

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет  
Кафедра радіотехнічних систем**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій ЖУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломна робота**  
**на здобуття ступеня бакалавра**  
**за освітньо-професійною програмою**  
**«Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»**  
**спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»**  
**на тему: «CRP антена для GPS діапазону»**

Виконала:  
студентка IV курсу, групи РС-01  
Саранчук Анна Павлівна



Керівник:  
старший викладач кафедри радіо інженерії  
Олег Ігорович Павлов



Рецензент:  
інженер-програміст, ТОВ «Радіонікс»  
Неуймін Сергій Станіславович



Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає  
запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студентка



Київ – 2024 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Радіотехнічний факультет**

**Кафедра радіотехнічних систем**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій ЖУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломну роботу студенту**

**Прізвище, ім'я, по батькові**

1. Тема роботи «**CRP антена для GPS діапазону**», керівник роботи Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання,

затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи: 19.06.2024

3. Вихідні дані до роботи: Розробити 3D модель CRP антенної решітки та провести її ЕМ аналіз; дослідити формування (beamforming) її діаграми спрямованості; розробити і протестувати модель керування та формування діаграмою спрямованості

4. Зміст пояснювальної записки: 1. Вступ. 1.1. Принципи функціонування глобальної системи позиціонування GPS. 1.2. Характеристика завад GPS систем.

1.3. Порівняння FRPA та CRPA. 1.4. Аналіз побудови CRPA системи GPS. 1.5. Показники ефективності CRPA антени. 2. Розробка 3D моделі та електромагнітний аналіз CRP антени. 2.1. Розробка елемента решітки. 2.2. Аналіз моделі елемента решітки. 2.3. Дизайн антенної решітки з 4х елементів. 2.4. Аналіз моделі антенної решітки. 3. Створення математичної моделі керування діаграмою спрямованості антенної решітки. 3.1. Обґрунтування математичної моделі. 3.2. Огляд результатів моделювання Matlab. Порівняння з моделлю CST. 3.2.1. Перевірка відтворення моделі елемента та решітки. 3.2.2. Перевірка відтворення моделі елемента решітки з використанням вагових коефіцієнтів.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо):

1. Результати проведених досліджень у програмному середовищі CST. 2. Графічні результати моделювання у програмному застосунку Matlab. 3. Інші матеріали (слайди), які необхідні матеріали для презентації результатів роботи.

6. Дата видачі завдання: 22.04.2024

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд та аналіз технічної літератури	до 01.05.2024 р.	
2	Аналіз можливих варіантів виконання	до 06.05.2024 р.	
3	Розробка 3D моделі елемента решітки	до 12.05.2024 р.	
4	Розробка 3D моделі решітки	до 18.05.2024 р.	
5	Реалізація алгоритму керування діаграмою спрямованості	до 30.05.2024 р.	
6	Написання пояснювальної записки	до .06.2024 р.	
7	Підготовка презентації	до 18.06.2024 р.	

Студент

Анна САРАНЧУК

Керівник

Олег ПАВЛОВ

## АНОТАЦІЯ

Обсяг пояснювальної записки дипломної роботи становить 52 сторінки, які включають в себе 13 розділів, 36 ілюстрацій, 11 таблиць, 1 додаток і 12 бібліографічних найменувань за переліком джерел посилань.

**Актуальність теми:** Технологія GPS набула широкого мілітарного та цивільного використання. В наш час GPS навігація є невід'ємною складовою багатьох видів озброєння. Разом з тим, GPS сигнал є дуже малопотужним, а заводська обстановка швидко змінюється в середовищі активної роботи РЕБ та РЕР систем. Це створює необхідність проектування малогабаритних заводозахищених систем.

**Мета дослідження:** Розробити 3D модель CRP антени. Провести аналіз її електромагнітних властивостей. Створити математичну модель керування діаграмою спрямованості антенною решіткою співставну за якістю з моделлю програмного застосунку CST

**Об'єкт дослідження:** 3D та математична модель CRP антени

**Предметом дослідження:** розробка CRP антени. Методи і алгоритми дослідження CRP антени

**Ключові слова:** CRP антена, CRPA, GPS, антенні решітки, конструкція антен, дослідження електромагнітних властивостей

## ANNOTATION

The volume of the explanatory note of the diploma thesis comprises 52 pages, which include 13 sections, 36 illustrations, 11 tables, 1 appendix, and 12 bibliographic references listed in the sources of citations.

**Relevance of the topic:** GPS technology has gained widespread military and civilian use. Nowadays, GPS navigation is an integral component of many types of weaponry. At the same time, the GPS signal is very low-power, and the interference environment changes rapidly in the context of active operation of electronic warfare and electronic intelligence systems. This creates the necessity for designing compact jamming-resistant systems.

**The purpose of the study:** To develop a 3D model of a CRP antenna. To analyze its electromagnetic properties. To create a mathematical model for controlling the radiation pattern of the antenna array comparable in quality to the CST software application model.

