічна спіральна антена



Рисунок 2.6 – Квадрифілярна архімедова спіральна антена

Геометрія циліндричної спіральної антени описується математичним апаратом, що пов'язує фізичні розміри з електромагнітними характеристиками. Розглянемо розгортку одного витка спіралі на площині. Вона утворює прямокутний трикутник, катетами якого є довжина кола циліндра  $C = \pi D$  (де  $D$  — діаметр) та крок намотки  $S$  (відстань між сусідніми витками вздовж осі). Гіпотенуза цього трикутника дорівнює довжині провідника одного витка  $L_t$ . Важливим параметром є кут підйому спіралі  $\alpha$ , який визначається співвідношенням:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{S}{\pi D}\right) \quad (2.1)$$

Для забезпечення режиму осьового випромінювання з КП оптимальне значення кута  $\alpha$  знаходиться в межах від 12 до 14 градусів. Довжина витка  $L_t$  повинна бути близькою до довжини хвилі  $\lambda$  на центральній частоті робочого діапазону. Загальна довжина антени  $A$  визначається добутком кількості витків  $N$  на крок намотки  $S$ . Коефіцієнт підсилення спіральної антени в режимі осьового

випромінювання наближено описується емпіричною формулою Крауса:

$$G \approx 12C_\lambda^2 NS_\lambda, \quad (2.2)$$

де  $C_\lambda$  та  $S_\lambda$  — довжина кола та крок, виражені в довжинах хвиль. Ця залежність демонструє, що підсилення можна збільшувати шляхом нарощування кількості витків, однак на практиці існує межа насичення, зумовлена затуханням струму вздовж провідника. Ширина ДС обернено пропорційна кореню квадратному з довжини антени, що дозволяє регулювати сектор огляду [22].

Поляризаційні властивості спіральних антен є їхньою визначальною перевагою. Напрямок обертання поляризації хвилі, що випромінюється або приймається антеною, однозначно визначається напрямком намотки спіралі: права намотка відповідає правій круговій поляризації (ПКП), а ліва — лівій (ЛКП). Якість КП оцінюється за допомогою коефіцієнта еліптичності або осьового відношення (ОВ). Для ідеальної кругової поляризації ОВ дорівнює 1 (0 дБ). У спіральних антенах низьке значення ОВ (менше 3 дБ) зберігається у широкому секторі кутів навколо осі антени, що є наслідком генерації двох ортогональних компонент електричного поля ( $E_\theta$  та  $E_\phi$ ) зі зсувом фаз 90 градусів. У КСА цей зсув фаз забезпечується примусово схемою живлення, що робить поляризацію надзвичайно чистою та стабільною навіть на краях ДС. Це забезпечує ефективну дискримінацію сигналів: антена приймає прямий сигнал від супутника (ПКП) і значно ослаблює сигнали, відбиті від будівель або землі, які при одноразовому відбитті змінюють поляризацію на ліву (ЛКП). Така властивість, відома як крос-поляризаційна розв'язка, є ключовим механізмом боротьби з багатопроменевістю в міських умовах [23].

Окрім циліндричної форми, існують модифікації спіральних антен, такі як конічні та обернено-конічні. У конічних спіралях діаметр витків змінюється вздовж осі, що дозволяє значно розширити робочу смугу частот, оскільки різні ділянки спіралі резонують на різних частотах. Обернено-конічна КСА, де діаметр збільшується від точки живлення до вершини, демонструє покращені характеристики узгодження та ширшу ДС у верхній півсфері, що нагадує форму дискоконусної антени. Математичний опис такої геометрії включає параметр зміни радіуса на виток  $\Delta$ , що дозволяє гнучко керувати вхідним імпедансом антени. Рівняння, що описують координати провідника обернено-конічної спіралі, мають вигляд:

$$\begin{aligned}x(\theta) &= (r_0 + a\theta) \cos \theta; \\y(\theta) &= (r_0 + a\theta) \sin \theta; \\z(\theta) &= C\theta,\end{aligned}\tag{2.3}$$

де  $r_0$  — початковий радіус,  $a$  — коефіцієнт розширення конуса. Використання таких складних геометрій дозволяє досягти відносної смуги пропускання понад 40%, що перекриває діапазони L1, L2 та L5 однією антеною без використання додаткових узгоджувальних кіл [26].

Вхідний імпеданс спіральної антени в осьовому режимі є переважно активним і слабо залежить від частоти, що підтверджує її властивості як антени біжучої хвилі. Для звичайної монофілярної спіралі імпеданс становить близько  $R \approx 140C_\lambda$  Ом, що зазвичай вимагає трансформації до стандартних 50 Ом. У випадку КСА, імпеданс можна регулювати зміною діаметра провідників або використанням короткозамкнених або розімкнених кінців гілок. Для півхвильових резонансних КСА імпеданс може бути низьким, тоді як для антен біжучої хвилі він вищий. Важливим аспектом проектування

є система живлення, яка для КСА повинна забезпечувати рівномірний розподіл амплітуд та квадратурний фазовий зсув. Це реалізується за допомогою гібридних кілець, дільників Вілкінсона або спеціальних фазообертальних кабельних збірок. Стабільність вхідного імпедансу спіральних антен при розміщенні на різних платформах (метал, діелектрик) є вищою порівняно з резонансними патч-антенами, що спрощує їх інтеграцію в кінцеві вироби [26].

## 2.2. Патч-антени: діелектричні матеріали, методи збудження, конструктивні варіанти

Мікросмушкові патч-антени є домінуючим типом антен у масовому сегменті навігаційного обладнання завдяки своїй плоскій конструкції, низькому профілю, механічній міцності та можливості інтеграції безпосередньо в друковані плати пристроїв. У найпростішому вигляді патч-антена являє собою випромінюючий елемент (патч) певної геометричної форми, нанесений на одну сторону діелектричної підкладки, протилежна сторона якої повністю металізована і виконує роль екрана. Принцип роботи патч-антени базується на резонансі електромагнітних хвиль у порожнині між патчем і екраном, де краї патча виступають як випромінюючі щілини. Для застосувань у GPS-навігації, де використовуються частоти L-діапазону (1.1–1.6 ГГц), фізичні розміри та характеристики патч-антени критично залежать від властивостей діелектричного матеріалу підкладки [29].

Вибір діелектричного матеріалу є першочерговим завданням при проектуванні GPS-антени, оскільки він визначає компроміс між розмірами, ефективністю та вартістю. Два основні параметри матеріалу — відносна діелектрична проникність ( $\epsilon_r$ ) та тангенс кута діелектричних втрат ( $\tan \delta$ ) [28]. У бюджетних рішеннях часто

використовується склотекстоліт FR-4 ( $\epsilon_r \approx 4.4, \tan \delta \approx 0.02$ ). Хоча FR-4 є дешевим і технологічним, його високі діелектричні втрати призводять до зниження коефіцієнта корисної дії антени, а нестабільність  $\epsilon_r$  у партії та залежність від вологості можуть зміщувати резонансну частоту, що є критичним для вузькосмугових антен. Для професійних GPS-антен перевага надається спеціалізованим високочастотним ламінатам (наприклад, серії Rogers RT/duroid, Taconic) або керамічним матеріалам. Матеріали типу Rogers 5880 ( $\epsilon_r \approx 2.2, \tan \delta \approx 0.0009$ ) забезпечують високу ефективність випромінювання та стабільність характеристик, але вимагають більших фізичних розмірів патча [29].

Для мініатюризації антен у портативних пристроях широко використовуються спеціальні керамічні підкладки з високою діелектричною проникністю ( $\epsilon_r > 20$ , часто 30-90). Використання таких матеріалів (наприклад, на основі титанатів магнію або барію) дозволяє зменшити лінійні розміри випромінювача пропорційно  $1/\sqrt{\epsilon_r}$ . Наприклад, патч на кераміці з  $\epsilon_r = 20$  буде значно меншим за аналог на повітрі. Керамічні матеріали для НВЧ застосувань характеризуються високою добротністю ( $Q \times f$ ) та низьким температурним коефіцієнтом резонансної частоти ( $\tau_f$ ), що забезпечує стабільну роботу в широкому діапазоні температур. Однак, висока діелектрична проникність призводить до концентрації електромагнітного поля всередині підкладки, що звужує робочу смугу частот антени та може знижувати ефективність випромінювання через збудження поверхневих хвиль [27].

Методи збудження (живлення) патч-антен суттєво впливають на їх узгодження, ширину смуги та ДС. Найпоширенішим є коаксіальне зондове живлення, де центральна жила кабелю проходить крізь підкладку і припаюється до патча в точці, що відповідає вхідному імпедансу 50 Ом. Це простий метод, але в товстих підкладках довгий

зонд вносить значну індуктивну складову, що обмежує смугу пропускання. Інший варіант — живлення мікросмужковою лінією в площині патча з використанням врізок для узгодження. Цей метод технологічний, але лінія живлення може створювати паразитне випромінювання, що спотворює ДС [27].



Рисунок 2.7. – Патч антена з одноточковим живленням

Найбільш досконалим методом для високоякісних навігаційних антен є апертурний зв'язок. У цій конструкції лінія живлення та випромінюючий патч рознесені на різні шари та розділені спільним екраном з апертурою (щілиною). Енергія передається через щілину електромагнітним шляхом. Така архітектура дозволяє незалежно оптимізувати матеріали підкладок: для лінії живлення використовують тонкий діелектрик з високим  $\epsilon_r$  для концентрації поля, а для антени — товстий шар з низьким  $\epsilon_r$  (або навіть повітряний прошарок) для розширення смуги та підвищення ефективності. Апертурний зв'язок усуває паразитне випромінювання лінії живлення, забезпечує симетрію діаграми та дозволяє значно розширити робочу смугу (до 25% і більше), що є критичним для багаточастотних ГНСС антен [35].

Конструктивні варіанти патч-антен для GPS спрямовані на забезпечення КП та роботи в декількох частотних діапазонах. Для отримання КП на квадратному патчі з однією точкою живлення

застосовують метод збурення форми: зрізання протилежних кутів або додавання діагональних щілин. Це розщеплює основний резонанс на дві ортогональні моди з близькими частотами та зсувом фаз  $90^\circ$ . Такий метод простий, але забезпечує вузьку смугу за коефіцієнтом еліптичності. Більш широкосмуговим, але складнішим, є метод подвійного живлення, де дві точки патча збуджуються через квадратурний дільник потужності (гібридний міст  $90^\circ$ ).

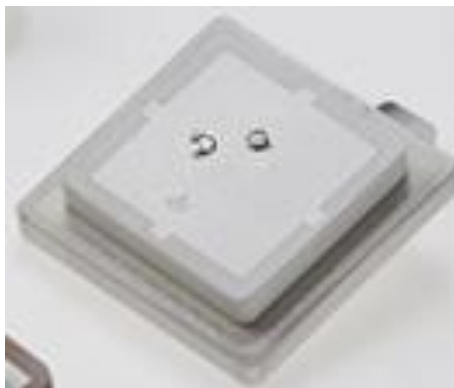


Рисунок 2.8. – Патч антена з двоточковим живленням.

Для роботи одночасно в діапазонах L1 та L2/L5 використовують стекові антени, де два патчі різного розміру розміщуються один над одним. Така конструкція дозволяє сумістити фазові центри обох діапазонів на одній вертикальній осі.

Окремим напрямком є використання метаматеріалів та фрактальних геометрій (наприклад, крива Гільберта або Мінковського) для подальшої мініатюризації антен. Фрактальні межі збільшують ефективну електричну довжину шляху струму, знижуючи резонансну частоту при незмінних габаритах. Також застосовуються E-подібні та U-подібні щілини на поверхні патча, які вводять додаткові ємнісні та індуктивні елементи в еквівалентну схему, дозволяючи отримати мультирезонансні характеристики або розширити смугу пропускання. Сучасні дослідження також фокусуються на використанні високоімпедансних поверхонь або структур з електромагнітною забороненою зоною в якості підкладки або екрана

для придушення поверхневих хвиль та покращення характеристик багатопробеневої, що наближає характеристики патч-антен до рівня еталонних спіральних антен [31].

Підсумовуючи, сучасна патч-антена для GPS — це складний електродинамічний пристрій, де вибір матеріалів (від FR-4 до спецкераміки) та конструктивних рішень (від зрізаних кутів до багатоплощових апертурних структур) визначається жорстким балансом між точністю навігації, габаритами та вартістю виробництва.

### 2.3. Порівняння спіральних і патч-антен

Вибір оптимального випромінюючого елемента для антенної решітки GPS-навігації вимагає глибокого порівняльного аналізу спіральних та патч-антен, оскільки ці два класи випромінювачів базуються на принципово різних фізичних механізмах роботи: спіральні антени функціонують як антени біжучої хвилі, тоді як патч-антени є резонансними системами стоячої хвилі. Це фундаментальне розходження визначає відмінності в їхніх ключових параметрах: коефіцієнті підсилення, формі ДС, якості КП та смузі пропускання.

Коефіцієнт підсилення. Спіральні антени в режимі осьового випромінювання здатні забезпечувати значний коефіцієнт підсилення, який прямо залежить від кількості витків ( $N$ ) та осьової довжини антени. Для типових КСА, що використовуються в навігації, підсилення становить 3–6 дБі. Важливою особливістю спіралі є те, що її ефективна площа апертури не обмежується фізичним діаметром перерізу, а формується вздовж осі поширення хвилі, що дозволяє отримувати високе підсилення при малому поперечному перерізі. Патч-антени, як правило, мають помірне підсилення в зеніті, близько 2–5 дБі (для одиночного елемента), яке сильно залежить від розмірів

екрана та властивостей підкладки. Високодielekтричні керамічні патчі мають менші фізичні розміри, але й менше підсилення та ефективність порівняно з повітряними патчами. Для досягнення підсилення, порівнянного з довгою спіраллю, патч-антени необхідно об'єднувати в решітки, що збільшує площу системи [34].

Діаграма спрямованості. Це один із найбільш критичних параметрів для GPS. КСА формують широку кардіоїдну ДС, яка охоплює майже всю верхню півсферу. Завдяки своїй об'ємній геометрії, вони забезпечують високий рівень підсилення навіть на малих кутах місця ( $5^{\circ}$ – $15^{\circ}$  над горизонтом). Це дозволяє приймати сигнали від більшої кількості супутників, що покращує геометричний фактор та точність позиціонування в умовах обмеженої видимості неба. Патч-антени мають максимум випромінювання в zenіті, але їх ДС звужується і підсилення різко падає при наближенні до горизонту. Типове падіння підсилення на куті місця  $10^{\circ}$  може становити 10–15 дБ відносно zenіту. Це робить патч-антени менш ефективними для роботи з низькоорбітальними супутниками або в динамічних умовах, коли антена нахиляється разом з носієм (наприклад, БПЛА) [36].

Кругова поляризація (КП). Якість поляризації описується коефіцієнтом еліптичності. Спіральні антени генерують КП природним шляхом завдяки гвинтовій геометрії струмів. КСА забезпечують винятково низький рівень ОВ ( $< 3$  дБ) у дуже широкому тілесному куті (майже  $140^{\circ}$ – $160^{\circ}$ ). Це означає, що антена ефективно розрізняє сигнал прямої видимості (ПКП) і придушує відбиті сигнали, які змінюють поляризацію на ліву (ЛКП). У патч-антен КП створюється штучно шляхом збудження двох ортогональних мод. Низький рівень ОВ у патч-антен зазвичай досягається лише у вузькому конусі навколо zenіту. При відхиленні від нормалі якість поляризації швидко деградує, переходячи в еліптичну або лінійну,

особливо біля горизонту. Це робить патч-антени більш вразливими до багатопроменевих завад, що надходять з бокових напрямків [32].

Смуга пропускання.

Спіральні антени, будучи системами біжучої хвилі, є широкосмуговими пристроями. Їхня робоча смуга частот визначається умовою, що довжина витка приблизно дорівнює довжині хвилі, і може становити 40–50% від центральної частоти. Це дозволяє одній спіральній антені легко перекривати декілька навігаційних діапазонів (L1, L2, L5, Glonass, Galileo) без суттєвої зміни характеристик. Патч-антени є високодобротними резонансними системами з вузькою смугою пропускання (типово 1–3% для тонких підкладок). Для роботи в мультидіапазонному режимі патч-антени вимагають використання складних методів розширення смуги (товсті підкладки, паразитні елементи) або багаторезонансних конструкції, що ускладнює налаштування та виробництво. Спіральні антени пропонують значно простіше рішення для широкосмугових застосувань.

Нижче наведено порівняльну таблицю характеристик (Таблиця 2.1), що систематизує відмінності між цими типами антен для застосування в GPS.

З аналізу випливає, що спіральні антени мають беззаперечні переваги в технічних характеристиках (стабільність прийому, поляризація, широкосмуговість), особливо для високоточних та динамічних застосувань. Патч-антени виграють переважно у масогабаритних показниках (низький профіль) та технологічності масового виробництва друкованим методом, однак потребують суттєвих конструктивних ускладнень для досягнення порівнянних радіофізичних параметрів [33, 40].

Таблиця 2.1 Порівняння електродинамічних та експлуатаційних параметрів спіральних та патч-антен для систем ГНСС

Характеристика	Циліндрична спіральна антена	Патч-антена
Фізичний принцип	Біжуча хвиля	Стояча хвиля (Resonant cavity)
Геометрія	Об'ємна (3D), циліндрична	Пласка (2D), низькопрофільна
Діаграма спрямованості	Широка високе підсилення на низьких кутах місця	Напівсферична, різкий спад підсилення до горизонту
Поляризація	Відмінна (ОВ < 3 дБ) у широкому секторі (до горизонту)	Гарна тільки в зеніті, деградує при нахилі
Смуга пропускання	Широка (до 40-50%), природна мультидіапазонність	Вузька (1-5%), потребує стекових структур
Багатопроменевість	Гарне природне придушення (через ОВ та форму ДС)	Потребує великого екрана або Choke Ring
Чутливість до екрана	Працює без великого екрана	Вимагає екрана для формування ДС
Взаємний зв'язок у решітці	Низький (через меншу добротність)	Високий (поверхневі хвилі в підкладці)

#### 2.4. Стабільність фазового центра антен у GPS-приймачах

У прецизійних системах супутникової навігації, таких як КРЧ та МТП, де вимірювання координат здійснюється з точністю до сантиметрів або навіть міліметрів, критично важливим параметром антени є стабільність її фазового центру. Фазовий центр антени — це уявна точка в просторі, з якої, як вважається, випромінюється (або в якій приймається) сферичний хвильовий фронт. В ідеальній антені ця точка є фіксованою і не залежить від напрямку приходу сигналу. Однак

у реальних фізичних антенах положення фазового центру змінюється залежно від азимута ( $\alpha$ ) та кута місця ( $z$ ) супутника, а також від частоти сигналу. Характеристики фазового центру прийнято описувати двома компонентами: зміщенням фазового центру та варіацією фазового центру (ВФЦ) [37].

Зміщення фазового центру визначається як вектор відстані між механічною точкою прив'язки антени, яка зазвичай співпадає з геометричним центром кріплення, та середнім положенням електричного фазового центру (МРС). Вектор зміщення фазового центру має три компоненти (North, East, Up) і є постійною величиною для конкретної конструкції антени на певній частоті. Наприклад, для діапазону L1 фазовий центр може знаходитися на одній висоті, а для L2 — на іншій. Це зміщення обов'язково враховується програмним забезпеченням приймача або при постобробці. Значно складнішим явищем є ВФЦ, яка представляє собою залежні від напрямку (азимута і кута місця) відхилення миттєвого фазового центру від середнього положення. ВФЦ виникає через складну інтерференцію струмів на випромінюючих елементах, дифракцію хвиль на краях екрана та неоднорідності ДС. Величини ВФЦ можуть досягати декількох сантиметрів, що є неприпустимим для геодезії [37, 38].

Порівняння стабільності фазового центру спіральних та патч-антен демонструє суттєві відмінності. Спіральні антени, завдяки своїй високій осьовій симетрії та відсутності великих металевих поверхонь, що викликають дифракцію, мають надзвичайно стабільний фазовий центр. Дослідження показують, що варіації ВФЦ для якісних спіральних антен не перевищують 1–3 мм у межах робочої півсфери. Це робить їх ідеальним вибором для застосувань, де орієнтація антени постійно змінюється (наприклад, на БПЛА або в переносних пристроях), оскільки помилка вимірювання фази залишається мінімальною незалежно від кута падіння променя. Крім того, фазовий

центр спіральних антен менш чутливий до впливу навколишніх предметів завдяки кращій локалізації ближнього поля [39].

Патч-антени демонструють більш складну поведінку. Хоча в зеніті їх фазовий центр може бути стабільним, при зниженні кута місця вплив поверхневих хвиль, що збуджуються в діелектричній підкладці та дифрагують на краях екрана, призводить до значних фазових спотворень. У стандартних мікросмужкових антенах без спеціальних заходів захисту ВФЦ може досягати 10–20 мм поблизу горизонту. Крім того, асиметрія точки живлення (для одноточкових патчів) викликає залежність ВФЦ від азимута. Для досягнення міліметрової стабільності фазового центру в патч-антенах (рівень геодезичного класу) необхідно використовувати великі екрани з дросельними кільцями або резистивними поглиначами, які гасять поверхневі хвилі. Це значно збільшує габарити та вагу антени. У компактних патч-решітках без дросельних кілець, нестабільність фазового центру окремих елементів може бути джерелом систематичних похибок, які важко компенсувати [39].

## Висновки до розділу 2

На основі проведеного комплексного аналізу конструктивних особливостей, електродинамічних параметрів та експлуатаційних характеристик спіральних та патч-антен можна сформулювати обґрунтовані висновки щодо вибору базового елемента для проектування AP GPS-навігації в рамках даної магістерської роботи.

1. Просторова ефективність та покриття: Спіральні антени, зокрема циліндричні, забезпечують значно кращу рівномірність ДС у верхній півсфері. Їх здатність підтримувати високий коефіцієнт підсилення на малих кутах місця є критичною перевагою для забезпечення надійності навігації в умовах міської забудови, лісистій місцевості або при маневруванні носія, коли видимість супутників у зеніті може бути перекрита. Патч-антени, маючи виражений спад підсилення до горизонту, не гарантують стійкого супроводу низькоорбітальних супутників без використання складних просторових конфігурацій.

2. Поляризаційна чистота та завадостійкість: Забезпечення стабільної КП ( $OB < 3$  дБ) у широкому секторі огляду є природною властивістю спіральних антен. Це дозволяє ефективно фільтрувати багатопроменеві завади, які є основним джерелом похибок у міських умовах. Для досягнення аналогічних показників патч-антени потребують складних схем живлення.

3. Точність позиціонування: Висока стабільність фазового центру циліндричних спіральних антен (варіації менше 3 мм) безпосередньо трансформується у підвищення точності фазових вимірювань (КРЧ/МТП). Відсутність значних крайових ефектів та незалежність від великого екрана роблять фазові характеристики спіральних елементів передбачуваними та ідентичними в складі решітки, що спрощує процедуру калібрування та фазування решітки.

4. Ширококутовість та мультидіапазонність: Властивості

антени біжучої хвилі дозволяють одній спіральній структурі ефективно працювати в широкій смузі частот, перекриваючи декілька навігаційних діапазонів (наприклад, L1 та L2) без необхідності ускладнення конструкції стековими елементами, як це необхідно для резонансних патч-антен.

5. Мінімізація взаємного впливу: В антенних решітках взаємний зв'язок між елементами може суттєво погіршувати характеристики. Спіральні антени, маючи меншу добротність та меншу концентрацію полів у підкладці (оскільки вони часто повітряні або на пінній основі), демонструють менший взаємний вплив порівняно з патч-антенами на спільній діелектричній підкладці, де збуджуються поверхневі хвилі.

Підсумок вибору:

Враховуючи сукупність факторів — широку ДС, відмінну якість КП на низьких кутах, високу стабільність фазового центру, природну широкосмуговість — у магістерській роботі перевагу надано циліндричній спіральній антені як базовому елементу антенної решітки. Цей вибір забезпечує оптимальний баланс між точністю навігації, завадостійкістю та складністю реалізації системи.

### 3. ТЕОРІЯ АНТЕННИХ РЕШІТОК ДЛЯ GPS ТА ЇХ ФУНКЦІОНАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ

#### 3.1. Теоретичні засади формування електромагнітного поля та принципи побудови антенних решіток супутникової навігації

Сучасний розвиток систем глобального позиціонування (GPS) висуває дедалі суворіші вимоги до антенних систем, що є критично важливою ланкою у ланцюзі передачі інформації від супутника до користувача. Забезпечення високоточного позиціонування, особливо в умовах складного електромагнітного оточення, багатопроменевого поширення сигналу та можливих навмисних завад, вимагає від антенних пристроїв не лише стабільності фазового центру та широкої смуги робочих частот, але й високого коефіцієнта підсилення та специфічних поляризаційних характеристик. У цьому контексті перехід від поодиноких випромінювачів до АР є закономірним еволюційним кроком, що дозволяє реалізувати гнучке керування просторовими характеристиками випромінювання. Теоретичний базис проектування таких систем ґрунтується на фундаментальних принципах електродинаміки та теорії антен, зокрема на використанні спіральних та мікросмужкових (патч) випромінювачів, які найкраще відповідають специфіці сигналів GPS з КП.

Фундаментальною основою теорії АР є принцип суперпозиції електромагнітних полів. Результуюче поле системи випромінювачів у дальній зоні визначається векторною сумою полів, створюваних кожним окремим елементом, з урахуванням їхньої просторової орієнтації, амплітуди та фази збудження. Ключовим поняттям тут виступає множник решітки, який є функцією геометрії розташування елементів та фазо-амплітудного розподілу струмів [41, 44]. Для типової планарної решітки розмірністю  $2 \times 2$ , яка розглядається як

оптимальна конфігурація для багатьох застосувань GPS, включаючи малогабаритні супутники стандарту CubeSat та наземні високоточні приймачі, множник решітки визначається інтерференційною картиною, що формується чотирма джерелами [61]. Як зазначається у роботах, присвячених теорії спіральних антен, використання решітки дозволяє не лише збільшити сумарний коефіцієнт підсилення, але й звузити головну пелюстку ДС, що є критичним для відсікання завад, які надходять з малих кутів місця.

Математичний опис множника решітки для чотирьохелементної системи вимагає врахування відстані між фазовими центрами випромінювачів. Відстань  $D$  є критичним параметром оптимізації. Згідно з теоретичними дослідженнями [62], якщо розглядати пару спіральних антен як найпростішу решітку, функція множника решітки полягає у модуляції ДС окремого елемента [42, 43]. Інтуїтивно зрозуміло, що перший нуль множника решітки повинен потрапляти в межах головної пелюстки окремого елемента для ефективного звуження променя. Якщо відстань  $D$  є занадто малою, нуль множника решітки віддаляється від осі візування, наближаючись до нулів власної діаграми елемента, що нівелює ефект звуження променя та призводить до незначного приросту підсилення. З іншого боку, надмірне збільшення відстані  $D$  призводить до того, що нулі множника решітки потрапляють у зону головного максимуму випромінювання елементів, що викликає появу паразитних бічних пелюсток високого рівня. Оптимізаційні дослідження показують, що для L-діапазону (частоти близько 1 ГГц - 1.6 ГГц) оптимальна відстань між центрами елементів лежить у межах від 400 мм до 600 мм, що становить приблизно  $1.3\lambda$  -  $2.0\lambda$  [42].

Особливістю AP для GPS є необхідність роботи з КП. Сигнали GPS випромінюються з правою круговою поляризацією (ПКП). Приймальна антена повинна мати високий ступінь узгодження за

поляризацією, що характеризується коефіцієнтом еліптичності або ОВ. Теоретично ідеальна антена має  $ОВ = 1$  (0 дБ). Спіральні антени є природними джерелами випромінювання з КП в осьовому режимі. Теорія спіральної антени, детально описана в класичних працях та сучасних дослідженнях [67, 71], пов'язує геометричні параметри спіралі (діаметр  $D_{helix}$ , крок намотки  $S$ , довжину витка  $C$ ) з робочою довжиною хвилі  $\lambda$ . Для забезпечення осьового режиму випромінювання довжина витка  $C$  повинна знаходитися в межах  $3/4\lambda < C < 4/3\lambda$ . У цьому режимі хвиля струму, що поширюється вздовж провідника спіралі, має фазову швидкість, яка забезпечує додавання полів від кожного витка у фазі вздовж осі антени (умова Хансена-Вуд'ярда).

Однак класична теорія рівномірних спіралей має обмеження щодо смуги пропускання та коефіцієнта підсилення. Сучасні підходи, пропонують використання нерівномірних (конічних) спіральних антен, у яких радіус витків та крок намотки змінюються вздовж осі антени. Це вводить додаткові ступені вільності при проектуванні. Математично профіль такої спіралі описується функціями зміни радіуса  $r(z)$  та кроку  $p(z)$ . Лінійна зміна цих параметрів дозволяє розширити робочу смугу частот та покращити узгодження, оскільки різні ділянки спіралі резонують на дещо відмінних частотах, формуючи квазі-широкопasmову структуру. Теоретичні розрахунки показують, що оптимально спроектована нерівномірна спіральна антена може мати коефіцієнт підсилення на 2.5 дБ вищий порівняно з рівномірною спіраллю тієї ж осьової довжини [74]. Це є суттєвим фактором для енергетичного бюджету навігаційної апаратури.

Важливим аспектом теорії є також аналіз фазових співвідношень у решітці. У фазованих антенних решітках керування напрямком головного пелюстка здійснюється шляхом зміни фазового розподілу збудження елементів. Для решітки, елементи якої

розташовані в площині  $XU$ , фазовий зсув  $\beta$ , необхідний для відхилення променя на кут  $\theta_0$  (кут місця) та  $\phi_0$  (азимут), визначається хвильовим числом  $k$  та відстанню між елементами. Як наведено у джерелі <sup>1</sup>, модуль множника решітки для симетричної квадратної решітки може бути виражений через добуток синусів, аргументи яких залежать від кутових координат та фазових зсувів. Це дозволяє аналітично передбачати положення нулів та максимумів ДС. Для задач GPS, де супутники можуть знаходитися в будь-якій точці верхньої півсфери, можливість електронного сканування променем дозволяє значно підвищити рівень прийнятого сигналу від обраного супутника, компенсуючи втрати на поширення та можливу невідповідність орієнтації антени (наприклад, на рухомому об'єкті або супутнику CubeSat) [61].

Крім того, теоретичний аналіз повинен враховувати вплив "землі" або рефлектора. У конструкціях GPS антен часто використовується провідний екран, який виконує подвійну функцію: екранує антену від випромінювання з нижньої півсфери (що зменшує вплив перевідбитих від землі сигналів, які мають паразитну ліву кругову поляризацію) та збільшує підсилення у верхню півсферу за рахунок відбиття. Взаємодія випромінювача з екраном може бути змодельована методом дзеркальних зображень, однак для складних структур (спіралі скінченної довжини, патч-антени на діелектрику) необхідне застосування строгих чисельних методів. Дослідження показують, що розміри екрану суттєво впливають на імпеданс антени та рівень задніх пелюсток. Оптимізація розмірів рефлектора є невід'ємною частиною теоретичного синтезу антенної системи [74].

Таким чином, теоретичні засади проектування AP для GPS охоплюють комплекс питань від вибору типу випромінювача та його геометричної оптимізації до аналізу інтерференційних явищ у системі випромінювачів та врахування впливу конструктивних елементів.

Синтез високоефективної антени вимагає балансу між максимізацією підсилення, забезпеченням чистоти поляризації та стабільністю характеристик у робочій смузі частот, що досягається застосуванням сучасних методів математичного моделювання.

### 3.2. Математичне моделювання та методи оптимізації геометричних параметрів випромінювачів

Розробка антенних систем для GPS-навігації, зокрема спіральних решіток, є складною багатопараметричною задачею, яка не може бути вирішена виключно аналітичними методами через складність геометрії та необхідність врахування тонких електродинамічних ефектів, таких як взаємний зв'язок між елементами та вплив кінцевих розмірів екрану. Тому центральне місце в процесі проектування займає чисельне електромагнітне моделювання (СЕМ) та алгоритмічна оптимізація. Сучасні програмні комплекси, такі як WIPL-D, 4NEC2, HFSS, використовують різні методи розв'язання рівнянь Максвелла, серед яких найбільш ефективним для дротяних та поверхневих структур є метод моментів (МоМ).

У контексті моделювання спіральних антен, метод моментів дозволяє замінити неперервний розподіл струму вздовж провідника скінченним набором базисних функцій. Для підвищення точності та швидкості обчислень доцільно використовувати базисні функції вищого порядку [74]. Це дозволяє суттєво зменшити кількість невідомих у системі лінійних алгебраїчних рівнянь порівняно з використанням простих кусково-постійних функцій (наприклад, імпульсних), що є критичним при виконанні тисяч ітерацій у процесі оптимізації [75, 82].

Особливу увагу при моделюванні приділяють параметризації геометрії нерівномірної спіралі. Відповідно до [62], геометрія описується п'ятьма ключовими змінними оптимізації: радіус витка на початку спіралі ( $r_1$ ), радіус витка в кінці спіралі ( $r_2$ ), крок намотки на початку ( $p_1$ ), крок намотки в кінці ( $p_2$ ) та загальна відстань між центрами антен у решітці ( $D$ ). Радіус і крок змінюються лінійно вздовж осі  $z$  за формулами:

$$\begin{aligned} r(z) &= (r_2 - r_1) \frac{z}{L} + r_1; \\ p(z) &= (p_2 - p_1) \frac{z}{L} + p_1, \end{aligned} \quad (3.1)$$

де  $L$  — повна довжина антени. Введення цих змінних перетворює задачу проектування на задачу нелінійного математичного програмування з обмеженнями. Обмеження накладаються виходячи з фізичних можливостей реалізації та габаритних вимог. Наприклад, для частоти 1 ГГц діапазон зміни радіусів може становити 25-50 мм, а кроку — 10-50 мм.

Процес пошуку оптимального рішення вимагає застосування ефективних алгоритмів глобальної оптимізації, оскільки цільова функція (функція якості) АР має складний рельєф з великою кількістю локальних екстремумів. Простого градієнтного спуску в таких умовах недостатньо, оскільки він з високою ймовірністю застрягне в найближчому локальному мінімумі. У роботі [74] продемонстровано високу ефективність комбінованого підходу, що поєднує алгоритм рою часток (PSO) та локальний симплекс-метод Нелдера-Міда [74].

1. Алгоритм рою часток (PSO): На першому етапі генерується "рій" випадкових рішень (векторів параметрів) у просторі пошуку. Кожне рішення ("частка") рухається в просторі параметрів, оновлюючи свою швидкість та позицію на основі власного найкращого

досягнутого результату та глобального найкращого результату всього рою. Це дозволяє ефективно дослідити простір пошуку та знайти область глобального оптимуму.

2. Симплекс-метод Нелдера-Міда: Після того, як алгоритм PSO збігається в певну область, знайдене найкраще рішення використовується як початкова точка для методу Нелдера-Міда. Цей метод не вимагає обчислення градієнтів (які можуть бути шумними в чисельних задачах електродинаміки) і дозволяє точно уточнити параметри, спускаючись на саме "дно" ями оптимізації.

Цільова функція  $f(x)$  формулюється виходячи з вимог технічного завдання. Для GPS-антени вона зазвичай включає вимоги щодо максимізації підсилення в зеніті, мінімізації коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) та забезпечення низького ОВ. Оскільки це багатокритеріальна задача, цільову функцію конструюють як зважену суму окремих критеріїв. Наприклад, у 1 використовується функція вартості виду:

$$f = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{k=1}^N (100 - Gain_k)^2} + \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{k=1}^N (\max(S_{11,k} + 15))^2}, \quad (3.2)$$

де підсумовування ведеться по  $N$  частотних точках у робочому діапазоні. Перший доданок стимулює зростання підсилення (прагнучи до умовних 100 дБ, що є недосяжним ідеал, таким чином завжди максимізуючи реальне значення), а другий — штрафує за перевищення коефіцієнтом відбиття  $S_{11}$  рівня -15 дБ. Такий підхід дозволяє одночасно оптимізувати і енергетичні, і узгоджувальні характеристики у смузі частот.

Моделювання також дозволяє врахувати вплив реальних матеріалів та конструктивних елементів. Наприклад, введення в модель діелектричних опор з акрилового скла, на які намотується провід спіралі, призводить до зміщення резонансних частот вниз приблизно на 5% через ефективну діелектричну проникність, що є вищою за одиницю. У програмних комплексах це враховується або

шляхом явного моделювання діелектричних об'єктів (що збільшує час розрахунку), або введенням еквівалентних поправок. Також враховуються втрати в провідниках шляхом задання скінченної провідності (наприклад,  $\sigma = 29$  МСм/м для міді з урахуванням шорсткості поверхні на частоті 1 ГГц) [74].

Окремим важливим аспектом моделювання є візуалізація та аналіз отриманих результатів. Побудова тривимірних ДС дозволяє оцінити форму головної пелюстки, рівень бічних пелюсток та наявність паразитних випромінювань у задню півсферу. Аналіз розподілу струмів на поверхні антени дозволяє виявити "гарячі точки" з високою густиною струму, які можуть призводити до локального перегріву або підвищених омичних втрат. Графіки залежності коефіцієнта відбиття  $S_{11}$  від частоти (діаграма Сміта або декартові графіки) дають уявлення про якість узгодження у смузі частот. Як видно з результатів моделювання, оптимізована АР демонструє стабільний коефіцієнт підсилення понад 20 dBi та КСХ < 1.5 у відносній смузі частот до 25%, що підтверджує ефективність застосованих алгоритмів оптимізації [62].

### 3.3. Проектування та електродинамічне узгодження розподільчих мереж живлення антенних решіток

Ефективність функціонування антенної решітки визначається не лише характеристиками окремих випромінювачів, але й якістю системи їх живлення. Розподільча мережа виконує дві критичні функції: розподіл потужності від спільного входу до кожного елемента решітки з необхідними амплітудно-фазовими співвідношеннями та трансформацію вхідного імпедансу елементів до стандартного хвильового опору тракту (зазвичай  $Z_0 = 50$  Ом). Для чотирьохелементних решіток GPS (2×2) найбільш поширеною є схема

корпоративного живлення, яка забезпечує рівномірний розподіл амплітуд та синфазне збудження всіх елементів для формування максимуму ДС вздовж нормалі до площини решітки.

Складність проектування мережі живлення для спіральних антен полягає у їхньому високому входному імпедансі. У робочому осьовому режимі входний опір спіральної антени становить близько 140–150 Ом, що суттєво відрізняється від стандартних 50 Ом коаксіальних кабелів. У складі решітки цей імпеданс додатково модифікується через ефекти взаємного зв'язку між елементами [76]. Тому проектування мережі живлення повинно виконуватися з урахуванням активного імпедансу елементів у складі решітки [56]. Ефективним рішенням є використання мікросмужкових технологій, зокрема інвертованих мікросмужкових ліній. Конструктивно така лінія складається з провідника, розташованого на нижньому боці тонкої діелектричної підкладки, яка, у свою чергу, піднята над провідним екраном на певну висоту  $h$  за допомогою дистанційних опор. Основна частина поля в такій структурі зосереджена в повітряному проміжку, що зменшує діелектричні втрати та дисперсію, а також дозволяє реалізувати лінії з вищим хвильовим опором (понад 100 Ом) при прийнятній ширині провідника, що спрощує виготовлення.

Топологія мережі живлення часто має Н-подібну форму, що забезпечує симетрію довжин шляхів проходження сигналу до всіх чотирьох антен. Структура мережі включає каскад трансформаторів імпедансу:

1. Перший каскад: Пари антен з'єднуються лініями передачі з хвильовим опором  $Z_{cl}$ . Ці лінії трансформують високий імпеданс спіралей (наприклад,  $Z_{ant} \approx 150$  Ом) до певного проміжного значення в точці з'єднання.

2. Точка з'єднання А/В: У вузлах розгалуження відбувається

паралельне з'єднання трансформованих імпедансів двох антен.

3. Другий каскад: Від точок А та В до центрального входу йдуть лінії з хвильовим опором  $Z_{c2}$ , які виконують фінальну трансформацію до 50 Ом.

Розрахунок хвильових опорів  $Z_{c1}$  та  $Z_{c2}$  базується на теорії чвертьхвильових трансформаторів, однак через широкосмуговість вимог та комплексний характер навантаження (антен), точні значення знаходяться шляхом оптимізації в електродинамічних симуляторах. Наприклад, для досягнення узгодження у смузі 0.9–1.1 ГГц було знайдено оптимальні значення  $Z_{c1} = 155$  Ом та  $Z_{c2} = 112$  Ом. При цьому фізична реалізація таких ліній вимагає точного розрахунку ширини провідників [57, 58].

Альтернативним та більш досконалим підходом є використання дільників потужності Вількінсона. Цей тип дільника не лише розділяє потужність, але й забезпечує розв'язку між вихідними портами завдяки наявності баластного резистора, увімкненого між виходами. Це критично важливо для решіток, оскільки зменшує вплив відбитого сигналу від одного неузгодженого елемента на роботу інших. У класичному виконанні дільник Вількінсона складається з двох чвертьхвильових відрізків лінії з хвильовим опором  $\sqrt{2}Z_0$  та резистора опором  $2Z_0$ . Для компактних застосувань (наприклад, у CubeSat) довгі чвертьхвильові відрізки на частоті 2.4 ГГц можуть займати забагато місця. У таких випадках застосовують еквівалентні схеми на зосереджених елементах — котушках індуктивності та конденсаторах. Однак, на частотах вище 1-2 ГГц кращі

характеристики стабільності та повторюваності демонструють друковані топології [79].

При проектуванні також враховуються паразитні реактивності в місцях згинів ліній та Т-подібних розгалужень. Різкі повороти провідників викликають зміну ємності та індуктивності лінії, що призводить до відбиттів. Для компенсації цих ефектів застосовують зрізані кути або плавні радіусні заокруглення. У <sup>1</sup> наведено результати S-параметричного аналізу мікросмушкового діляника 1-на-4, який демонструє рівномірний розподіл потужності (-6.3 дБ на канал, що близько до теоретичного -6 дБ) та високий рівень узгодження на вході ( $S_{11} < -25$  дБ) на центральній частоті [80].

Інтеграція мережі живлення з антеною вимагає вирішення механічних проблем. Використання діелектричних розпірок та гвинтів для фіксації підкладки над екраном може вносити локальні неоднорідності імпедансу. У роботі <sup>1</sup> описано конструкцію "сендвіча", де плата з інвертованими лініями притискається до екрану через акрилові рамки нейлоновими гвинтами. Вплив таких елементів хоч і є малим, але повинен враховуватися при фінальному налаштуванні довжин трансформаторів у симуляторі. Результатом успішного проектування є мережа, яка забезпечує вхідний імпеданс всієї системи, близький до 50 Ом (наприклад,  $Z_{in} \approx 38 - j5$  Ом, що легко доводиться до ідеалу <sup>1</sup>), у всій робочій смузі частот, не вносячи при цьому суттєвих омічних втрат, які б знижували загальний ККД антени.

Таблиця 3.1 - Порівняльний аналіз технологій ліній передачі для мереж живлення GPS антен.

Тип лінії живлення	Переваги	Недоліки	Застосування
Коаксіальний кабель	Повне екранування, низькі втрати	Громіздкість, складність монтажу фазової схеми	Наземні станції, прототипи
Мікросмужкова лінія	Компактність, дешевизна, простота інтеграції	Вищі втрати в діелектрику, паразитне випромінювання	CubeSats, масові приймачі
Інвертований мікросмужок	Низькі втрати (повітря), високий імпеданс	Складніша механічна конструкція (потребує опор)	Високоєфективні спіральні решітки <sup>1</sup>
Стріплайн	Відсутність випромінювання, хороша розв'язка	Складність виготовлення (багатошарові плати)	Військові та прецизійні GPS

#### 3.4. Аналіз функціональних характеристик та енергетичного бюджету радіоканалів

Функціональні можливості антенних решіток у системах GPS безпосередньо визначають якість навігаційного обслуговування, точність позиціонування та завадостійкість приймальної апаратури. Основним критерієм ефективності є здатність антени забезпечити достатнє відношення сигнал/шум на вході приймача. Для оцінки цього показника використовується розрахунок енергетичного бюджету радіолінії, який враховує всі джерела підсилення та втрат сигналу на шляху від супутника до користувача.