**Object of the study:** 3D and mathematical model of the CRP antenna

**Subject of the study:** Development of the CRP antenna. Methods and algorithms for studying the CRP antenna

**Keywords:** CRP antenna, CRPA, GPS, antenna arrays, antenna design, study of electromagnetic properties

## ЗМІСТ

<b>ЗАВДАННЯ</b> .....	<b>2</b>
<b>АНОТАЦІЯ</b> .....	<b>4</b>
<b>ANNOTATION</b> .....	<b>5</b>
<b>ЗМІСТ</b> .....	<b>6</b>
<b>ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ</b> .....	<b>7</b>
<b>1. ВСТУП</b> .....	<b>8</b>
1.1. Принципи функціонування глобальної системи позиціонування GPS.....	8
1.2. Характеристика завад GPS систем.....	10
1.3. Порівняння FRPA та CRPA.....	11
1.4. Аналіз побудови CRPA системи GPS.....	12
1.5. Показники ефективності CRPA антени.....	13
<b>2. РОЗРОБКА 3D МОДЕЛІ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ АНАЛІЗ CRP АНТЕНИ</b>	<b>16</b>
2.1. Розробка елемента решітки.....	16
2.2. Аналіз моделі елемента решітки.....	21
2.3. Дизайн антенної решітки з 4х елементами.....	26
2.4. Аналіз моделі антенної решітки.....	27
<b>3. СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КЕРУВАННЯ ДІАГРАМОЮ СПРЯМОВАНOSTІ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ</b> .....	<b>32</b>
3.1. Обґрунтування математичної моделі.....	32
3.2. Огляд результатів моделювання Matlab. Порівняння з моделлю CST.....	36
3.2.1. Перевірка відтворення моделі елемента та решітки.....	36
3.2.2. Перевірка відтворення моделі елемента решітки з використанням вагових коефіцієнтів.....	39
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	<b>47</b>
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ</b> .....	<b>49</b>
<b>ДОДАТОК</b> .....	<b>51</b>

**ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ**

AR - axial ratio

CRP - controlled reception pattern

FRPA - fixed reception pattern antenna

GPS - global positioning system

VSWR - voltage standing wave ratio

AP - антенна решітка

ДС - діаграма спрямованості

КСХ - коефіцієнт стоячої хвилі

## 1. ВСТУП

### 1.1. Принципи функціонування глобальної системи позиціонування GPS

Система глобального позиціонування (Global Positioning System - GPS) стала незамінною у використанні мобільних телефонів, транспортних засобів, плавальних суден, авіації, мілітарного озброєння та ін. Технологія GPS набула великого поширення завдяки своїй можливості надавати інформацію про точне місце розташування, швидкість і час приймача сигналу

Існує 4 види GPS сигналів для цивільного використання (L1 C/A, L2C, L5 та L1C) [1]:

1. L1 C/A сигнал функціонує на несній частоті 1.575GHz, що модулюється двома псевдовипадковими (PRN) послідовностями C/A (Coarse/Acquisition) для цивільного використання з чіпрейтом 1.023MHz та P (precision) для обмеженого використання з чіпрейтом 10MHz, а також навігаційним повідомленням. Послідовності використовуються для визначення псевдовідстані. Навігаційні повідомлення включають інформацію про ефемериду - точне орбітальне положення та часову відмітку в системі GPS, інформацію про стан супутника та очікувану точність вимірювань. Також в повідомлення передається альмонах GPS системи - дані, які використовуються приймачем для визначення положення інших супутників.
2. L2C [2] сигнал функціонує на несній частоті 1.2276 GHz, що модулюється тільки P-послідовністю та навігаційним повідомленням. Його назва вказує на цивільне використання (C - civilian) і частоту роботи. Дводіапазонні приймачі з L1 C/A та L2C мають функцію іоносферичної корекції, яка підвищує точність роботи GPS. Цивільні користувачі з доступом до GPS дводіапазонних приймачів мають можливість отримувати якість на рівні з військовими користувачами.
3. L5 функціонує на частоті 1.176GHz, що входить до авіаційного навігаційного діапазону. Таке рішення було впроваджено для кращої завадостійкості для використання авіаційною спільнотою. L5 створює

можливості для радіонавігації достатньо надійної для використання у пристроях, що стосуються життєво важливих ситуацій, де якісна навігація є критичною. У порівнянні з L1 C/A та L2C має покращену структуру повідомлення підвищеної продуктивності, вищу потужність передачі (приблизно на 3 дБ), ширшу смугу пропускання

4. L1C транслюється на тій самій частоті, що і L1C/A (1575 MHz). Він буде транслюваний з GPS 3 та пізніших версій супутників. Складається з пілотного компонента і компонента даних.

Для розуміння взаємодії різних складових системи GPS, варто розглянути GPS сегменти та принципи їх функціонування. Система складається з трьох основних сегментів: космічного, керувального і користувацького.

Космічний сегмент [3] - це набір супутників, що формують сигнали, для розрахунку даних місцеположення об'єкта (широти, довготи та висоти) та поточного часу. До космічного сегменту входять 32 супутника, які знаходяться у середній навколосемній орбіті.