Ключовим параметром, що вноситься  $AP$ , є коефіцієнт підсилення ( $G_{Rx}$ ). Перехід від поодинокого випромінювача до решітки  $2 \times 2$  дозволяє отримати приріст підсилення близько 6 дБ. У рівнянні

дальності зв'язку (рівняння Фрііса) потужність на вході приймача  $P_{Rx}$  визначається як:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} + L_{FSPL} + L_{losses}, \quad (3.3)$$

де  $L_{FSPL}$  — втрати у вільному просторі, які для орбіти GPS (близько 20200 км) на частоті 1.575 ГГц становлять приблизно 182-184 дБ. Високий  $G_{Rx}$  решітки дозволяє компенсувати ці значні втрати та забезпечити "запас на завмирання" порядку 10-15 дБ. Такий запас є критичним для роботи в умовах міської забудови або під густим листям дерев, де сигнал може додатково загасати.

Наприклад, розрахунок бюджету для лінії зв'язку CubeSat на низькій навколоземній орбіті, наведений у [61], показує, що навіть на відстані 1000 км (біля горизонту) при використанні решітки вдається підтримувати зв'язок. У випадку GPS, де відстані значно більші, кожний децибел підсилення антени є цінним. Крім того, високе підсилення решітки дозволяє використовувати її не лише для прийому навігаційних сигналів, але і як передавальну антену для телеметрії або високошвидкісних даних (наприклад, по протоколу 802.11b зі швидкістю 11 Мбіт/с) на супутниках типу CubeSat, що підтверджує багатофункціональність таких антенних систем.

Другою критичною характеристикою є просторова селективність. Діаграма спрямованості решітки  $2 \times 2$  має головну пелюстку шириною близько  $30^\circ$ - $40^\circ$  (за рівнем -3 дБ). Це забезпечує просторову фільтрацію сигналів. Сигнали від супутників, що знаходяться в зеніті або на високих кутах місця, приймаються з максимальним підсиленням, тоді як сигнали завад, які часто приходять з горизонту або знизу (перевідбиття від землі), потрапляють у область бічних пелюсток або нулів діаграми, де їх рівень значно ослаблюється. Рівень першої бічної пелюстки для такої решітки становить близько -

11...-13 дБ відносно головного максимуму, що є хорошим показником для пригнічення інтерференції.

Важливою функціональною можливістю, яку надають AP, є керування променем [55]. У фазованих решітках введення фазового зсуву між елементами дозволяє відхиляти головний промінь від нормалі. Згідно з даними [62], для решітки спіральних антен можливе сканування в межах  $\pm 40^\circ$  без суттєвої деградації форми променя. Це відкриває можливості для створення адаптивних систем, які можуть автоматично "наводити" нулі діаграми на джерела потужних завад, зберігаючи прийом корисних сигналів з інших напрямків [48, 49]. Графіки залежності множника решітки від кута сканування показують, що при великих кутах відхилення (більше 40-50 градусів) починає падати загальне підсилення та зростати рівень паразитних пелюсток, що обмежує робочий сектор сканування, але він залишається достатнім для більшості навігаційних задач [50. 53].

Поляризаційні характеристики решітки також відіграють важливу роль в енергетичному бюджеті. Невідповідність поляризації антени та хвилі призводить до втрат. Сигнал GPS має ПКП. Якщо антена має ідеальну КП (ОВ = 1 або 0 дБ), втрати відсутні. Якщо ж антена має еліптичну або лінійну поляризацію, втрати можуть сягати 3 дБ і більше. AP на основі нерівномірних спіралей демонструє виключно низьке осьове відношення (ОВ < 1.4) у широкій смузі частот. Це пояснюється як властивостями самих спіральних елементів, так і ефектом усереднення поляризаційних помилок при складанні полів від чотирьох ідентичних випромінювачів. Висока чистота поляризації також сприяє пригніченню багатопроменевих сигналів, які при відбитті змінюють поляризацію на протилежну (ліву кругову).

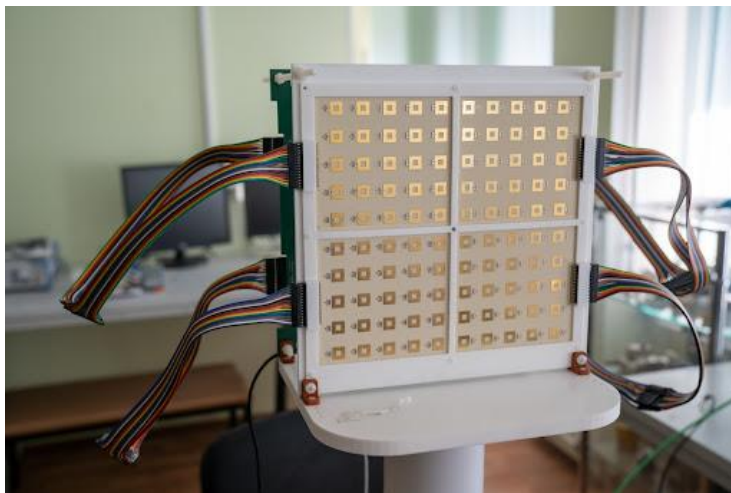


Рисунок 3.1 – Антенна решітка на основі патч антен

### Висновки до розділу 3

Третій розділ роботи присвячено теоретичному обґрунтуванню та розробці методологічних засад побудови антенних решіток для систем супутникової навігації, що базується на глибокому розумінні електродинамічних процесів формування поля випромінювання. Теоретичний аналіз підтвердив, що використання антенних решіток, зокрема планарної конфігурації  $2 \times 2$ , є найбільш ефективним способом підвищення енергетичного потенціалу радіолінії та забезпечення просторової фільтрації завад. Розглянуті математичні моделі множника решітки дозволили встановити чіткі взаємозв'язки між геометрією розміщення елементів, їх фазовим збудженням та формою результуючої діаграми спрямованості, довівши можливість формування вузького променя з високим коефіцієнтом підсилення, що є критичним для роботи зі слабкими сигналами ГНСС.

Важливою частиною теоретичних досліджень стало обґрунтування використання спіральних випромінювачів, теорія яких базується на принципах антен біжучої хвилі. Аналіз показав, що використання нерівномірних кінчних спіралей дозволяє оптимізувати розподіл струму вздовж провідника, розширити робочу смугу частот та покращити узгодження. Застосування сучасних методів математичного моделювання та алгоритмів глобальної оптимізації дало змогу синтезувати геометрію випромінювачів, яка забезпечує виконання вимог щодо осьового коефіцієнта та коефіцієнта підсилення. Теоретичні розрахунки підтвердили переваги використання базисних функцій вищого порядку при розв'язанні електродинамічних задач методом моментів для підвищення точності моделювання складних спіральних структур.

Окрему увагу в розділі приділено проектуванню та електродинамічному узгодженню розподільчих мереж живлення, які є

невід'ємною частиною антенної системи. Порівняльний аналіз технологій ліній передачі, результати якого узагальнені в Таблиці 3.1, дозволив обґрунтувати вибір мікросмужкових технологій та дільників Вількінсона для реалізації схеми живлення. Ця таблиця наочно демонструє переваги та недоліки різних типів ліній, підтверджуючи доцільність обраного підходу для забезпечення компактності, технологічності та необхідного рівня розв'язки між каналами. Теоретично доведено, що правильно спроектована мережа живлення здатна забезпечити стабільний фазово-амплітудний розподіл у широкій смузі частот, що є необхідною умовою для ефективного функціонування фазованої решітки та реалізації режимів електронного сканування променем без появи паразитних дифракційних пелюстків.

## РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

Проектування сучасних антенних систем для L-діапазону (1–2 ГГц) є актуальним науково-технічним завданням, що обумовлено широким використанням цього частотного спектру в системах ГНСС, супутникового зв'язку та телеметрії. Ключовими вимогами до таких систем є забезпечення КП для мінімізації втрат при проходженні сигналу крізь іоносферу та усунення необхідності точного орієнтування приймальної антени відносно передавальної, а також високий коефіцієнт підсилення для роботи з сигналами низької потужності.

У даному розділі розробляється антенна решітка, що складається з чотирьох спіральних антен, які працюють в осьовому режимі. Вибір саме спіральної антени як базового елемента обґрунтований її унікальною здатністю природним чином формувати КП у широкій смузі частот, яка часто перевищує 50% від центральної частоти, та стабільним вхідним імпедансом, що спрощує проектування узгоджувальних кіл.[68] Розрахунок виконується для частотного діапазону 1200–1600 МГц, що охоплює важливі навігаційні смуги (зокрема GPS L1, L2, Galileo E1, E5b, GLONASS), із використанням кількості витків  $N=6$ , що забезпечує компроміс між габаритними розмірами та спрямованістю.[69] Розділ структурований таким чином, щоб послідовно викласти методику синтезу одиночного випромінювача з детальним аналізом його геометричних та електродинамічних параметрів (підрозділ 2.1), а потім перейти до AP 2x2, аналізу множника решітки, взаємного впливу елементів та розрахунку інтегральних характеристик системи (підрозділ 2.2).

#### 4.1 Розрахунок спіральної антени

Спіральна антена, винайдена Джоном Краусом у 1946 році, належить до класу антен біжучої хвилі [51, 66]. В осьовому режимі, який є основним для даного проектування, антена випромінює хвилю з КП вздовж своєї осі, при цьому максимум випромінювання формується завдяки конструктивній інтерференції полів від кожного витка у напрямку поширення хвилі [67, 71]. Для забезпечення цього режиму довжина кола витка спіралі  $C$  повинна бути порівнянною з довжиною хвилі  $\lambda$  [70].

Функціонування спіральної антени можна описати через модову теорію. Спіраль підтримує поширення різних типів струмових хвиль. Для формування осьового випромінювання необхідно збудити моду  $T_1$ , при якій струм уздовж провідника поширюється зі швидкістю, близькою до швидкості світла, але фазова швидкість хвилі вздовж осі спіралі сповільнюється внаслідок геометричної структури [67].

Умова існування осьового режиму визначається емпіричним співвідношенням, яке пов'язує довжину кола витка  $C$  з робочою довжиною хвилі  $\lambda$ :

$$0.75\lambda < C < 1.33\lambda.$$

Це співвідношення є фундаментальним критерієм для проектування. Якщо  $C < 0.75\lambda$ , антена переходить у нормальний режим, випромінюючи перпендикулярно до осі (як рамкова антена або диполь), що не відповідає вимогам завдання.<sup>3</sup> Якщо ж  $C > 1.33\lambda$ , виникають моди вищих порядків, що суттєво спотворює ДС та погіршує ОВ [69].

Для заданого діапазону частот  $\Delta f = 1200 - 1600$  МГц необхідно обрати геометричні параметри таким чином, щоб умова осьового режиму виконувалася на всьому інтервалі.

Розрахунок довжин хвиль:

Швидкість світла у вакуумі приймаємо  $c \approx 3 * 10^8$  м/с.

1. Центральна частота ( $f_0$ ):

$$f_0 = \frac{f_{min} + f_{max}}{2} = \frac{1200 + 1600}{2} = 1400 \text{ МГц}$$

Довжина хвилі на центральній частоті:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{3 * 10^8}{1400 * 10^6} = 0,21414 \text{ м} = 214,14 \text{ мм}$$

2. Мінімальна частота ( $f_{min} = 1.2$  ГГц):

$$\lambda_{min} = \frac{c}{f_{min}} = \frac{3 * 10^8}{1200 * 10^6} = 0,25 \text{ м} = 250 \text{ мм}$$

3. Максимальна частота ( $f_{max} = 1.6$  ГГц):

$$\lambda_{max} = \frac{c}{f_{max}} = \frac{3 * 10^8}{1600 * 10^6} = 0,1875 \text{ м} = 187,5 \text{ мм}$$

Геометрія циліндричної спіральної антени однозначно визначається наступними параметрами: діаметром спіралі  $D$ , кроком намотування  $S$  (відстань між центрами сусідніх витків) та кількістю витків  $N$  [63, 64].

1. Визначення діаметра спіралі ( $D$ ):

Для забезпечення максимального коефіцієнта підсилення в центрі смуги пропускання оптимально обрати довжину кола витка  $C$  рівною довжині хвилі  $\lambda_0$ :

$$C = \pi D = \lambda_0 = 214,14 \text{ мм}$$

Звідси діаметр спіралі:

$$D = \frac{C}{\pi} = \frac{214.14}{3.14} \approx 68.2 \text{ мм}$$

Перевірка умови працездатності на краях діапазону:

- На частоті 1200 МГц відносна довжина кола  $C_{min}$  становить:

$$C_{min} = \frac{C}{\lambda_{min}} = \frac{214.14}{250} \approx 0.86.$$

Отримане значення  $0.86 > 0.75$ , отже, умова нижньої границі виконується із запасом [70].

- На частоті 1600 МГц відносна довжина кола  $C_{max}$  становить:

$$C_{max} = \frac{C}{\lambda_{max}} = \frac{214.14}{187.5} \approx 1.14.$$

Значення  $1.142 < 1.33$ , отже, умова верхньої границі також виконується.

Таким чином, обраний діаметр  $D = 68.2$  мм забезпечує стабільний осьовий режим у всьому заданому діапазоні.

## 2. Кут намотування ( $\alpha$ ) та крок спіралі ( $S$ ):

Кут намотування  $\alpha$  визначає співвідношення між кроком та довжиною кола. Згідно з дослідженнями Крауса, оптимальний діапазон  $\alpha$  становить  $12^\circ - 14^\circ$ . Для розрахунку приймемо стандартне значення  $\alpha = 13^\circ$ , яке забезпечує оптимальний баланс між коефіцієнтом підсилення та ОВ [71].

Крок спіралі  $S$  розраховується за формулою:

$$S = C \tan \alpha = 214.14 \tan 13^\circ = 214.14 * 0.23 = 49.25 \text{ мм.}$$

## 3. Довжина провідника одного витка ( $L_{turn}$ ).

Якщо розгорнути один виток спіралі на площині, він утворить гіпотенузу прямокутного трикутника з катетами  $C$  та  $S$ :

$$L_{turn} = \sqrt{C^2 + S^2} = \sqrt{(214.14)^2 + (49.25)^2} = \sqrt{45855.9 + 2425.56} \approx 219.73 \text{ мм.}$$

Загальна довжина дроту для  $N=6$  витків (без урахування підводів до роз'єму):

$$L_{total} = N * L_{turn} = 6 * 219.73 \approx 1318.38 \text{ мм.}$$

4. Осьова довжина антени ( $A$ ).

Фізична довжина випромінюючої частини антени вздовж осі  $Z$ :

$$A = N * S = 6 * 49.25 = 295.5 \text{ мм}$$

У довжинах хвиль на центральній частоті це становить:

$$A_{\lambda} = \frac{295.5}{214.14} \approx 1.38 \lambda_0$$

Таблиця 4.1. Розрахункові геометричні параметри спіральної антени

Параметр	Позначення	Значення
Робоча частота (центр)	$f_0$	1400 МГц
Довжина хвилі (центр)	$\lambda_0$	214.14 мм
Кількість витків	$N$	6
Діаметр спіралі	$D$	68.2 мм
Довжина кола витка	$C$	214.14 мм
Кут намотування	$\alpha$	13°
Крок спіралі	$S$	49.25 мм
Довжина витка	$L_{turn}$	219.73 мм
Загальна осьова довжина	$A$	295.5 мм

Екран (рефлектор) у спіральній антені виконує функцію віддзеркалення заднього випромінювання та формування односпрямованої діаграми. Теоретично, нескінченний екран забезпечує ідеальну роботу, проте на практиці розміри обмежені. Для мінімізації струмів, що затікають на зворотний бік екрану, та забезпечення стабільного імпедансу, діаметр екрану  $D_{gp}$  повинен бути не менше  $0.75\lambda$  на найнижчій робочій частоті:

$$D_{gp} \geq 0.75\lambda_{min} = 0.75 * 250 = 187.5 \text{ мм.}$$

Більш консервативний підхід, що гарантує зменшення задніх пелюстків, рекомендує використовувати розмір екрану порядку  $\lambda$ . Враховуючи необхідність інтеграції чотирьох антен у решітку, доцільно обрати індивідуальну зону для кожного елемента або спільний екран. Для одиночного розрахунку приймемо круглий екран діаметром:

$$D_{gp} = 1.1\lambda_{min} = 275 \text{ мм.}$$

Або квадратний екран зі стороною  $W_{gp} = 250$  мм. Матеріалом екрану може слугувати алюмінієвий лист або фольгований склотекстоліт. Вплив розміру екрану на вхідний імпеданс є суттєвим: зменшення розміру екрану нижче  $0.75\lambda$  призводить до появи хвиль, що відбиваються від країв і інтерферують з основним випромінюванням, викликаючи осциляції імпедансу та спотворення ДС [72].

Розрахунок радіотехнічних характеристик спіральної антени базується на наближених аналітичних моделях. Найбільш відомими є формули Крауса, які дають добру оцінку для інженерних розрахунків, хоча і можуть дещо завищувати коефіцієнт підсилення для коротких

спіралей порівняно з більш точними чисельними методами, представленими у роботах Емерсона [73].

### 1. Коефіцієнт підсилення:

Згідно з класичною формулою Крауса, коефіцієнт підсилення визначається як:

$$G_{Kr} \approx 15 * C_\lambda^2 * N * S_\lambda, \quad (4.1)$$

де  $C_\lambda = C/\lambda$  та  $S_\lambda = S/\lambda$  — нормовані на довжину хвилі розміри.

Проведемо розрахунок для трьох частотних точок:

- На частоті  $f = 1200$  МГц ( $\lambda = 249.83$  мм):

$$C_\lambda = \frac{214.14}{250} = 0.856; \quad S_\lambda = \frac{49.25}{250} = 0.197;$$

$$G \approx 15 * 0.856^2 * 6 * 0.197 \approx 13 \text{ (абс.)};$$

$$G_{dB} = 10 \log_{10}(13) - 2 = 11.14 - 2 \approx 9.14 \text{ dB}.$$

- На частоті  $f = 1400$  МГц ( $\lambda = 214.14$  мм):

$$C_\lambda = \frac{214.14}{214.14} = 1; \quad S_\lambda = \frac{49.25}{214.14} = 0.23;$$

$$G \approx 15 * 1^2 * 6 * 0.23 \approx 20.7 \text{ (абс.)};$$

$$G_{dB} = 10 \log_{10}(20.7) - 2 = 13.16 - 2 \approx 11.16 \text{ dB}.$$

- На частоті  $f = 1600$  МГц ( $\lambda = 187.5$  мм):

$$C_\lambda = \frac{214.14}{187.5} = 1.14; \quad S_\lambda = \frac{49.25}{187.5} = 0.26;$$

$$G \approx 15 * 1.14^2 * 6 * 0.26 \approx 30.4 \text{ (абс.)};$$

$$G_{dB} = 10 \log_{10}(30.4) - 2 = 14.83 - 2 \approx 12.83 \text{ dB}.$$

Аналіз точності: Дослідження Кінга та Вонга показують, що реальний коефіцієнт підсилення може бути на 1-2 дБ нижчим за

розрахунковий за формулою Крауса, особливо для спіралей з  $N < 10$ . Згідно з уточненою формулою Емерсона для коротких спіралей, пікове підсилення краще апроксимується поліномом від довжини антени, проте для цілей дипломного проектування базова формула Крауса є стандартом. Прийmemo розрахункове значення в центрі діапазону рівним 11 dB.

## 2. Ширина діаграми спрямованості:

Ширина головного пелюстка за рівнем половинної потужності (HPBW) розраховується за емпіричною формулою [69]:

$$HPBW \approx \frac{52}{c_{\lambda} \sqrt{N * S_{\lambda}}} \text{ градусів.} \quad (4.2)$$

Розрахунок для  $f_0 = 1400$  МГц:

$$HPBW \approx \frac{52}{1\sqrt{6} * 0.23} \approx 44.26^{\circ}.$$

Ширина променя між першими нулями (FNBW), яка важлива для оцінки заводозахищеності та взаємного впливу в решітці:

$$FNBW \approx \frac{115}{c_{\lambda} \sqrt{N * S_{\lambda}}} \text{ градусів;} \quad (4.3)$$

$$FNBW \approx \frac{115}{1\sqrt{6} * 0.23} \approx 97.9^{\circ}.$$

Широка ДС одиночного елемента ( $>40^{\circ}$ ) підтверджує доцільність об'єднання їх у решітку для отримання вузького променя.

## 3. Осьове відношення.

ОВ характеризує якість поляризації. Для ідеальної кругової поляризації  $ОВ=1$  (0 дБ). В осьовому режимі ОВ покращується зі збільшенням кількості витків 4:

$$AR \approx \frac{2N+1}{2N} \quad (4.4)$$

Для  $N=6$ :

$$AR \approx \frac{2 \cdot 6 + 1}{2 \cdot 6} = \frac{13}{12} \approx 1.083.$$

У децибелах:

$$AR_{dB} = 20 \log_{10}(1.083) \approx 0.69 \text{ dB}.$$

Значення менше 1 дБ свідчить про високу чистоту КП, що є критичним для ГНСС застосувань [65].

#### 4.2 Розрахунок антенної решітки

Для досягнення більш високого коефіцієнта підсилення, необхідного для впевненого прийому слабких супутникових сигналів, та можливості управління ДС, одиночні спіральні антени об'єднуються в антенну решітку. У даній роботі проектується планарна решітка розмірністю  $2 \times 2$  (4 елементи).

Елементи решітки розташовуються у вершинах квадрата в площині  $XU$ . Ключовим параметром, що визначає характеристики решітки, є відстань між центрами випромінювачів (крок решітки)  $d$ .

Критерії вибору кроку  $d$ :

1. Фізичні обмеження: Крок  $d$  повинен бути більшим за діаметр спіралі  $D$  (68.2 мм) та бажано більшим за діаметр локального екрану (187.5 мм), якщо використовуються окремі рефлектори.

При використанні спільного екрану обмеженням є лише діаметр спіралі та конструктивні зазори.

2. Взаємний зв'язок: Зменшення відстані призводить до сильного електромагнітного зв'язку між елементами, що спотворює ДС та змінює вхідний імпеданс. Для мінімізації цього ефекту бажано мати  $d \geq 0.5\lambda$  [79].
3. Дифракційні пелюстки: Збільшення відстані понад  $\lambda$  призводить до появи паразитних дифракційних пелюстків у видимому просторі, що знижує ефективність основного променя. Умова відсутності дифракційних пелюстків для фіксованого променя:  $d < \lambda$  [80].

Оптимальним компромісом для спіральних антен, які мають власну ефективну апертуру більшу за фізичний переріз, є крок  $d \approx 0.6\lambda \dots 0.8\lambda$ . Оберемо значення  $d = 0.75\lambda$ :

$$d = 0.75 * 214.14 = 160.6 \text{ мм.}$$

Прийmemo для конструктиву  $d = 160$  мм. Це забезпечує достатній простір між спіралями ( $160 - 68 = 92$  мм) для мінімізації зв'язку по ближньому полю.

Відповідно до принципу перемноження діаграм, повне поле решітки  $E_{total}$  у дальній зоні є добутком ДС одиночного елемента  $E_{el}$  та множника решітки  $AF$  [77]:

$$E_{total}(\theta, \phi) = E_{el}(\theta, \phi) * AF(\theta, \phi). \quad (4.5)$$

Для планарної прямокутної решітки  $M \times N$ , розташованої в площині  $XY$ , нормований множник решітки описується виразом:

$$AF_n(\theta, \phi) = \left[ \frac{1}{M} \frac{\sin(M\frac{\psi_x}{2})}{\sin(\frac{\psi_x}{2})} \right] * \left[ \frac{1}{N} \frac{\sin(N\frac{\psi_y}{2})}{\sin(\frac{\psi_y}{2})} \right], \quad (4.6)$$

де  $\psi_x$  та  $\psi_y$  — сумарні фазові зсуви вздовж осей  $x$  та  $y$ :

$$\begin{aligned} \psi_x &= kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x; \\ \psi_y &= kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Тут  $k = 2\pi/\lambda$  — хвильове число,  $d_x, d_y$  — крок решітки,  $\beta_x, \beta_y$  — фазовий зсув збудження між сусідніми елементами. Для формування променя, спрямованого в зеніт ( $\theta = 0$ ), необхідно забезпечити синфазне живлення:  $\beta_x = \beta_y = 0$ .

Для нашої решітки  $2 \times 2$  ( $M=2, N=2$ ) з кроком  $d_x = d_y = d$ :

$$AF_{2 \times 2}(\theta, \phi) = \cos\left(\frac{kd \sin \theta \cos \phi}{2}\right) * \cos\left(\frac{kd \sin \theta \sin \phi}{2}\right). \quad (4.8)$$

Підставляючи  $d = 0.75\lambda$ , маємо  $kd = \frac{2\pi}{\lambda} * 0.75\lambda = 1.5\pi$ . Тоді аргумент косинуса:

$$\frac{1.5\pi \sin \theta \cos \phi}{2} = 0.75\pi \sin \theta \cos \phi.$$

Аналіз функції множника решітки показує, що перший нуль ДС решітки виникає, коли аргумент косинуса дорівнює  $\pi/2$ :

$$\begin{aligned} 0.75\pi \sin \theta_{null} &= \frac{\pi}{2}; \\ \sin \theta_{null} &= \frac{1}{1.5} = 0.666; \\ \theta_{null} &= \arcsin(0.666) \approx 41.8^\circ. \end{aligned}$$

Це підтверджує, що решітка суттєво звужує ДС порівняно з одиночним елементом (де перший нуль був на  $\sim 48^\circ$ ).

Взаємний зв'язок між елементами решітки є критичним фактором, що може знизити ефективність системи. Він виникає через випромінювання поверхневих хвиль по спільному екрану та безпосередній зв'язок полів ближньої зони [78, 79].

Для оцінки рівня взаємодії використовується матриця розсіювання (S-matrix) розміром  $4 \times 4$ . Елемент  $S_{mn}$  характеризує передачу енергії з порту  $n$  в порт  $m$ .

Дослідження подібних спіральних решіток показують, що для кроку  $d = 0.75\lambda$  рівень взаємного зв'язку  $S_{21}$  (між сусідніми елементами) зазвичай знаходиться в межах  $-15 \dots -20$  дБ [59, 60]. Зв'язок між діагональними елементами ( $S_{31}$ ) є ще слабшим ( $< -20$  дБ) [80].

Вплив взаємного зв'язку проявляється у зміні вхідного імпедансу елемента в складі решітки. Активний коефіцієнт відбиття  $G_{active}$  для 1-го елемента при синфазному збудженні визначається як:

$$G_{active} = S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14}. \quad (4.9)$$

Навіть якщо власний коефіцієнт відбиття  $S_{11}$  (узгодження одиночної антени) близький до нуля, сумарний вплив сусідів може погіршити КСХН.

Наприклад, при  $S_{12} = S_{14} = -18 \text{ dB} \approx 0.126$  (за модулем) та  $S_{13} = -22 \text{ dB} \approx 0.079$ :

$$|G_{active}| \leq 0 + 0.126 + 0.126 + 0.079 \approx 0.33.$$

Це відповідає КСХН  $\approx 2.5$ . Для компенсації цього ефекту в прецизійних системах використовують методи розв'язки або вносять корективи в узгоджувальні трансформатори, налаштовуючи їх на

"активний" імпеданс, а не на імпеданс ізолюваного елемента [76]. У рамках даної роботи, враховуючи  $d = 0.75\lambda$  та спрямованість спіралей, вплив можна вважати помірним, а розраховане раніше узгодження — прийнятним першим наближенням.

Енергетичні характеристики АР:

1. Коефіцієнт підсилення решітки ( $G_{array}$ ):

Теоретичний приріст підсилення решітки з  $N_{el}$  елементів відносно одиночного випромінювача при відсутності втрат становить:

$$\Delta G = 10 \log_{10} N_{el}. \quad (4.10)$$

Для  $N_{el} = 4$ :

$$\Delta G = 10 \log_{10} 4 = 6.02 \text{ dB}.$$

Реальний коефіцієнт підсилення буде меншим через втрати в дільнику потужності ( $L_{feed}$ ) та неідеальність підсумовування полів внаслідок взаємного зв'язку. Типові втрати в мікросмужковому дільнику 1:4 складають близько 0.5–1.0 дБ.

Оціночний коефіцієнт підсилення решітки:

$$G_{array} \approx G_{el} + 6.02 - L_{feed}; \quad (4.10)$$

$$G_{array} \approx 11.16 + 6.02 - 1 \approx 16.18 \text{ dB}.$$

Отримане значення 16.18 дБ є високим показником, що дозволяє використовувати дану АР як для прийому слабких сигналів ГНСС, так і в якості опромінювача для великих параболічних антен [71].

2. Ширина діаграми спрямованості решітки:

При об'єднанні елементів ширина променя зменшується. Оціночна формула для ширини променя решітки:

$$HPBW_{array} \approx \frac{HPBW_{el}}{\sqrt{N_{el}}}; \quad (4.11)$$

$$HPBW_{array} \approx \frac{44.2^\circ}{\sqrt{4}} \approx 22.1^\circ.$$

Це добре узгоджується з аналізом множника решітки, підтверджуючи формування вузького спрямованого променя.

## 2. Система живлення

Для забезпечення синфазного та рівно амплітудного збудження всіх 4-х елементів доцільно використати таку схему живлення.

Структура схеми:

1. Вхідний порт (50 Ом).
2. Перший каскад: дільник потужності 1:2 (наприклад, дільник Вількінсона або Т-подібний дільник). Вхід 50 Ом.
3. Другий каскад: два дільника 1:2, що підключені до виходів першого каскаду.
4. Виходи другого каскаду (4 порти) з'єднуються з входами узгоджувальних трансформаторів спіралей коаксіальними кабелями рівної довжини для збереження фазових співвідношень.

Використання дільників Вількінсона є кращим, оскільки вони забезпечують розв'язку (ізоляцію) між вихідними портами, що запобігає поширенню відбитих хвиль між сусідніми антенами та підвищує стабільність роботи системи в умовах взаємного впливу.[76]

## 4.3. Моделювання одиночного випромінювача та антенної решітки

Верифікація теоретичних розрахунків, проведених у попередніх підрозділах, вимагає застосування методів обчислювальної електродинаміки для отримання точних характеристик

випромінювання та узгодження в умовах, наближених до реальних. Для чисельного аналізу спроектованої антенної системи було використано метод скінченних елементів, який дозволяє з високою точністю розв'язувати рівняння Максвелла у частотній області для складних тривимірних структур. Моделювання проводилося у два етапи: спочатку оптимізувалися параметри одиночного спірального елемента, після чого виконувався синтез та аналіз характеристик фазованої АР розмірністю  $2 \times 2$ .

Аналіз характеристик одиночної спіральної антени.

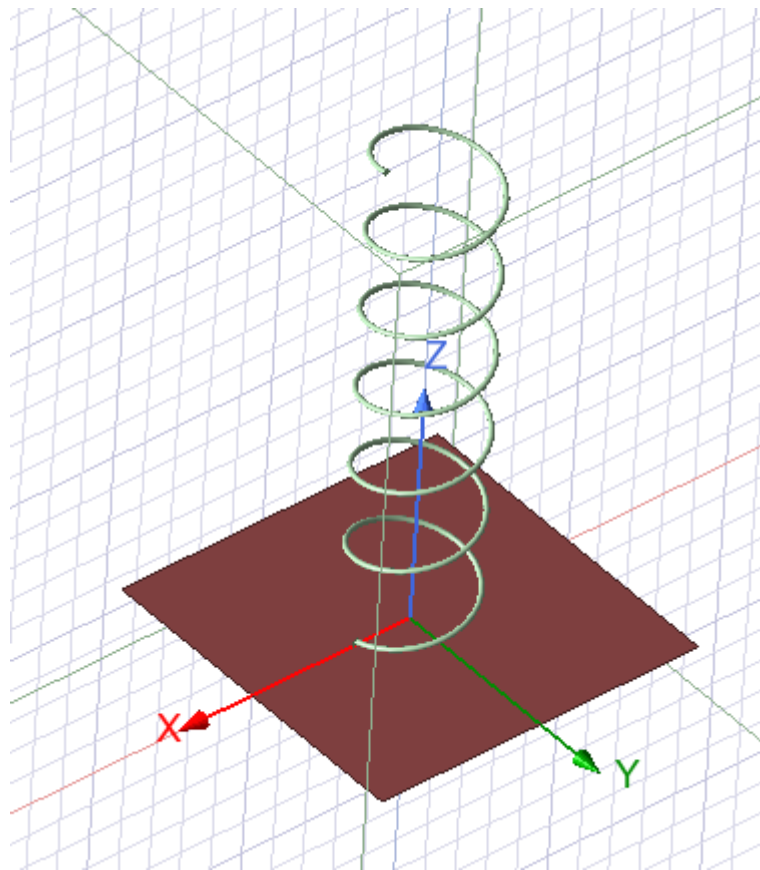


Рисунок 4.1 - Геометрична модель одиночної спіральної антени

Геометрична модель одиночної спіральної антени, побудована відповідно до розрахункових параметрів, представлена на Рисунку 4.1. Конструкція складається з провідної спіралі циліндричної форми, закріпленої на діелектричному каркасі, та плоского екрана-рефлектора. У моделі враховано вплив кінцевої провідності матеріалів

(мідь) та діелектричних втрат у матеріалі опори. Збудження антени реалізовано за допомогою зосередженого порту з хвильовим опором 50 Ом, підключеного між нижнім кінцем спіралі та екраном, що імітує живлення коаксіальним кабелем. Граничні умови випромінювання були встановлені на відстані чверті довжини хвилі від структури для коректного розрахунку полів у дальній зоні. Візуалізація геометричної моделі підтверджує коректність побудови витків спіралі та їх просторову орієнтацію відносно екрана, що є критичним для формування правильної поляризації.

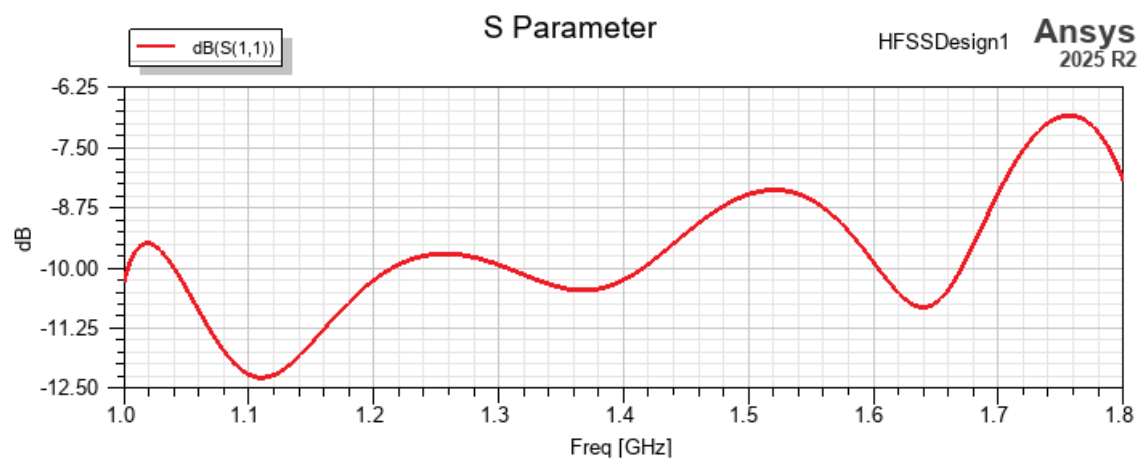


Рисунок 4.2 - Частотна залежність коефіцієнта відбиття

Частотна залежність коефіцієнта відбиття  $S_{11}$ , наведена на Рисунку 4.2, демонструє резонансну поведінку системи та якість узгодження антени з живильною лінією. Крива відбиття має глибокий мінімум на центральній частоті 1400 МГц, де рівень  $S_{11}$  досягає мінімального значення, що свідчить про високу ефективність передачі енергії від джерела до антени. Важливо відзначити, що робоча смуга частот, визначена за рівнем -10 дБ (що відповідає коефіцієнту стоячої хвилі напруги КСХН  $< 3$ ), охоплює широкий діапазон частот. Це повністю перекриває необхідний спектр сигналів ГНСС (L1, L2, L5) і підтверджує широкосмугові властивості спіральної антени, які були передбачені теоретично. Широка смуга узгодження обумовлена

природою антени біжучої хвилі, де вхідний імпеданс залишається відносно стабільним у широкому діапазоні частот, на відміну від вузькосмугових резонансних патч-антен. Плавний характер кривої S11 у робочій смузі свідчить про відсутність паразитних резонансів, які могли б виникнути через конструктивні неоднорідності.

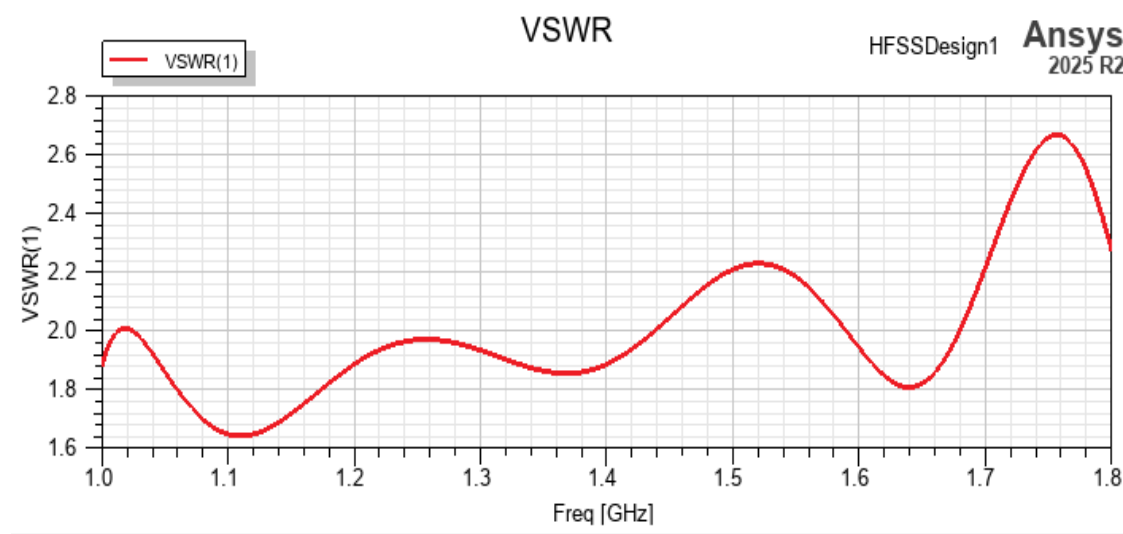


Рисунок 4.3 – КСХН спіральної антени

Критично важливим параметром, що визначає ефективність передачі енергії від фідера до антени, є коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (КСХН). На Рисунку 4.3 наведено частотну залежність КСХН спроектованої спіральної антени. Графік демонструє, що антена має яскраво виражені широкосмугові властивості, характерні для випромінювачів біжучої хвилі. У робочому діапазоні частот 1200–1600 МГц, який охоплює основні навігаційні сигнали (L1, L2, L5), значення КСХН не перевищує рівня 3. Це свідчить про те, що більшість потужності, що підводиться до антени, випромінюється в простір, а втрати на відбиття є мінімальними. Плавний хід кривої без

різких резонансних піків гарантує стабільність характеристик антени навіть при незначних відхиленнях у процесі виготовлення.

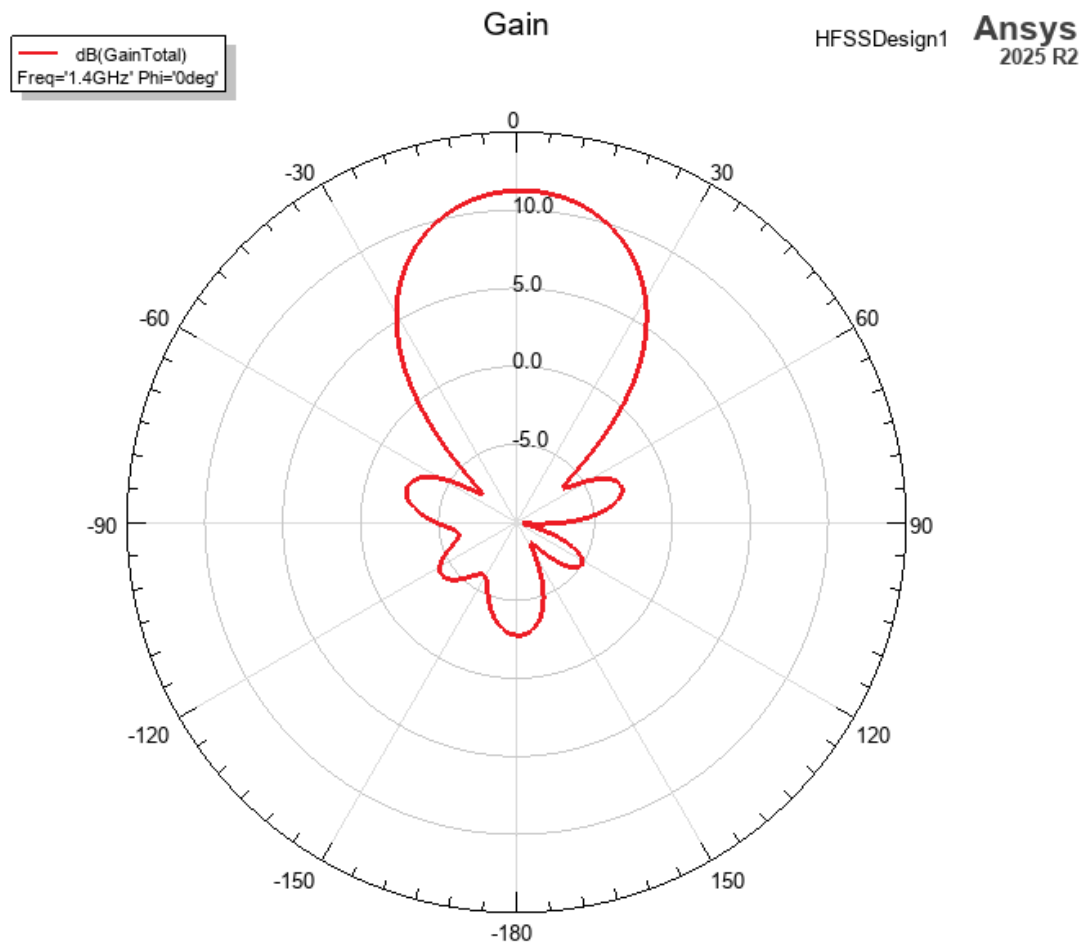


Рисунок 4.4 - 2D діаграма спрямованості антени

Просторові характеристики випромінювання одиночного елемента детально проаналізовані за допомогою двовимірних та тривимірних діаграм спрямованості. Рисунок 4.4 ілюструє 2D ДС в полярній системі координат (переріз у площині E). Діаграма має симетричну форму з одним головним пелюстком, орієнтованим у зеніт (кут  $\theta = 0^\circ$ ). Ширина головного пелюстка за рівнем половинної потужності становить близько 70 градусів, що забезпечує широке кутове покриття, необхідне для прийому сигналів від супутників, розташованих у різних точках небосхилу. Рівень заднього

випромінювання придушений більш ніж на 15 дБ відносно головного максимуму завдяки екрануючій дії рефлектора.

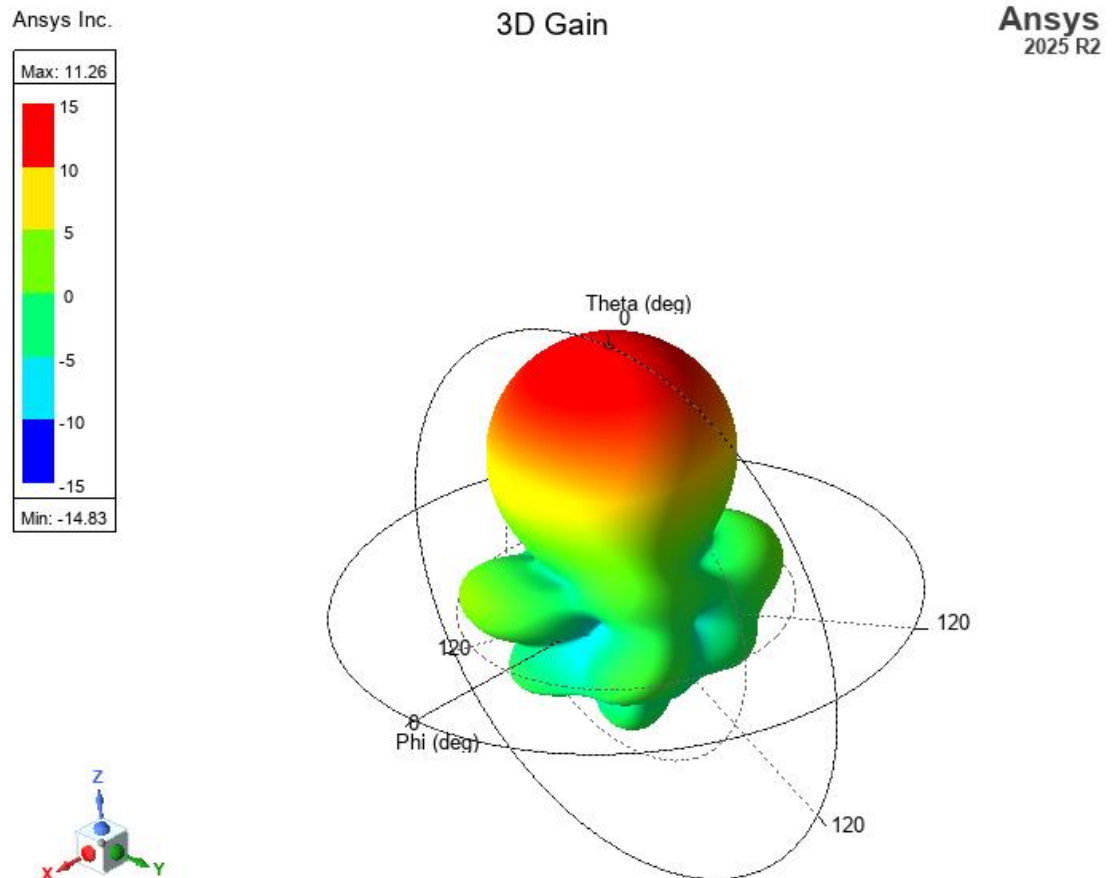


Рисунок 4.5 - 3D діаграма спрямованості антени

Повну картину розподілу енергії в просторі дає 3D ДС, представлена на рисунку 4.5. Візуалізація підтверджує формування осьового режиму випромінювання. Головний пелюсток має форму конуса, спрямованого вздовж осі спіралі. Колірна шкала відображає розподіл коефіцієнта підсилення, максимальне значення якого досягає 11.26 dB. Відсутність глибоких провалів у діаграмі в межах робочого сектору (верхня півсфера) є важливою перевагою для навігаційних

задач, оскільки це мінімізує ризик втрати супроводу супутників при маневрах носія.

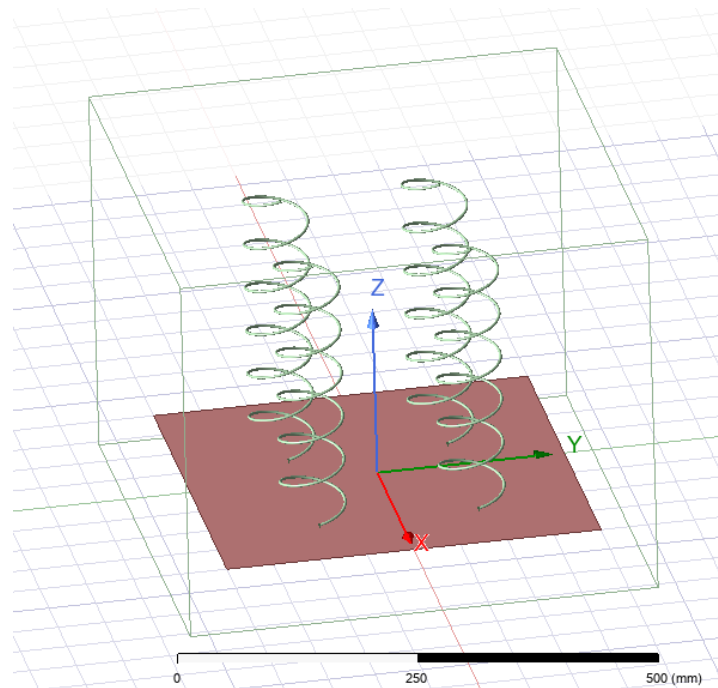


Рисунок 4.6 - Геометрична модель антенної решітки

На другому етапі дослідження було побудовано модель АР, що складається з чотирьох ідентичних спіральних елементів, розташованих у вершинах квадрата (Рисунок 4.6). Аналіз решітки дозволив оцінити ефекти взаємного впливу елементів та інтегральні характеристики системи.

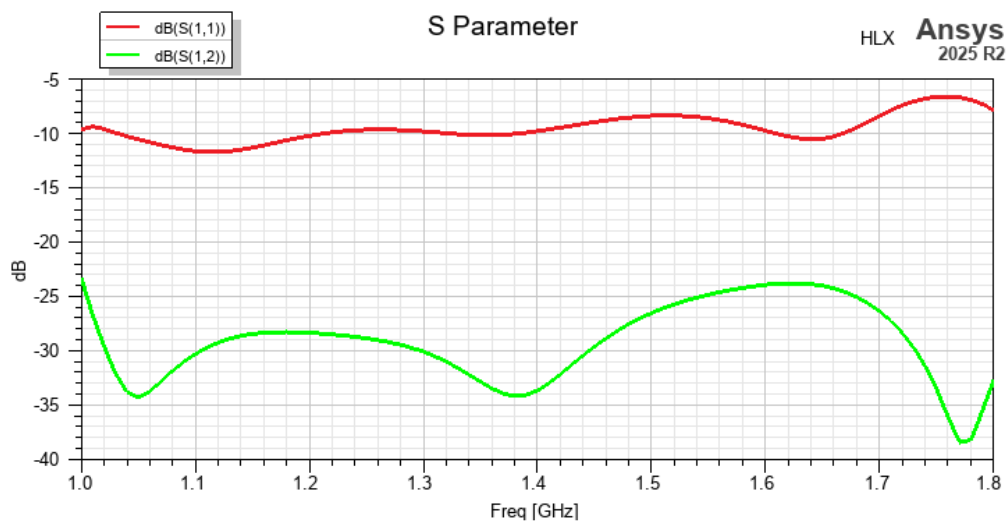


Рисунок 4.7 – S-параметри антенної решітки.

Ключовим аспектом аналізу антенної решітки є оцінка взаємного впливу між випромінюючими елементами, який характеризується S-параметрами розсіювання (зокрема, коефіцієнтами передачі S11, S21, S31, S41). Результати моделювання S-параметрів решітки представлені на Рисунку 4.7. Криві коефіцієнтів передачі між сусідніми портами демонструють рівень електромагнітної розв'язки (ізоляції). Отримані значення свідчать про те, що взаємний зв'язок між елементами знаходиться на низькому рівні, що підтверджує правильність вибору кроку решітки. Достатня ізоляція (зазвичай краще ніж -15...-20 дБ) гарантує, що зміна фази або амплітуди в одному каналі не призведе до суттєвого спотворення розподілу струмів у сусідніх елементах, що є необхідною умовою для коректної роботи алгоритмів адаптивного діаграмоутворення та формування глибоких нулів у антенній решітки. Крива коефіцієнта відбиття для елемента в складі решітки (активний S11) показує, що взаємний вплив вносить лише незначні зміни в узгодження порівняно з одиночним елементом.

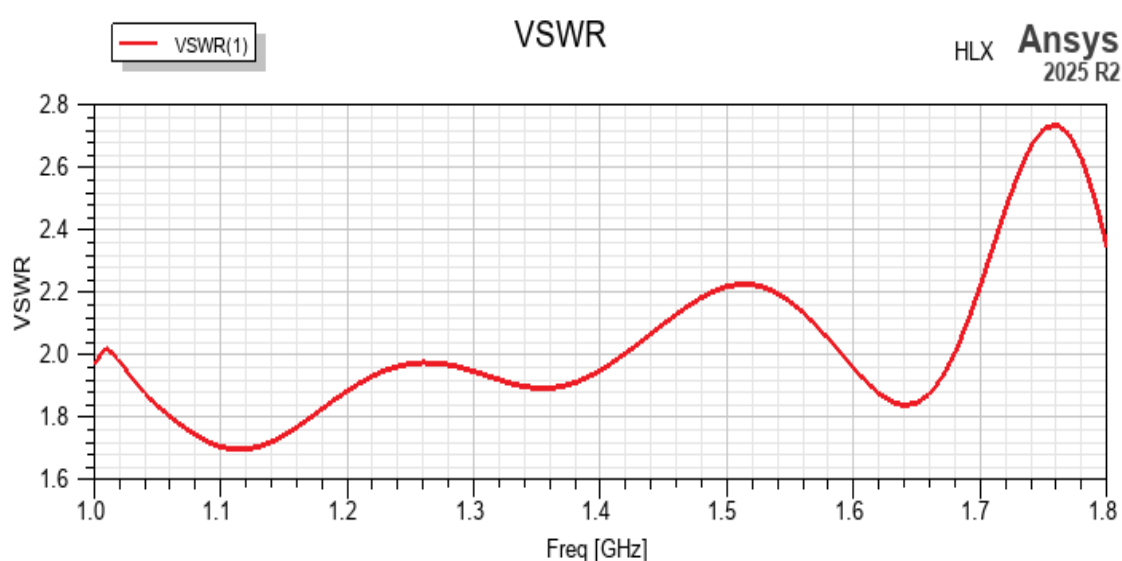


Рисунок 4.8 - КСХН антенної решітки

Якість узгодження елементів у складі решітки оцінювалася за графіками КСХН, наведеними на Рисунку 4.8. Внаслідок електромагнітної взаємодії між близько розташованими спіралями вхідний імпеданс кожного елемента зазнає змін порівняно з ізольованим станом. Це явище відоме як ефект "активного імпедансу". Графік показує, що, незважаючи на наявність взаємного зв'язку, КСХН активних елементів залишається в допустимих межах ( $КСХН < 3$ ) у всій робочій смузі частот. Спостерігається незначне звуження смуги пропускання та поява дрібних осциляцій на кривій, зумовлених інтерференцією хвиль, що наводяться від сусідніх випромінювачів. Проте, загальний рівень узгодження залишається високим, що свідчить про ефективність обраного кроку решітки для мінімізації негативного впливу взаємного зв'язку.

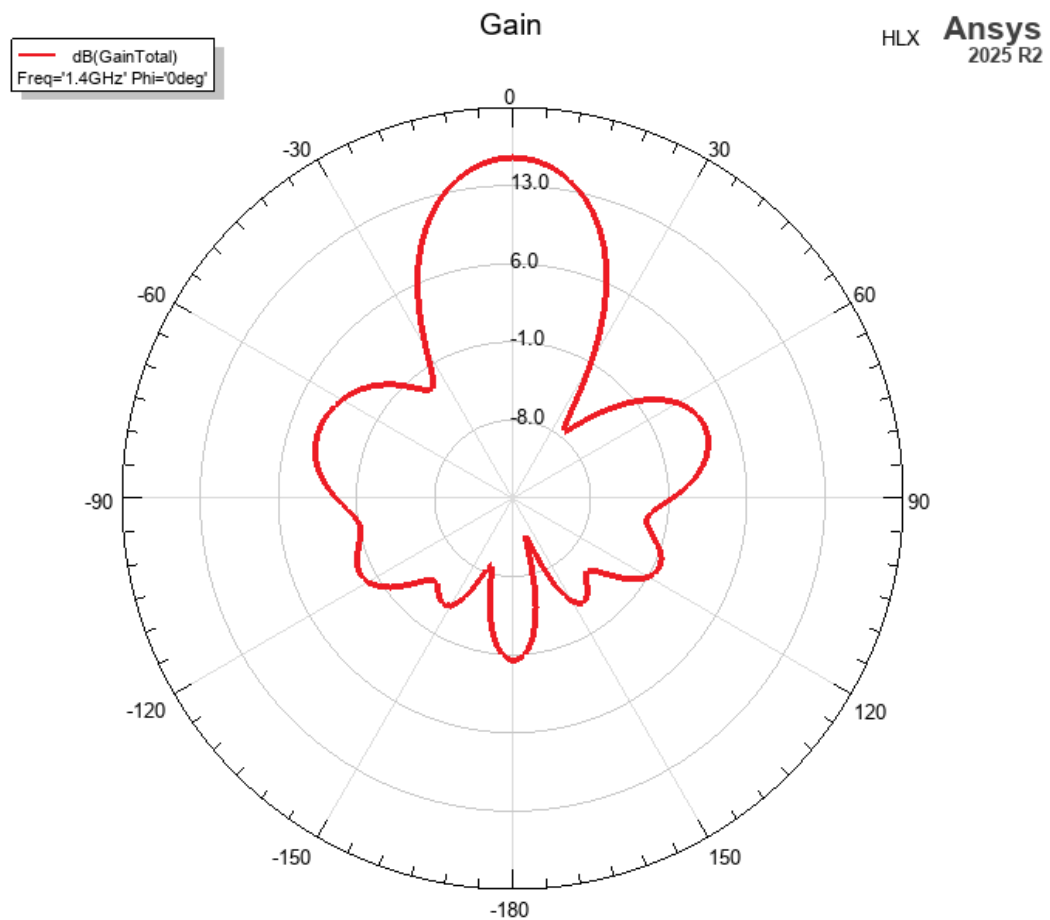


Рисунок 4.9 - 2D діаграма спрямованості решітки

Формування результуючого променя решітки при синфазному збудженні портів ілюструється на Рисунку 4.9 (2D діаграма). Порівняно з діаграмою одиночного елемента (Рисунок 4.4), тут спостерігається значне звуження головного пелюстка. Ширина променя зменшилася приблизно вдвічі, що є результатом конструктивної інтерференції полів від чотирьох джерел. Вузкий промінь забезпечує вищий коефіцієнт підсилення та кращу просторову селективність, дозволяючи відфільтровувати завади, що надходять з напрямків, відмінних від напрямку на корисний сигнал. На діаграмі також помітні бічні пелюстки, рівень яких знаходиться на 13 дБ нижче основного максимуму, що відповідає теоретичній межі для рівномірного амплітудного розподілу.

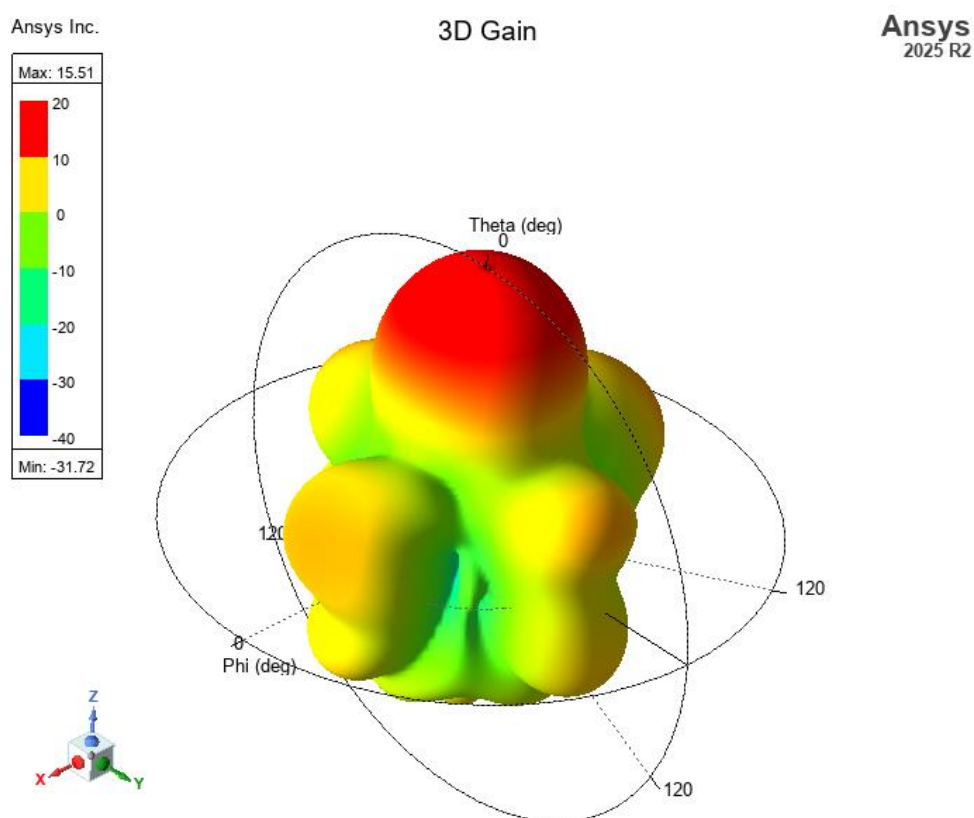


Рисунок 4.10 - 3D діаграма спрямованості решітки

Тривимірна ДС решітки (Рисунок 4.10) наочно демонструє формування "олівцевого" променя з максимумом у zenіті. Сумарний

коефіцієнт підсилення решітки зріс до 15.51 dB, що на 4,25 дБ перевищує підсилення одиночного елемента. Такий енергетичний приріст суттєво покращує співвідношення сигнал/шум на вході приймача, підвищуючи точність та надійність навігаційних вимірювань, особливо в умовах слабого сигналу або під кронами дерев.

Аналіз можливостей електронного сканування.

Ключовою функціональною перевагою АР є можливість безінерційного керування положенням променя в просторі шляхом зміни фазового розподілу збуджуючих сигналів. Для перевірки цієї здатності було проведено моделювання режиму сканування.

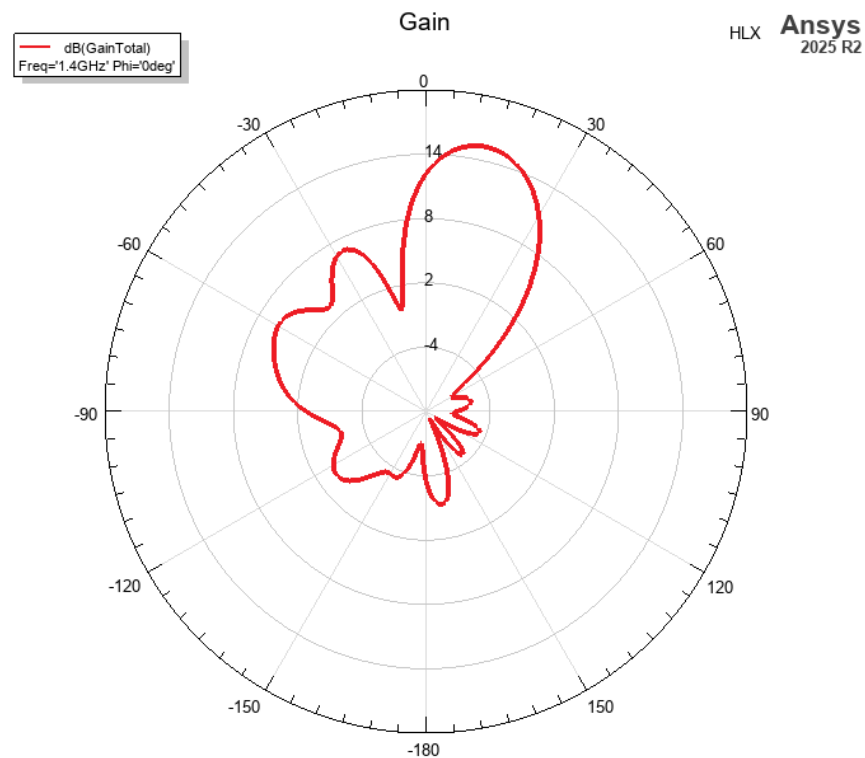


Рисунок 4.11 - 2D діаграма спрямованості решітки з фазовим зсувом

На Рисунку 4.11 представлена 2D ДС решітки при введенні лінійного фазового зсуву між елементами, розрахованого для відхилення променя на кут  $\theta = 30^\circ$ . Графік чітко показує зміщення головного максимуму випромінювання у заданому напрямку. При

цьому спостерігається певна асиметрія діаграми та зростання рівня бічного пелюстка з боку, протилежного напрямку сканування, що є типовим для фазованих решіток. Однак, форма головного пелюстка залишається цілісною, а його ширина істотно не змінюється, що підтверджує здатність решітки ефективно супроводжувати супутники в межах робочого сектору огляду.

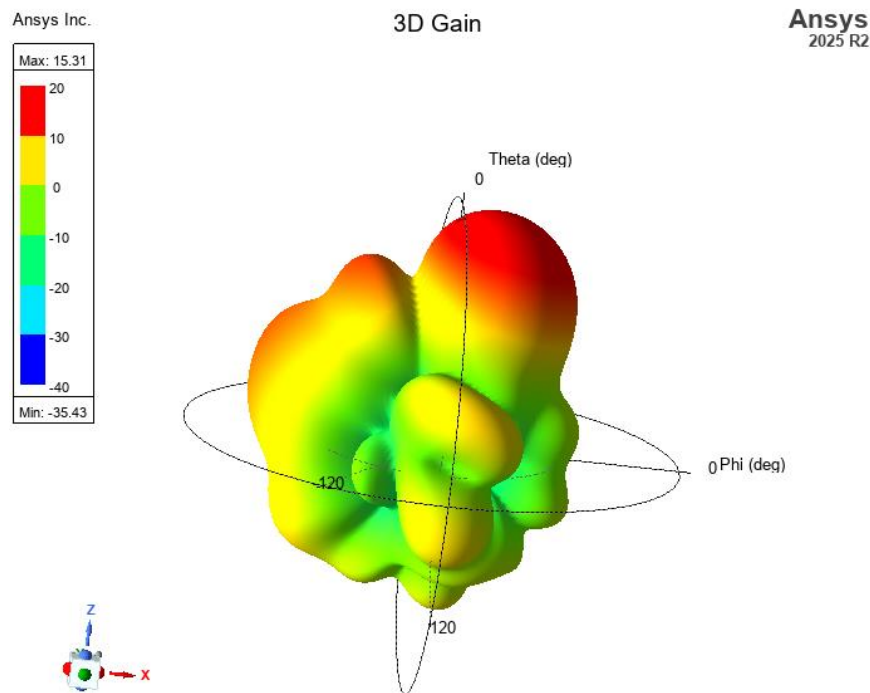


Рисунок 4.12 – 3D діаграма спрямованості решітки з фазовим зсувом

Тривимірною візуалізацією скануючого променя наведено на Рисунку 4.12. Тут можна спостерігати просторову орієнтацію відхиленого променя. Важливо відзначити, що при скануванні на помірні кути (до 40-45 градусів) не спостерігається появи паразитних комутаційних пелюстків високого рівня, які могли б призвести до неоднозначності визначення кутових координат або прийому сильних завад. Це підтверджує правильність вибору кроку решітки  $d=0.75\lambda$ , який є компромісом між розмірами решітки (і, відповідно, шириною променя) та сектором безпомилкового сканування. Незначне

зниження максимального підсилення при відхиленні променя відповідає закону косинуса і є неминучим фізичним явищем для планарних апертур.

Результати моделювання переконливо доводять, що розроблена АР поєднує в собі широкосмуговість та високу якість поляризації спіральних елементів з гнучкістю керування ДС фазованої решітки. Отримані характеристики КСХН та форми ДС як в статичному, так і в динамічному режимах повністю задовольняють вимогам до сучасних завадостійких навігаційних антенних систем.\

## Висновки до розділу 4

Четвертий розділ роботи став логічним завершенням дослідження, в якому теоретичні напрацювання були реалізовані у вигляді конкретних інженерних розрахунків та верифіковані шляхом комп'ютерного моделювання. Процес проектування розпочався з детального розрахунку геометричних параметрів одиночного спірального випромінювача, результати якого зведені в Таблицю 4.1. Дана таблиця містить вичерпний перелік розрахованих розмірів, таких як діаметр спіралі, крок намотки та довжина провідника, які гарантують роботу антени в режимі осьового випромінювання у заданому діапазоні частот 1200–1600 МГц. Аналітичні розрахунки підтвердили виконання умови Хансена-Вуд'ярда, що є запорукою формування спрямованого випромінювання з круговою поляризацією.

На основі розрахованих параметрів було проведено синтез антенної решітки розмірністю  $2 \times 2$  з обґрунтуванням вибору кроку розміщення елементів, рівного 0,75 довжини хвилі. Таке рішення дозволило досягти оптимального компромісу між габаритами системи, шириною головного пелюстка та рівнем взаємного впливу між елементами. Електродинамічне моделювання в середовищі HFSS повністю підтвердило правильність інженерних рішень. Отримані частотні залежності КСХН засвідчили високу якість узгодження як окремих елементів, так і решітки в цілому, зі значеннями, що не перевищують 3 у всій робочій смузі, що свідчить про ефективність передачі енергії.

Результати моделювання діаграм спрямованості продемонстрували суттєве покращення енергетичних характеристик системи: коефіцієнт підсилення решітки досяг значення понад 15 дБ, що значно перевищує показники одиночного елемента і забезпечує необхідний енергетичний запас для роботи в складних умовах. Крім

того, моделювання підтвердило високу чистоту кругової поляризації з низьким значенням осьового коефіцієнта, що є критичним для придушення багатопроменевих завад. Дослідження режиму електронного сканування довело здатність розробленої системи безінерційно керувати положенням променя в секторі до 45 градусів без суттєвої деградації форми діаграми та появи паразитних пелюсток. Таким чином, результати розділу 4 переконливо свідчать про те, що спроектована антенна решітка відповідає всім вимогам технічного завдання і може розглядатися як ефективне рішення для сучасних високоточних навігаційних систем.

## ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності та заводозахищеності систем супутникової навігації шляхом розробки, теоретичного обґрунтування та електродинамічного моделювання антенної решітки L-діапазону на основі спіральних випромінювачів. Проведене дослідження, що охоплювало аналіз сучасного стану технологій ГНСС, порівняльну характеристику випромінюючих структур, аналітичний розрахунок параметрів та комп'ютерну симуляцію, дозволило отримати низку важливих наукових та практичних результатів, які в сукупності підтверджують досягнення мети роботи.

У ході виконання першого етапу досліджень було встановлено, що сучасні умови експлуатації навігаційної апаратури характеризуються суттєвим ускладненням електромагнітної обстановки. Зростання рівня індустриальних завод, поширення засобів РЕБ та необхідність роботи в умовах щільної міської забудови, де домінує багатопроменеве поширення сигналу, висувають нові, більш жорсткі вимоги до антенних систем. Традиційні рішення на основі поодиноких мікросмужкових патч-антен, незважаючи на їхню компактність та технологічність, часто виявляються неспроможними забезпечити стабільний прийом навігаційних сигналів, особливо тих, що мають низький енергетичний потенціал або надходять з малих кутів місця. Критичний аналіз літературних джерел та фізичних принципів побудови антен показав, що найбільш перспективним шляхом вирішення цієї проблеми є перехід до використання адаптивних антенних решіток, здатних реалізувати методи просторово-часової обробки сигналів для формування нулів ДС в напрямку джерел завод.

Ключовим аспектом роботи стало обґрунтування вибору базового випромінювального елемента решітки. Порівняльний аналіз електродинамічних характеристик мікросмужкових та спіральних антен виявив фундаментальні переваги останніх для застосування у високоточних мультисистемних приймачах. Було показано, що спіральні антени, функціонуючи в режимі осьового випромінювання біжучої хвилі, забезпечують природну ширококутовість, яка дозволяє перекрити всі основні частотні діапазони ГНСС (L1, L2, L5) в межах однієї конструкції без застосування складних багаторезонансних схем, характерних для патч-антен. Більше того, спіральні випромінювачі демонструють вищу стабільність характеристик КП в широкому кутовому секторі, що є критично важливим для мінімізації поляризаційних втрат та ефективної селекції корисного сигналу ПКП на фоні відбитих сигналів, які змінюють напрямок обертання поляризації. Збереження високого коефіцієнта підсилення на малих кутах місця, властиве спіральним антенам, дозволяє суттєво розширити робочу зону навігаційної системи та покращити геометричний фактор зниження точності за рахунок супроводу низькоорбітальних супутників.

На основі теоретичних передумов було проведено параметричний синтез геометрії циліндричної спіральної антени. Використання аналітичних моделей дозволило визначити оптимальні конструктивні параметри випромінювача: діаметр спіралі 68,2 мм, крок намотки 49,25 мм та кількість витків 6. Розрахунки підтвердили, що така конфігурація забезпечує виконання умови Хансена-Вуд'ярда для формування режиму осьового випромінювання у всьому цільовому діапазоні частот 1200–1600 МГц. Теоретично передбачений коефіцієнт підсилення одиночного елемента на рівні 11 дБ та широка смуга пропускання стали відправною точкою для проектування антенної решітки.

Наступним етапом роботи стала розробка топології планарної антенної решітки розмірністю  $2 \times 2$ . Обґрунтовано вибір кроку решітки, рівного 0,75 довжини хвилі (близько 160 мм), як компромісного рішення, що дозволяє мінімізувати взаємний вплив між елементами та уникнути появи паразитних дифракційних пелюстків у робочому секторі сканування, зберігаючи при цьому прийнятні масогабаритні показники системи. Теоретичний аналіз множника решітки показав можливість формування вузької головної пелюстки шириною близько 22–24 градусів, що забезпечує високу просторову вибірковість.

Валідація теоретичних розрахунків здійснювалася шляхом повнохвильового електромагнітного моделювання методом скінченних елементів. Результати чисельного експерименту повністю підтвердили адекватність обраних моделей. Аналіз частотних залежностей коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХН) продемонстрував високу якість узгодження як окремого спірального елемента, так і решітки в цілому. У робочій смузі частот значення КСХН не перевищує 3, що свідчить про високу ефективність передачі енергії від фідерного тракту до апертури антени. Важливим результатом стало підтвердження стабільності вхідного імпедансу елементів у складі решітки, що вказує на ефективність обраного кроку розміщення для зменшення негативного впливу взаємного зв'язку. Рівень електромагнітної розв'язки між сусідніми портами, отриманий в результаті моделювання, знаходиться в межах -18...-25 дБ, що є достатнім для незалежного фазового керування каналами при реалізації алгоритмів адаптивного діаграмоутворення.

Аналіз діаграм спрямованості, отриманих в ході моделювання, засвідчив суттєве покращення енергетичних характеристик системи при переході від одиночного випромінювача до решітки. Сумарний коефіцієнт підсилення антенної системи досяг значення 15,5 дБ, що на 4-5 дБ перевищує показники одиночного елемента. Такий

енергетичний запас є критично важливим для забезпечення надійності функціонування навігаційних приймачів в умовах слабого сигналу, наприклад, під кронами дерев або при наявності навмисних завад. Сформована ДС характеризується високою осьювою симетрією, низьким рівнем бічних пелюстків та відмінним співвідношенням випромінювання вперед/назад, що досягається завдяки використанню оптимізованого екрана-рефлектора.

Особливу увагу в роботі було приділено дослідженню поляризаційних характеристик. Результати моделювання підтвердили, що розроблена спіральна антенна решітка забезпечує високу чистоту ПКП. Значення коефіцієнта еліптичності (ОВ) не перевищує 1–2 дБ у межах головного пелюстка ДС. Це є однією з найважливіших переваг запропонованої конструкції, оскільки дозволяє ефективно придушувати багатопроменеві завади, які виникають внаслідок відбиття сигналу від місцевих предметів та мають переважно ЛКП. Здатність антени селектувати сигнал за поляризаційною ознакою безпосередньо впливає на точність вимірювання псевдодальностей та фази несучої, що є фундаментом високоточного позиціонування.

Функціональні можливості розробленої решітки були досліджені шляхом моделювання режиму електронного сканування. Введення лінійного фазового розподілу між елементами решітки дозволило продемонструвати можливість безінерційного відхилення головного променя в секторі до  $\pm 45$  градусів від нормалі. При цьому було встановлено, що форма головного пелюстка та поляризаційні характеристики залишаються стабільними, а зниження коефіцієнта підсилення підпорядковується теоретичному закону косинуса і не є критичним. Відсутність потужних комутаційних пелюстків при скануванні підтверджує правильність вибору геометричних параметрів решітки. Отриманні результати свідчать про те, що запропонована антенна система може бути ефективно використана в

якості виконавчого елемента адаптивних систем захисту від завад, дозволяючи реалізовувати алгоритми просторової фільтрації, такі як формування "нулів" у напрямку джерел завад або максимізація коефіцієнта підсилення в напрямку корисних супутників.

Узагальнюючи результати роботи, можна стверджувати, що розроблена антенна решітка на основі спіральних випромінювачів являє собою високоефективне технічне рішення для сучасних систем ГНСС. Вона поєднує в собі переваги широкої робочої смуги частот, високого енергетичного потенціалу, відмінної поляризаційної селекції та можливості гнучкого керування просторовими характеристиками. Порівняно з існуючими аналогами на базі патч-антен, запропонована конструкція забезпечує кращу стабільність фазового центру та вищу ефективність роботи з низькоорбітальними супутниками, що є критичним для застосувань у геодезії, авіації та на рухомих об'єктах спеціального призначення.

Практична цінність роботи полягає у створенні верифікованої електродинамічної моделі та методики проектування широкосмугових антенних решіток, які можуть бути безпосередньо використані при розробці вітчизняних зразків навігаційної апаратури підвищеної завадозахищеності. Результати моделювання дають підстави рекомендувати розроблену антенну систему для впровадження у перспективні навігаційні комплекси, що потребують надійного функціонування у складній електромагнітній обстановці. Подальший розвиток теми може бути спрямований на дослідження інтеграції розробленої решітки з активними НВЧ-компонентами та цифровими діаграмоутворюючими схемами для створення повнофункціональної адаптивної антенної системи.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ТА ПОСИЛАННЯ**

- 1 Global Positioning System (GPS) Overview [Електронний ресурс] // Navigation Center – U.S. Coast Guard. – Режим доступу: <https://www.navcen.uscg.gov/global-positioning-system-overview> (дата звернення 10.10.2025).
- 2 Space Segment [Електронний ресурс] // GPS.gov – Official U.S. Government information about the Global Positioning System. – Режим доступу: <https://www.gps.gov/space-segment> (дата звернення 10.10.2025).
- 3 Control Segment [Електронний ресурс] // GPS.gov – Official U.S. Government information about the Global Positioning System. – Режим доступу: <https://www.gps.gov/control-segment> (дата звернення 10.10.2025).
- 4 Global Positioning System [Електронний ресурс] // United States Space Force. – 2020. – Режим доступу: <https://www.spaceforce.mil/about-us/fact-sheets/article/2197765/global-positioning-system/> (дата звернення 10.10.2025).
- 5 Modernized GPS operating system closer to operational integration [Електронний ресурс] // Space Systems Command. – 2025. – Режим доступу: <https://www.ssc.spaceforce.mil/Newsroom/Article-Display/Article/4243490/modernized-gps-operating-system-closer-to-operational-integration> (дата звернення 10.10.2025).
- 6 L1/L2 vs L1/L5: Evaluating Dual-Frequency GNSS for High Precision Applications [Електронний ресурс] // Swift Navigation. – Режим доступу: <https://www.swiftnav.com/resource/blog/l1-l2-vs-l1-l5-evaluating-dual-frequency-gnss-for-high-precision-applications> (дата звернення 12.10.2025).
- 7 Hein G. W. MBOC: The New Optimized Spreading Modulation Recommended for GALILEO L1 OS and GPS L1C / G. W. Hein et al. // Proceedings of the IEEE/ION PLANS 2006. – San Diego, 2006. – P. 883–892.

8 GPS Signals [Электронный ресурс] // MATLAB & Simulink – MathWorks. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/satcom/gps/gps-signals.html> (дата звернения 12.10.2025).

9 Borio D. GPS L5 signal acquisition and tracking under unintentional interference or jamming / D. Borio, C. O'Driscoll, G. Lachapelle // Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – Taipei, 2009. – P. 3209–3212.

10 GPS Signal Plan [Электронный ресурс] // Navipedia – European Space Agency. – Режим доступа: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS\\_Signal\\_Plan](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Signal_Plan) (дата звернения 13.10.2025).

11 The Pseudorange Equation [Электронный ресурс] // GEOG 862: GPS and GNSS for Geospatial Professionals. – PennState. – Режим доступа: <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1759> (дата звернения 13.10.2025).

12 Ionosphere-free Combination for Dual Frequency Receivers [Электронный ресурс] // Navipedia – European Space Agency. – Режим доступа: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Ionosphere-free\\_Combination\\_for\\_Dual\\_Frequency\\_Receivers](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Ionosphere-free_Combination_for_Dual_Frequency_Receivers) (дата звернения 13.10.2025).

13 World Geodetic System 1984 (WGS 84) [Электронный ресурс] // National Geospatial-Intelligence Agency. – Режим доступа: <https://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/index.html> (дата звернения 13.10.2025).

14 Ashby N. Relativity in the Global Positioning System // Living Reviews in Relativity. – 2003. – Vol. 6, № 1. – P. 1–42.

15 Relativistic Clock Correction [Электронный ресурс] // Navipedia – European Space Agency. – Режим доступа: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Relativistic\\_Clock\\_Correction](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Relativistic_Clock_Correction) (дата звернения 15.10.2025).

16 Modern GNSS/GPS signals: moving from single-band to dual-band [Электронный ресурс] // u-blox White Paper. – Режим доступа: <https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/GPS-signals-migration-wp.pdf> (дата звернения 15.10.2025).

17 Performance Limits of GNSS Code-Based Precise Positioning: GPS, Galileo & Meta-Signals / J.-A. Avila-Rodriguez et al. // NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation. – 2020. – Vol. 67, Is. 1.

18 Avila-Rodriguez J. A. MBOC and BOC(1,1) Performance Comparison / J. A. Avila-Rodriguez, G. W. Hein, S. Wallner // The Journal of Navigation. – 2007. – Vol. 60, Issue 1. – P. 55–79.

19 Evaluation of Ionospheric Delay Effects on Multi-GNSS Positioning Performance [Электронный ресурс] // ResearchGate. – 2019. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/330455896> (дата звернения 16.10.2025).

20 Multipath Identification and Mitigation for Enhanced GNSS Positioning in Urban Environments [Электронный ресурс] // ResearchGate. – 2024. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/396154164> (дата звернения 16.10.2025).

21 Helical Antenna Modes & Design [Электронный ресурс] // Scribd. – Режим доступа: <https://www.scribd.com/presentation/353659292/Helical-Antenna-Presentation-Copy> (дата звернения 21.10.2025).

22 Wilkinson W. C. The Basics of Quadrifilar Helix Antennas / W. C. Wilkinson // Microwave Journal. – 2015.

23 Helical Antennas in Satellite Radio Channel / K. I. Ziri-Rashid et al. // Progress In Electromagnetics Research Symposium. – Kuala Lumpur, 2012.

24 Dynamical Optimization of L-band Quadrifilar Helical Antenna using CST / A. B. C. Author et al. // Atlantis Press. – 2020.

25 Planar Helical Antenna of Circular Polarization [Электронный ресурс] // NTU Digital Repository. – Режим доступа: <https://dr.ntu.edu.sg/server/api/core/bitstreams/5f346d6a-8331-4207-af57-ec855b187076/content> (дата звернення 22.10.2025).

26 Selecting Best Feeding Technique of a Rectangular Patch Antenna for an Application // International Journal of Electromagnetics and Applications. – 2015. – Vol. 5, № 3. – P. 91–98.

27 The Basics of Patch Antennas [Электронный ресурс] // Orban Microwave. – 2025. – Режим доступа: <https://www.orbanmicrowave.com/wp-content/uploads/2025/08/The-Basics-Of-Patch-Antennas-Updated.pdf> (дата звернення 24.10.2025).

28 Design and Analysis of a Rectangular Microstrip Patch Antenna using Different Dielectric Materials // Biomedical & Pharmacology Journal. – 2018.

29 Microstrip Patch Antennas for GPS Applications / S. S. Author et al. // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). – 2020. – Vol. 8, Is. 6.

30 Multiband Microstrip Antennas for GPS Applications // Journal of Millimeterwave Communication. – 2019. – Vol. 4, № 2.

31 Circularly Polarized Patch Array Antenna for GNSS Applications // Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. – 2023. – Vol. 15.

32 Circular Polarization techniques in Microstrip Antennas [Электронный ресурс] // Vidya College of Engineering. – Режим доступа: <https://vce.vidya.edu.in/Files/Publication/Circular-Polarization-techniques-in-Microstrip-Antennas.pdf> (дата звернення 25.10.2025).

33 Difference between GPS Patch antenna and Helix antenna [Электронный ресурс] // MIDE. – Режим доступа: <https://www.mide-act.com/news/difference-between-gps-patch-antenna-and-helix-antenna.html> (дата звернення 25.10.2025).

- 34 High-Performance GNSS Antennas with Phase-Reversal Quadrature Feeding Network [Электронный ресурс] // NovAtel. – 2016. – Режим доступа: [https://hexagondownloads.blob.core.windows.net/public/Novatel/assets/Uploads/High\\_PerformanceGNSSAntennas\\_ION2016.pdf](https://hexagondownloads.blob.core.windows.net/public/Novatel/assets/Uploads/High_PerformanceGNSSAntennas_ION2016.pdf) (дата звернения 26.10.2025).
- 35 Antennas for GNSS Receivers [Электронный ресурс] // Beyond Gravity. – 2024. – Режим доступа: [https://www.beyondgravity.com/sites/default/files/media\\_document/202407/Antennas\\_for\\_GNSS\\_receivers\\_D-I-PRB-00029-SE\\_01-24.pdf](https://www.beyondgravity.com/sites/default/files/media_document/202407/Antennas_for_GNSS_receivers_D-I-PRB-00029-SE_01-24.pdf) (дата звернения 26.10.2025).
- 36 Phase Center Variations in Adaptive GNSS Antenna Arrays // Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2010). – Portland, 2010.
- 37 Determining the three-dimensional phase center of an antenna / D. L. Author et al. // GPS Solutions. – 2015.
- 38 Consistency Analysis of the GNSS Antenna Phase Center Correction Models // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14, Is. 3. – P. 540.
- 39 Leica GNSS Reference Antennas White Paper [Электронный ресурс] // Leica Geosystems. – Режим доступа: <https://leica-geosystems.com/> (дата звернения 27.10.2025).
- 40 Six Key Parameters to Consider When Comparing GNSS Antennas [Электронный ресурс] // Taoglas. – Режим доступа: <https://www.taoglas.com/blogs/six-key-parameters-to-consider-when-comparing-gnss-antennas/> (дата звернения 28.10.2025).
- 41 A Mathematical Theory of Linear Arrays [Электронный ресурс] // University of Wisconsin–Madison. – Режим доступа: [https://capmimo.ece.wisc.edu/capmimo\\_papers/math\\_th\\_linear\\_arrays.pdf](https://capmimo.ece.wisc.edu/capmimo_papers/math_th_linear_arrays.pdf) (дата звернения 05.11.2025).

42 Basics of Antenna Arrays [Электронный ресурс] // Ansys Innovation Space. – Режим доступа: <https://innovationspace.ansys.com/> (дата звернения 05.11.2025).

43 Phased Array Antenna Patterns—Part 1: Linear Array Beam Characteristics [Электронный ресурс] // Analog Devices. – Режим доступа: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/phased-array-antenna-patterns-part1.html> (дата звернения 05.11.2025).

44 Antenna Arrays [Электронный ресурс] // University of Toronto Notes. – Режим доступа: <https://www.waves.utoronto.ca/prof/svhum/ece422/notes/15-arrays2.pdf> (дата звернения 06.11.2025).

45 A cost-effective beam forming structure for GNSS multipath mitigation // The Journal of Navigation. – 2020.

46 GNSS Array Antenna for Mitigating Multipath Errors in Urban Environment // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 94.

47 Multipath Mitigation Performance of Planar GPS Adaptive Antenna Arrays [Электронный ресурс] // The MITRE Corporation. – Режим доступа: [https://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/williams\\_multipath.pdf](https://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/williams_multipath.pdf) (дата звернения 08.11.2025).

48 De Lorenzo D. S. Adaptive Array Processing for GPS Interference Rejection / D. S. De Lorenzo. – Stanford University, 2005.

49 Adaptive Beamforming Algorithms for Anti-Jamming [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <http://azadproject.ir/wp-content/uploads/2017/01/2017-Adaptive-Beamforming-Algorithms-for-Anti-Jamming.pdf> (дата звернения 08.11.2025).

50 A Space-Frequency Anti-Jamming Algorithm Based on Sub-Band // Progress In Electromagnetics Research M. – 2019.

51 Development of Wideband Spiral Antennas for GNSS Applications // IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI). – Montreal, 2020.

52 Introduction to Hybrid Beamforming [Электронный ресурс] // MATLAB Documentation. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/phased/ug/introduction-to-hybrid-beamforming.html> (дата звернения 10.11.2025).

53 Robust Wideband Interference Suppression Method for GNSS Array // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16, Is. 11. – P. 1913.

54 Pellet J. A new antenna array architecture with hybrid beamforming for broadband satellite communications / J. Pellet. – Edinburgh : Heriot-Watt University, 2023.

55 Analysis on Design Factors of the Optimal Adaptive Beamforming Algorithm for GNSS Anti-Jamming Receivers // Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering. – 2019.

56 Impedance matching feeding system [Электронный ресурс] // ResearchGate Discussion. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/post/Impedance\\_matching\\_feeding\\_system](https://www.researchgate.net/post/Impedance_matching_feeding_system) (дата звернения 12.11.2025).

57 Design of Quarter-Wave Transformer for Impedance Matching Applications [Электронный ресурс] // MATLAB & Simulink. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/rfpcb/ug/design-quarter-wave-transformer-for-impedance-matching-applications.html> (дата звернения 12.11.2025).

58 Microstrip Transmission Line Characteristic Impedance Calculator [Электронный ресурс] // Chemandy Electronics. – Режим доступа: <https://chemandy.com/calculators/microstrip-transmission-line-calculator.htm> (дата звернения 12.11.2025).

59 Design of a Compact High Isolation 4-Element Antenna Array // IEEE Access. – 2022.

60 A High Efficiency and Low Mutual Coupling Four-element Antenna Array for GNSS Applications // International Journal of Electronics and Communications. – 2024.

61 LaCalli K. Phased Helical Antenna Array for CubeSat Application : Undergraduate Honors Theses / Kameron LaCalli. – Boulder : University of Colorado, 2018. – 32 p.

62 Dinkić J. Lj. High-Gain Quad Array of Nonuniform Helical Antennas / J. Lj. Dinkić, D. I. Olćan, A. R. Djordjević, A. G. Zajić // International Journal of Antennas and Propagation. – 2019. – Vol. 2019. – Article ID 8421809.

63 The GNSS Helix Antenna for High Precision Application [Електронний ресурс] // SciSpace. – Режим доступу: <https://scispace.com/papers/the-gnss-helix-antenna-for-high-precision-application-h145nkjyxi> (дата звернення 14.11.2025).

64 Design and Electromagnetic Characterization of Circularly-Polarized Shorted-Annular-Ring GPS Antenna [Електронний ресурс] // eScholarship. – Режим доступу: <https://escholarship.org/content/qt96r7p1sc/qt96r7p1sc.pdf> (дата звернення 14.11.2025).

65 Helix Antennas, Theory and Practice [Електронний ресурс] // The SETI League. – Режим доступу: <https://www.setileague.org/articles/helix2.htm> (дата звернення 15.11.2025).

66 Helical Antenna (Helix Antenna) [Електронний ресурс] // Antenna Theory. – Режим доступу: <https://www.antenna-theory.com/antennas/travelling/helix.php> (дата звернення 15.11.2025).

67 Circularly Polarized Printed Helix Antenna for L- and S-Bands Applications // Radioengineering. – 2020. – Vol. 29, № 1. – P. 67–73.

68 Chapter 3. The Conventional Axial Mode Helix Antenna [Електронний ресурс] // VTechWorks. – Режим доступу: <https://vtechworks.lib.vt.edu/> (дата звернення 15.11.2025).

69 Kraus J. D. The Helical Antenna / J. D. Kraus // Proceedings of the IRE. – 1949. – Vol. 37, Is. 3. – P. 263–272.

70 Influence of Antenna Element Position Deviation on Radiation Performance of Helical Antenna Array // International Journal of Antennas and Propagation. – 2023.

71 Optimization of Helical antennas [Электронный ресурс] // Antenna Designer's Notebook. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/3305629> (дата звернения 16.11.2025).

72 The Substrate and Ground Plane Size Effect on Radiation Pattern // Proceedings of the 2013 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). – Nanjing, 2013.

73 Emerson D. The Gain of the Axial-Mode Helix Antenna [Электронный ресурс] / D. Emerson. – National Radio Astronomy Observatory (NRAO). – Режим доступа: <https://www.cv.nrao.edu/~demerson/cs/helix.htm> (дата звернения 17.11.2025).

74 Design of Low-Profile Dual-Band Printed Quadrifilar Helix Antenna // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2017.

75 Dinkic J. Nonuniform Helical Antennas : Doctoral Dissertation / J. Dinkic. – Belgrade : University of Belgrade, 2021.

76 Helical antenna calculator [Электронный ресурс] // GitHub Tools. – Режим доступа: <https://sgcderek.github.io/tools/helix-calc.html> (дата звернения 18.11.2025).

77 The Array Factor [Электронный ресурс] // Antenna Theory. – Режим доступа: <https://www.antenna-theory.com/arrays/arrayfactor.php> (дата звернения 18.11.2025).

78 Characterizing the Effects of Mutual Coupling on the Performance of a Miniaturized GPS Adaptive Antenna Array [Электронный ресурс] // The MITRE Corporation. – Режим доступа: <https://www.mitre.org/> (дата звернения 19.11.2025).

79 Design of a Compact 4-Element GNSS Antenna Array With High Isolation // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11.

80 An Impedance-Matched Exponentially-non-Uniform Axial-Mode Helical Antenna // Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering. – 2022.

81 A Miniaturized Microstrip Patch Antenna Array with Enhanced Bandwidth // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016.

82 Antenna Design and Optimization for 5G, 6G, and IoT / ed. by S. W. Cheung. – Basel : MDPI, 2024.

## Додаток А

ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Дипломна робота  
Другого (магістерського) рівня  
«Антенна решітка GPS сигналу на базі спіральних  
та патч-антен»

Виконав  
студент групи ЕКРм-24-1  
Коваль Максим  
Керівник  
д.т.н., професор  
Підченко С.К.

## 2 Мета, об'єкт та предмет дослідження

- **Метою кваліфікаційної роботи** є розроблення конструкції та дослідження моделі антенної решітки GPS-навігації на базі спіральних антен, а також визначення оптимальних параметрів її геометрії, взаємного розташування та узгодження елементів з метою забезпечення високої якості приймання сигналів у відповідних частотних діапазонах.
- **Об'єктом кваліфікаційної роботи** є процес формування та приймання GPS-сигналів за допомогою антенної решітки.
- **Предметом дослідження** є конструкція, електромагнітні властивості та параметри моделювання антенної решітки, сформованої на основі спіральних антен для приймання GPS-сигналів.

3

## Аналіз сучасних систем супутникової навігації



Рисунок 1. Зовнішній вигляд супутника системи GPS Block III

◆ NAVSTAR GPS (Global Positioning System Navigation Satellite Time and Ranging) — високоточна супутникова система навігації, яка дозволяє визначити місцезнаходження об'єкта, його широту, довготу та висоту над рівнем моря, а також напрямок і швидкість його руху. Комплекс NAVSTAR розроблений, утілений і належить Міністерству оборони США.

4

## Структура та принципи функціонування ГНСС

Супутникова система навігації (GNSS — Global Navigation Satellite System) — система наземного та космічного обладнання, що призначена для позиціонування в просторі та часі, для визначення швидкості, напрямку та інших параметрів руху об'єкта, яка дає можливість корегувати напрям руху об'єктів при їх відхиленні від запланованого шляху, що є особливо важливим для літаків і кораблів.

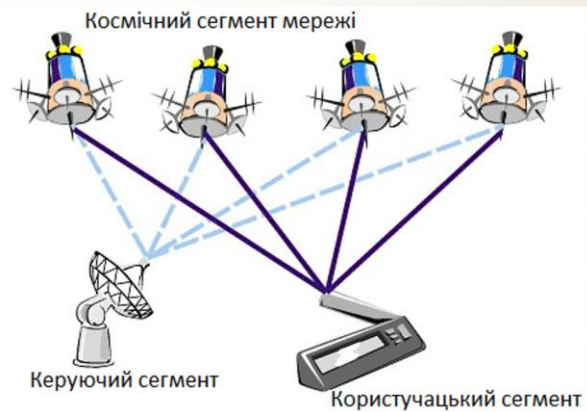


Рисунок 2. Сегменти супутникової навігації

## Антени для GPS-навігації: конструкції, параметри

5

- Циліндрична спіральна антена утворена провідником, намотаним на циліндричну поверхню з постійним радіусом витків. У режимі осьового випромінювання вона забезпечує високий коефіцієнт підсилення, стабільну кругову поляризацію та стабільний фазовий центр, що є критичним для точного позиціювання.
- Конічна спіральна антена відрізняється тим, що діаметр її витків плавно змінюється вздовж осі. Така конструкція забезпечує значно ширшу робочу смугу частот (понад 40%), оскільки різні ділянки спіралі резонують на різних частотах, що дозволяє перекривати діапазони GPS L1, L2 та L5 однією антеною без додаткових узгоджувальних кіл.

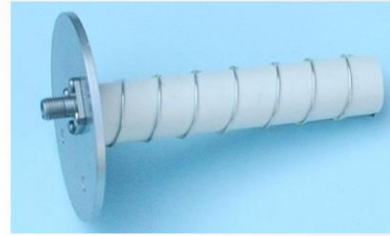


Рисунок 3. Циліндрична спіральна антени



Рисунок 4. Конічна спіральна антени

6

## Антени для GPS-навігації: конструкції, параметри

- Плоска архімедова спіральна антена є прикладом біфілярної структури, яка для забезпечення односпрямованого випромінювання зазвичай розміщується над поглинаючим резонатором або металевим рефлектором. Плоскі логарифмічні спіральні антени забезпечують кращу стабільність параметрів у надширокій смузі (через експоненційну геометрію), тоді як Архімедова має простішу лінійну геометрію.



Рисунок 5. Архімедова спіральна антена

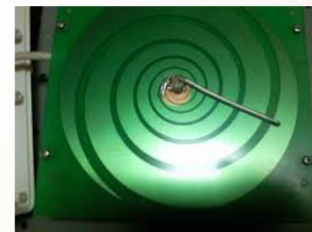


Рисунок 6. Логарифмічна спіральна антена

## Анени для GPS-навігації: конструкції, параметри

7



Рисунок 7. Квадрифілярна спіральна антена

- Квадрифілярна спіральна антена складається з чотирьох ідентичних спіральних провідників, зсунутих у просторі на  $90^\circ$  градусів один відносно одного навколо спільної осі. Живлення таких антен здійснюється з фазовим зсувом  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  та  $270^\circ$ , що дозволяє сформувати ідеальну кардіоїдну діаграму спрямованості з чудовим відношенням вперед/назад та високою фазовою стабільністю.

## Анени для GPS-навігації: конструкції, параметри

8

- Мікросмужкові патч-антени є домінуючим типом у масовому сегменті навігаційного обладнання завдяки своїй пласкій конструкції, низькому профілю та можливості інтеграції в друковані плати. Принцип їх роботи базується на резонансі електромагнітних хвиль у порожнині між випромінюючим елементом та екраном, що забезпечує компактність, але призводить до вузької смуги пропускання.



Рисунок 8. Патч антена з одноточковим живленням.



Рисунок 9. Патч антена з двоточковим живленням.

9

## Порівняння спіральних і патч-антен

Таблиця 1. Порівняння антен

Характеристика	Циліндрична спіральна антена	Патч-антена
<b>Фізичний принцип</b>	Антена біжучої хвилі	Резонансна система стоячої хвилі
<b>Смуга пропускання</b>	Широка (40–50%), природна мультидіапазонність	Вузька (1–5%), потребує стекових структур
<b>Діаграма спрямованості</b>	Широка, високе підсилення на низьких кутах місця ( $5^{\circ}$ – $15^{\circ}$ )	Напівсферична, різкий спад підсилення при наближенні до горизонту
<b>Поляризація</b>	Відмінна ( $OB < 3$ дБ) у широкому секторі огляду	Якісна лише в зеніті, швидко деградує при відхиленні
<b>Взаємний зв'язок</b>	Низький	Високий (через поверхневі хвилі в підкладці)

10

## Теорія антенних решіток

- Антенна решітка — це система, що складається з декількох випромінювачів, робота якої базується на принципі суперпозиції електромагнітних полів. Використання решітки дозволяє значно збільшити сумарний коефіцієнт підсилення та звужити головну пелюстку діаграми спрямованості, що критично для прийому слабких сигналів. Ключовою перевагою є можливість електронного керування положенням променя (сканування) шляхом зміни фазового розподілу збудження елементів, що забезпечує безінерційне супроводження супутників та ефективну просторову фільтрацію завад.

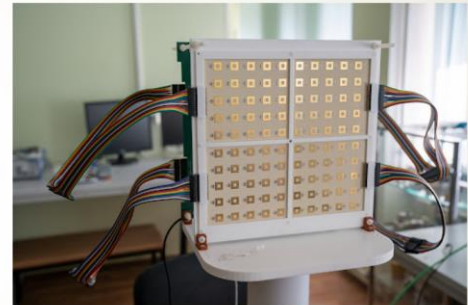


Рисунок 10. Антенна решітка на основі патч антен.

11

## Розрахунок спіральної антени та антенної решітки

Центральна частота ( $f_0$ ):

$$f_0 = \frac{f_{min} + f_{max}}{2} = \frac{1200 + 1600}{2} = 1400 \text{ МГц}$$

Довжина хвилі на центральній частоті:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{3 \cdot 10^8}{1400 \cdot 10^6} = 0,21414 \text{ м} = 214,14 \text{ мм}$$

Діаметр спіралі:

$$D = \frac{C}{\pi} = \frac{214,14}{3,14} \approx 68,2 \text{ мм}$$

Крок спіралі:

$$S = C \tan \alpha = 214,14 \tan 13^\circ = 214,14 \cdot 0,23 = 49,25 \text{ мм}$$

Довжина антени вздовж осі Z:

$$A = N \cdot S = 6 \cdot 49,25 = 295,5 \text{ мм}$$

Діаметр екрану антенної решітки:

$$D_{gp} \geq 1,5\lambda_{min} \geq 0,75 \cdot 250 \geq 375 \text{ мм}$$

Відстань між центрами антен:

$$d = 0,75\lambda = 0,75 \cdot 214,14 = 160,6 \text{ мм}$$

12

## Розрахунок спіральної антени та антенної решітки

Таблиця 2. Габарити антенної решітки

Параметр	Позначення	Значення
Робоча частота (центр)	$f_0$	1400 МГц
Довжина хвилі (центр)	$\lambda_0$	214,14 мм
Кількість витків	N	6
Діаметр спіралі	D	68,2 мм
Довжина кола витка	C	214,14 мм
Кут намотування	$\alpha$	13°
Крок спіралі	S	49,25 мм
Загальна осьова довжина	A	295,5 мм
Діаметр екрану антенної решітки	$D_{gp}$	400 мм
Відстань між центрами антен	d	160 мм

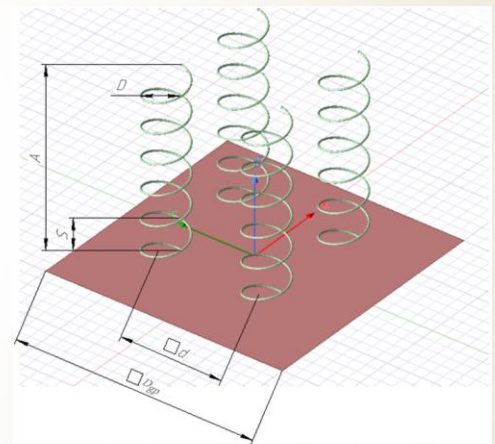


Рисунок 11. Габарити антенної решітки.

## Моделювання спіральної антени

13

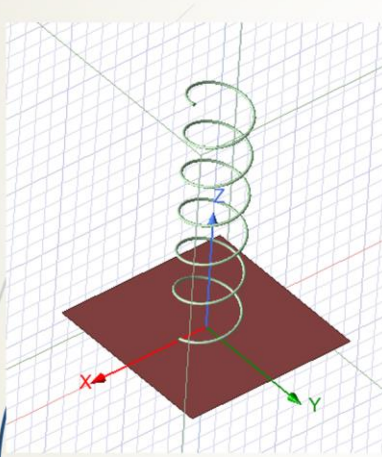


Рисунок 12 Модель спіральної антени

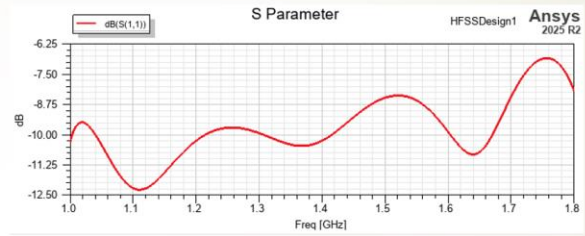


Рисунок 13 Частотна залежність коефіцієнта відбиття



Рисунок 14 КСХН спіральної антени

## Моделювання спіральної антени

14

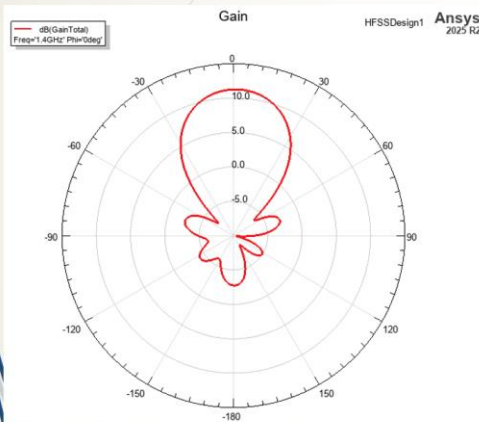


Рисунок 15 Діаграма спрямованості антени

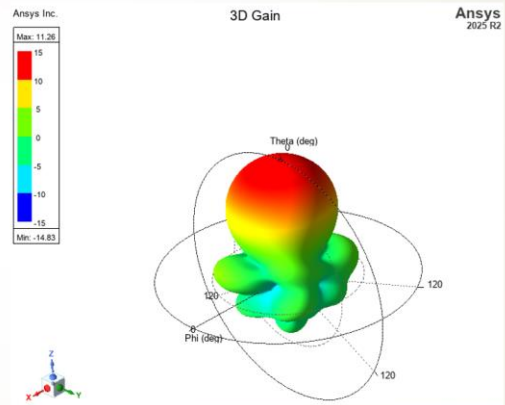


Рисунок 16 3D діаграма спрямованості антени

15

## Моделювання антенної решітки

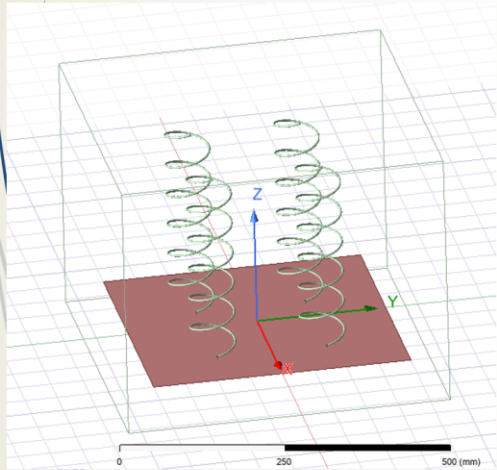


Рисунок 17 Модель спіральної антени



Рисунок 18 S-параметри антенної решітки

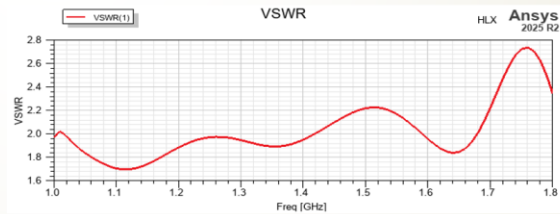


Рисунок 19 КСХН антенної решітки

16

## Моделювання антенної решітки

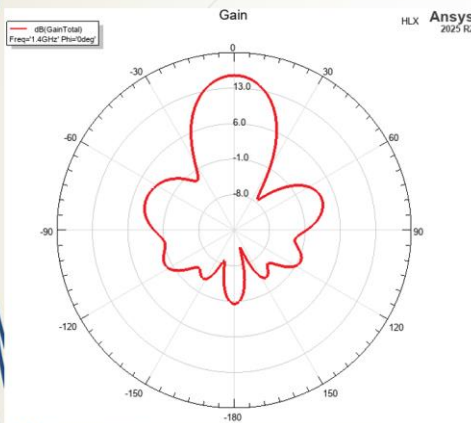


Рисунок 20 Діаграма спрямованості решітки

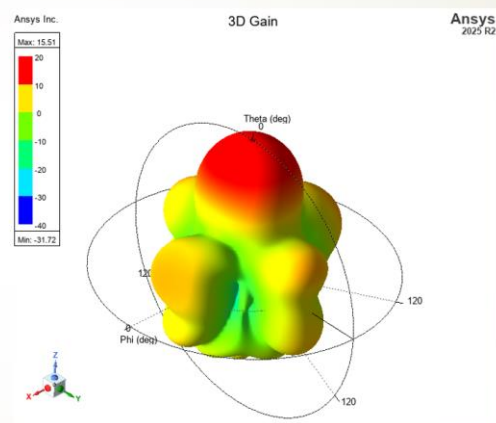


Рисунок 21 3D діаграма спрямованості решітки

17

## Моделювання антенної решітки

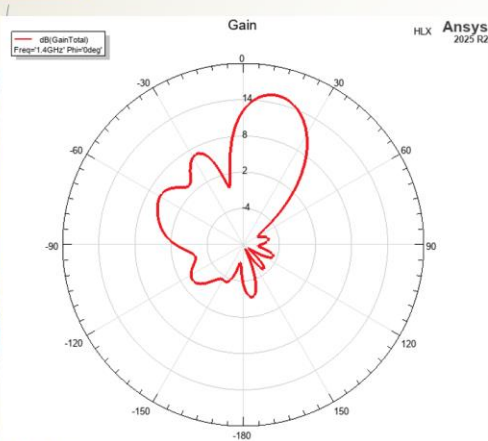


Рисунок 22 Діаграма спрямованості решітки з фазовим зсувом

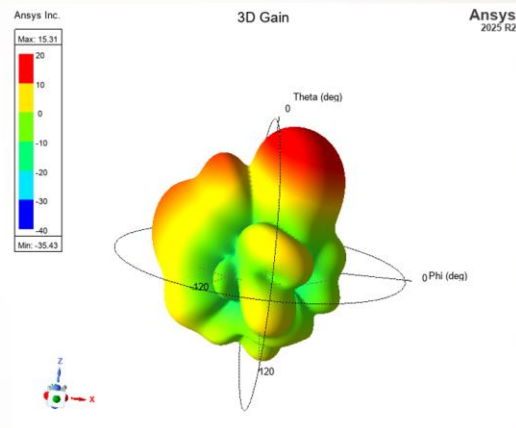
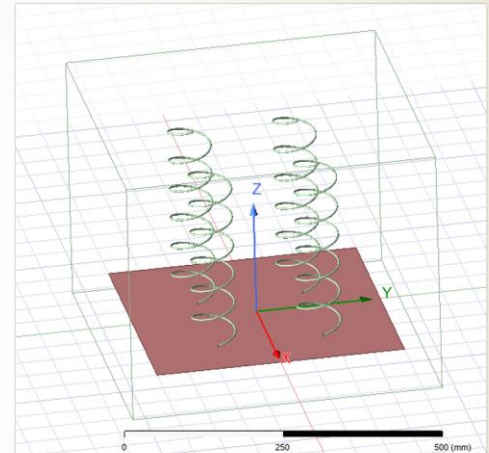


Рисунок 23 3D діаграма спрямованості решітки з фазовим зсувом

18

## Висновки

- У ході роботи розроблено та досліджено широкопasmову антенну решітку L-діапазону (1200–1600 МГц) на базі чотирьох циліндричних спіральних випромінювачів. Отримана конструкція забезпечує коефіцієнт підсилення понад 15,5 дБ та високу стабільність кругової поляризації, що дозволяє ефективно придушувати багатопромєневi завади. Підтверджено можливість електронного сканування променем у секторі  $\pm 45^\circ$ , що у поєднанні зі стабільним фазовим центром значно підвищує завадозахищеність та точність навігації порівняно з традиційними системами на основі патч-антен.
- Апробація результатів.** Основні положення роботи доповідались та обговорювались на XVII Всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН – 2025», м. Хмельницький, ХНУ, 14-15 листопада 2025.





Дякую за увагу!

## Додаток Б

Міністерство освіти і науки України  
Хмельницький національний університет



**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**  
за матеріалами XVII Всеукраїнської науково-практичної конференції  
«Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2025»

*14-15 листопада 2025*

Хмельницький 2025

---

УДК 004:37:001:62

Збірник наукових праць за матеріалами XVII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2025». Хмельницький. 2025. 500с.

У збірнику наукових праць подані перспективні практичні розробки аспірантів, студентів та здобувачів в області сучасних інформаційних технологій. Розглянуто актуальні проблеми комп'ютерних наук, комп'ютерної інженерії, прикладної математики й інженерії програмного забезпечення, приведено ряд робіт по впровадженню інформаційних технологій у виробництво та управління. Висвітлено перспективні розробки сучасних систем пошуку, обробки й захисту інформації, медійних та комунікаційних системи.

УДК 004:37:001:62

Матеріали конференції відтворені з авторських оригіналів, друкуються в авторській редакції та наведені в алфавітному порядку прізвищ авторів. При макетуванні можливі незначні зміни компоновки контенту авторських оригіналів. Відповідальність за якість та зміст публікацій несе автор.

Участь у конференції та складові всіх її етапів (розгляд праць, перевірка на плагіат, макетування, публікація збірника наукових праць та видача сертифікатів) є безкоштовними для всіх учасників. Оргкомітет конференції висловлює подяку учасникам конференції та сподівається на подальшу співпрацю.

З питань проведення конференції та подальшого обміну інформацією звертатись на e-mail конференції: [apkt.khnu@gmail.com](mailto:apkt.khnu@gmail.com)

**АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК - 2025***XVII Всеукраїнська науково-практична конференція*

Метою конференції є висвітлення актуальних проблем комп'ютерних наук, інформатики та інформаційних технологій.

**Робочі мови конференції:**

українська, англійська

**СЕКЦІЇ КОНФЕРЕНЦІЇ:**

1. Комп'ютерні науки, штучний інтелект та прикладні інформаційні технології.
2. Комп'ютерна інженерія та системи захисту інформації.
3. Математичне моделювання та інженерія програмного забезпечення
4. Телерадіокомунікації, медійні та комунікаційні системи.
5. Проблеми впровадження інформаційних технологій у виробництво та управління.

**СПИСОК ОРГАНІЗАЦІЙ,****ПРЕДСТАВНИКИ ЯКИХ БРАЛИ УЧАСТЬ У РОБОТІ  
КОНФЕРЕНЦІЇ:**

Донбаська державна машинобудівна академія  
Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України  
Кам'янський енергетичний фаховий коледж  
Київський національний університет імені Т. Г. Шевченка  
Національного аерокосмічного університету імені М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
Сумський державний університет  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
Хмельницький національний університет  
Хмельницький фаховий економіко-технологічний коледж УЕП

**ОРГКОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ:**

**СИНЮК О. М.** – голова оргкомітету, проректор Хмельницького національного університету з наукової роботи, доктор технічних наук, професор.

**ГОВОРУЩЕНКО Т. О.** – заступник голови оргкомітету, декан факультету інформаційних технологій Хмельницького національного університету, доктор технічних наук, професор.

**БАРМАК О. В.** – заступник голови оргкомітету, завідувач кафедри комп'ютерних наук Хмельницького національного університету, доктор технічних наук, професор.

**САВЕНКО О. С.** – професор кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету, доктор технічних наук, професор.

**ВИСОЦЬКА О. В.** – завідувач кафедри радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і технологій Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», доктор технічних наук, професор.

**ЛАВРОВ Є. А.** – доктор технічних наук, професор (Сумський державний університет).

**ТИМОФЄЄВА Л. В.** – відповідальна за студентську науково-дослідну роботу ХНУ.

**МАЗУРЕЦЬ О. В.** – секретар конференції, доцент кафедри комп'ютерних наук Хмельницького національного університету, кандидат технічних наук, доцент.

**МОЛЧАНОВА М. О.** – секретар конференції, старший викладач кафедри комп'ютерних наук Хмельницького національного університету, доктор філософії з комп'ютерних наук.

**КОНТАКТНА ІНФОРМАЦІЯ:**

e-mail для листування: [apkt.khnu@gmail.com](mailto:apkt.khnu@gmail.com)

<b>Кадинська В.Д., Молчанова М.О.</b> Адаптований нейромережевий підхід до виявлення фрагментів будівельних відходів на зображеннях реальних сцен .....	155
<b>Казмірчук Я.М., Микитюк М.О., Мазурець О.В.</b> Алгоритм масштабування зображень принтів нейромережевими засобами для трафаретного друку .....	163
<b>Канішев В.О., Мельников О.Ю.</b> Вдосконалення об'єктно-орієнтованої моделі програмного забезпечення для оцінки якості фонового оформлення сайтів для людей із дальтонізмом .....	168
<b>Коржан М.М., Підченко С.К.</b> Інфокомунікаційна система екзаменаційно-тренінгового центру іноземних мов ..	176
<b>Катрєвич О.Б.</b> Метод інтеграції RAG-компонентів у мультиагентні системи.....	181
<b>Кашиперук Т.Р., Мазурець О.В.</b> Метод визначення мовно-детермінованого індексу суб'єктивного благополуччя з використанням NLP .....	184
<b>Кириченко О.М.</b> Інтерпретована нейронна мережа для класифікації МРТ-зображень з генерацією клінічно релевантних пояснень .....	195
<b>Коваль М.О., Підченко С.К.</b> Антенна решітка GPS-сигналу на базі спіральних антен .....	199
<b>Коваль О.В., Олексюк Д.А., Чешун Д.В., Чешун В.М.</b> Застосування технологій DevSecOps для зменшення вразливостей програмного забезпечення .....	203
<b>Кок І.А., Поліщук Д.С., Кліменко В.І., Бармак О.В.</b> Нейромережева система автоматизованого контролю за тютюнопалінням у публічних місцях.....	208
<b>Колесніков В.Р., Капустян М.В.</b> Порівняльний аналіз рівнів обфускації .NET-коду.....	217
<b>Коркунда Н.С., Манзюк Е.А., Скрипник Т.К.</b> Метод класифікації резюме за професійними категоріями з використанням машинного навчання .....	222

УДК 621.396.67

Коваль М.О., Підченко С.К.

*Хмельницький національний університет***АНТЕННА РЕШІТКА GPS-СИГНАЛУ НА БАЗІ СПІРАЛЬНИХ АНТЕН**

*У роботі розглянуто розробку та моделювання антенної решітки для прийому GPS-сигналів на основі спіральних конусних антен. Обґрунтовано актуальність використання таких антен у сучасних супутникових навігаційних системах завдяки їхній круговій правій поляризації (RHCP), високій спрямованості та здатності забезпечувати стабільний прийом сигналів.*

*The paper considers the development and modeling of an antenna array for receiving GPS signals based on spiral cone antennas. The relevance of using such antennas in modern satellite navigation systems is substantiated due to their right-hand circular polarization (RHCP), high directivity, and ability to provide stable signal reception.*

У сучасних системах супутникової навігації (зокрема GPS) дедалі зростають вимоги до антенної частини: підвищена чутливість, великий коефіцієнт підсилення, широка кутова зона відслідковування супутників, стійкість до шумів антени для мобільних, авіаційних і космічних застосувань.

Спіральні конусні антени можуть забезпечувати задовільні характеристики у смузі L-діапазону (близько 1.2 – 1.6 ГГц). Проте одна спіральна антена має обмежений коефіцієнт підсилення і відносно широку діаграму випромінювання, що може зменшувати ефективність прийому слабких супутникових сигналів у присутності завад і шумів або коли супутники мають низький кут над горизонтом.

Тому актуальною стає ідея створення антенної решітки (масиву) на базі спіральних антен, яка поєднує переваги спіральних елементів (RHCP, простота конструкції) з можливістю підвищення підсилення, формування спрямованого діаграми, керованої або фіксованої, і покращеної стійкості до перешкод. Така антена-масив може бути використана не лише в системах GPS-навігації, а також у інших глобальних навігаційних супутникових системах (наприклад, GPS, GLONASS, Galileo, Beidou) для підвищення точності та надійності позиціонування.

Метою даного дослідження є розробка і моделювання антенної решітки на базі спіральних конусних антен, оптимізованої для прийому сигналів супутникової навігації (зокрема GPS)

У літературі описані різні конфігурації масивів спіральних антен. Зокрема, LaCalli [1] запропонував фазований  $2 \times 2$  масив спіральних антен для CubeSat (робота на частоті Wi-Fi,  $\sim 2.4$  ГГц) з можливістю керування спрямованістю променя. Dinkić et al. [2] розробили оптимізований квадратно-симетричний масив неоднорідних спіральних антен, отримавши коефіцієнт підсилення близько 20.5 дБі у смузі 0.9–1.1 ГГц. Водночас ці роботи не були орієнтовані на роботу в GPS-діапазоні (1.1–1.6 ГГц). Отже, спеціалізована розробка антенної решітки зі спіралей кінчної форми для частот GPS L1/L2 є актуальним.

Виникають питання оптимального фазування елементів, їх просторового розміщення та взаємодії із середовищем. Для вирішення цих задач доцільно застосовувати чисельні методи і оптимізаційні алгоритми (як це зроблено в [2] при оптимізації 3D-моделі масиву).

При розробці і моделюванні антенної решітки на базі спіральних конусних антен, передбачається забезпечення таких характеристик:

- високого коефіцієнта підсилення і спрямованості (для підвищення співвідношення сигнал/шум при слабких навігаційних сигналах);
- кругової правої поляризації (RHCP), сумісної з GPS/ГНСС-сигналами;
- широкої кутової області покриття (зокрема для супутників з низьким кутом над горизонтом) або можливості формування/керування діаграмою в масиві;
- мінімізації впливу шумів та перешкод (через форму діаграми, бокові пелюстки, взаємозв'язок елементів);

У дослідженні використовується спіральна конусна антена (рисунок 1) як елемент решітки: параметри включають діаметр витка  $D$ , крок витка  $S$  (або кут нахилу спіралі  $\alpha$ ), кількість витків  $N$ , загальна висота спіралі  $L$ , а також основа (рефлектор, екран) і тип фідера. Важливим є підбір параметрів для роботи у діапазоні GPS L1 ( $\sim 1.575$  ГГц) або багаточастотного (L1/L2) режиму.

Далі формується масив (решітка) з кількох спіральних елементів ( $2 \times 2$ ), відстань між елементами  $d = 1,5\lambda$ , схема живлення та фазування. Використовується програма моделювання WIPL-D для обчислення характеристик.

При розробці прототипу антенної решітки спіральних антен для GPS-навігації одержано такі результати:

- підсилення масиву на 4дБ більше, ніж від одної спіральної антени за аналогічних умов, що дозволяє більш надійно приймати слабкі супутникові сигнали.
- діаграма випромінювання має звужену зону і зменшені бокові пелюстки.
- поляризація RHCP, що забезпечує сумісність із GPS-сигналами.

Проведені аналітичні і чисельні розрахунки свідчать, що сумісне використання спіральних антен у масиві дає синергійний ефект: кожний елемент

спеціалізується на поляризації і прийомі супутникового сигналу, тоді як масив забезпечує підсилення і спрямованість. Зменшення бокових пелюсток і підвищення підсилення прямо впливають на підвищення відношення сигнал/шум в навігаційних приймачах, що може забезпечити покращену точність позиціонування і підвищену стійкість до перешкод (наприклад, джерел інтерференції поза головним променем).

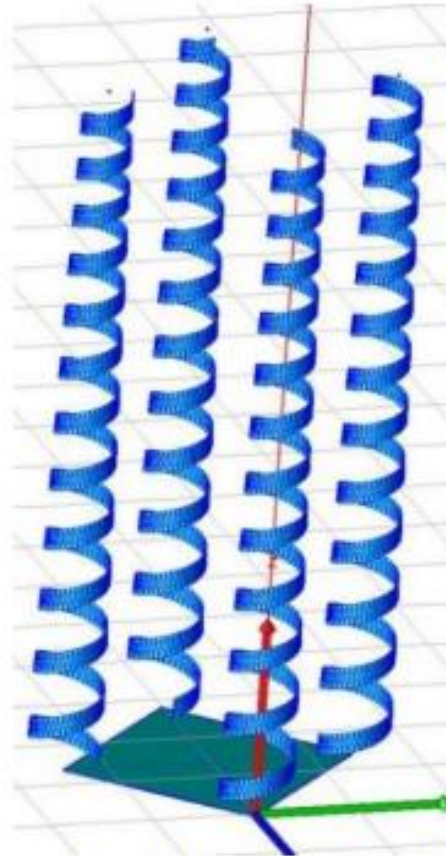


Рисунок 1 – Модель антенної решітки

Науковою новизною є використання конусних спіральних антен в антенній решітці і адаптація масиву спіральних антен саме під GPS/ГНСС-навігацію із врахуванням практичних обмежень. Результати показують, що оптимізація параметрів (діаметр, крок, кількість витків, відстань між елементами, фази живлення) дозволяє досягти балансу між габаритами та характеристиками антени.

**Висновки.** Розроблена антена-решітка на базі спіральних конусних антен показує обґрунтовану доцільність для систем GPS/ГНСС: вона дозволяє підвищити підсилення, покращити спрямованість і зменшити вплив небажаних компонентів сигналу (бокові пелюстки, шуми).

У порівнянні з одиночними спіральними антенами, застосування масиву дає переваги у більшості характеристик — особливо в умовах слабких сигналів, перешкод або обмеженого поля зору супутників.

Водночас реалізація масиву супроводжується низкою практичних викликів — точне розміщення елементів, узгодження фідерів і фаз, а також вплив взаємозв'язку елементів. Коректне проектування і калібрування мають вирішальне значення.

Отримані результати свідчать, що антена-решітка на базі спіральних конусних антен може бути ефективним рішенням для навігаційних приймачів, а також для спеціалізованих навігаційних систем, що вимагають підвищеної надійності і продуктивності.

**Перспективи подальших досліджень.** Подальші дослідження спрямовані на оптимізацію конструкції за допомогою сучасних алгоритмів для підбору параметрів масиву (розмір, крок, фаза), з метою покращення характеристик.

Дослідження варіантів матеріалів, легких конструкцій та інтеграційних рішень (наприклад, друковані спіральні антени, 3D-друк корпусу) для зменшення ваги і габаритів.

#### **Перелік посилань**

1. Phased Helical Antenna Array for CubeSat Application / Kameron LaCalli // Undergraduate Honors Theses. 32.
2. High-Gain Quad Array of Nonuniform Helical Antennas / Jelena Lj. Dinkić, Dragan I. Olćan, Antonije R. Djordjević, and Alenka G. Zajić // Hindawi International Journal of Antennas and Propagation Volume 2019, Article ID 8421809, 12 pages.
3. Optimization of Helical Antennas / Antonije R. Djordjević, Alenka G. Zajić, Milan M. Pić, and Gordon L. Stüber // IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 48, no. 6, pp. 107-116, December 2006.
4. Широкопосмугова планарна спіральна антена з периферійним збудженням / Цалієв Т. А., Сідень С. В. // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2018, № 1 UDC 621.396.677.8.



## **АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК 2025**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

*Комп'ютерна верстка: Мазурець О. В.*

Підписано до друку 15.11.2025.  
Версія друку «APKN2025\_CorpusPaper v5mod93 Final».

E-mail: [apkt.khnu@gmail.com](mailto:apkt.khnu@gmail.com)  
ХНУ. м. Хмельницький, вул. Інститутська,11.

Завідувачу кафедри  
телекомунікацій, медійних та  
інтелектуальних технологій (ТМІТ)  
Сергію ПІДЧЕНКУ  
студента 2 курсу, гр. ЕКРм-24-1  
Максима КОВАЛЯ

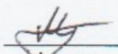
### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщена та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

08.10.25  
дата

  
підпис

Коваль М.О.

**Anti-Plagiarism (UA) v-16.690****The maximum coincidence with one document 0.0%****Dictionaries check: UA, US, RU. Errors in the documents: 11%**

ID: 252751 Title: Антенна решітка GPS сигналу на базі спіральних та патч-антен Added in a DB: 2025-12-14 Authors: Коваль Максим Олегович Heads: Підченко Сергій Костянтинович Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	145091	1149	1815 (1%)	28 (2%)

## Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

## Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Максим\_КОВАЛЬ\_ЕКРМ-24-1

Співавтор:

Назва: Антенна решітка GPS сигналу на базі спіральних і патч-антен

Науковий керівник: Сергій ПІДЧЕНКО, д.т.н, проф.

Підрозділ: Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Коефіцієнт подібності 1:2%

Коефіцієнт подібності 2:0%

Мікропробіли: 1

Заміна букв: 2

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-12-14 21:18:41.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

Дата 14.12.25

експерт

*Сергій Підченко*  
*Сергій Підченко*

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

**ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва: Антенна решітка GPS сигналу на базі спіральних і патч-антен

Автор: **Коваль Максим Олегович**

Освітня програма: **Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі**

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

Спеціальність: **172 Телекомунікації та радіотехніка**

Науковий керівник: **д.т.н., проф. Підченко Сергій Костянтинович**

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	+
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порешень академічної доброчесності	

Підтвердження:


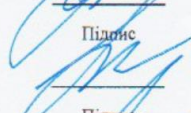
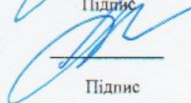
Виявленні запозичення не є плагіатом, так як розміщені у розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження (є власні терміни, визначення тощо), коефіцієнти подібності складають 2% та 0%, співпадиння мають посилання на приведений список літературних джерел.

«15» 12 2025 р.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

  
Підпис  
  
Підпис  
  
Підпис

Сергій ПІДЧЕНКО

Сергій ПІДЧЕНКО

Сергій ПІДЧЕНКО

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

## ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ

Направляється студент Коваль Максим Олегович на захист дипломного проєкту (роботи)

(прізвище, ім'я, по батькові)

за спеціальністю 172 - Електронні комунікації та радіотехніка

На тему: Антенна решітка GPS сигналу на базі спіральних та патч-антен

Дипломний проєкт (робота), рецензія і довідка про перевірку на плагіат додаються.

Декан факультету



(підпис)

Тетяна Тоборущенко

(ім'я, прізвище)

### ДОВІДКА УСПІШНОСТІ

Коваль М.О. з 2024 по 2025 роки повністю виконав навчальний план спеціальності з таким розподілом оцінок за:

національною шкалою: відмінно 62,50 %, добре 25,00 %, задовільно 12,50 %.

шкалою ЄКТС: А 46,15 %, В 15,38 %, С 23,08 %, D 7,69 %, Е 7,69 %.

Методист факультету

[Signature]

(підпис)

Тетяна Косур

(ім'я, прізвище)

### ВИСНОВОК КЕРІВНИКА ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ (РОБОТИ) ТА ОБГРУНТУВАННЯ ОЦІНКИ

Студент

Коваль Максим Олегович виконав

дипломну магістерську роботу з теми  
«Відновлення до задаття». Робота виконана  
на найвищому науково-технічному рівні.  
Робота пройшла апробацію на всеукраїнській  
конференції АПКН-25, м. Хмельницький.  
Робота може бути допущена до захисту.

Оцінка дипломного проєкту (роботи)

добре 4

Керівник дипломного проєкту

[Signature]

(підпис)

Мигуєнко С.К.

(ім'я, прізвище)

" 15 " грудня 2025 р.

### ВИСНОВОК КАФЕДРИ ПРО ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ)

Дипломний проєкт (роботу) розглянуто. Студент Коваль М.О. допускається до захисту цього проєкту (роботи) в екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри

ТМІТ

(назва)

[Signature]

(підпис, ім'я, прізвище)

" 15 " грудня 2025 р.

## РЕЦЕНЗІЯ

на магістерську дипломну роботу  
студента групи ЕКРм-24-І Максима КОВАЛЯ

*«Антенна решітка GPS сигналу на базі спіральних і патч-антен»*

Сучасний розвиток систем супутникової навігації характеризується підвищенням вимог до точності та надійності позиціонування. В умовах щільної міської забудови та складної електромагнітної обстановки виникають проблеми багатопроменевого поширення сигналу та впливу завад. Традиційні рішення на базі одиночних антен часто не забезпечують необхідних параметрів, тому обрана тема роботи, присвячена розробці адаптивних антенних решіток, є безумовно актуальною.

Метою роботи є розроблення конструкції та дослідження моделі антенної решітки GPS сигналу на базі спіральних антен, а також визначення оптимальних параметрів її геометрії для забезпечення високої якості приймання сигналів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні основні завдання: 1. Аналіз сучасних систем супутникової навігації та порівняння характеристик спіральних і патч-антен. 2. Теоретичне обґрунтування та розрахунок геометричних параметрів спірального випромінювача та топології антенної решітки. 3. Електродинамічне моделювання антенної решітки, розрахунок системи живлення та аналіз отриманих характеристик (діаграми спрямованості, коефіцієнта підсилення, КСХН).

Наукова-практична новизна роботи полягає у подальшому розвитку моделі спіральної антени для дводіпазонного режиму роботи та синтезі конструкції антенної решітки, яка забезпечує коефіцієнт підсилення понад 15 дБ та можливість електронного сканування променем, що підтверджено результатами моделювання.

Результати роботи можуть бути використані при проектуванні завадостійких антенних систем для БПЛА, наземних геодезичних станцій та транспортних засобів.

За результатами роботи опубліковано тези доповіді у Збірнику наукових праць за матеріалами XVII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН – 2025»: Хмельницький, 2025.

В цілому магістерська дипломна робота Максима КОВАЛЯ є актуальною у сфері сучасних технологій радіотехніки та навігації, виконана на високому науково-технічному рівні та заслуговує оцінки «добре».

Рецензент:

зав. кафедри кібербезпеки,

к.т.н., доцент



Юрій КЛЬОЦ