Контрольний сегмент [4] [5] включає в себе декілька груп об'єктів. Станція управління і контролю (Master Control Station) відповідає за безперебійну роботу груп супутників, використовує дані станцій моніторингу для розрахунку точних позицій супутників, забезпечує підтримку та усунення проблем в роботі супутників включаючи зміну їх положення і також резервне копіювання даних за допомогою альтернативної головної станції управління і контролю. 16 моніторингових станцій займаються збором даних: відстежують пересування супутників на шляху над станціями, отримують дані навігаційних сигналів та несної, інформацію про атмосферу і передають їх до станції управління. 11 наземних антен, які функціонують в S-діапазоні, надсилають команди, оновлені навігаційні дані та програмні дані для процесорів супутників, а також забезпечують збір телеметрії.

Користувацький сегмент [6] складається з користувачів GPS Високої Точності Позиціонування (GPS Precise Positioning Service) армії Сполучених

Штатів та союзників, а також цивільних користувачів Стандартної Позиційної Системи (Standard Positioning Service). Загалом, всі приймальні пристрої користувацького сегменту, складаються з антени, приймача для обробки прийнятої інформації та високоточного годинника.

## 1.2. Характеристика завад GPS систем

Постає важливість високої точності та надійності приймачів GPS сигналів, який передається з висоти 20 000 км, і є дуже слабким, він завжди існує нижче рівня шуму GPS приймальної системи. Через малу потужність сигналу (приблизно -130 дБм) [7], ефективність GPS приймачів суттєво страждає через присутність випадкових чи умисних завад.

Розглянемо головні джерела завад та методи їх впливу на GPS системи [8]. Зазвичай, завади можна класифікувати наступним чином:

1. Неперервні вузькосмугові завади створені, телевізійним сигналом, деякими всенапрямленими радіомаяками (VOR), системами посадки повітряних суден (ILS), осциляторами електричних пристроїв таких, як персональні комп'ютери чи мобільні телефони
2. Імпульсні вузькосмугові завади, створені вимірювальним обладнанням і тактичною системою аеронавігації (TACAN). В обох випадках системи випромінюють модульовані сигнали в діапазоні 962-1213 MHz, що включає смугу частот GPS L5. Або радарями, що вимірюють профіль вітру (WPR), які випромінюють у діапазоні 1270-1295 MHz, що є близько до смуги частот GPS L2C.
3. Завади “ковзаючі” по частоті - сигнали, які характеризуються вузькою смугою навколо центральної частоти, яка швидко змінюється. Зазвичай це гармоніки частотно-модульованих сигналів, які можуть бути створені радіо або телевізійними системами
4. Широкопсмугові завади, в цьому випадку визначені як сигнали, які займають більшість смуги корисного сигналу. Ці завади впливають на функціонування малощумних підсилювачів (LNA) та систему автоматичного врегулювання

підсилення (AGC) аналогової частини приймача, що в свою чергу має негативний вплив на системи визначення несучої частоти сигналу та PRN коду у приймачах. Таким чином враховані GPS системою параметри (псевдовідстань та фаза несучої), необхідні для її функціонування, передаються неточно або втрачаються повністю, повністю зриваючи роботу приймача.

5. Імпульсні імітуючі завади - сигнали, практично ідентичних до тих, що генеруються супутником, з метою підробки хибних повідомлень, або генерувати хибні синхронізаційні параметри, передаючи їх в місцях перебування одного або більше приймачів, таким чином впливаючи на розраховані ними локацію, швидкість та час (PVT). Ці техніки відомі як спуфінг (spoofing), коли формуються хибні дані, або міконінг (meaconing), коли частина достовірних GPS повідомлень коригується та використовуються повторно.

### 1.3. Порівняння FRPA та CRPA

Так як антенна є першим елементом приймальної системи та вона має великий вплив на працездатність всієї системи.

Загалом використовують антени з фіксованою діаграмою спрямованості FRPA (Fixed Radiation Pattern Antenna) [9]. Як зрозуміло з назви, їх головна характеристика полягає в неможливості контролювати свою діаграму спрямованості, що унеможлиблює ефективну роботу GPS системи при змінній завадовій обстановці. Тому мають бути застосовані додаткові засоби для захисту малопотужних GPS сигналів від сигналів завад. Ефективним способом підвищення надійності GPS приймачів вважається використання антенної решітки з  $M$  елементів, які функціонують як Controlled Reception Pattern Antenna (CRPA) - антена з контрольованою діаграмою спрямованості. CRPA можуть контролювати максимум ДС в заданому напрямку і формувати нулі в напрямках дії завади,

звідси назва - антена з контрольованою діаграмою прийому, або використовуючи більш точний термін - діаграмою спрямованості.

Ці моливності CRPA є головним чинником, який забезпечує завадозахищеність, що є необхідним в системах GPS.

#### 1.4. Аналіз побудови CRPA системи GPS

Рис 1. демонструє загальний опис CRPA системи. Вона складається з антенної решітки, CRPA блоку з аналоговою та цифровою частинами та GPS приймача. За контроль формування діаграми спрямованості антени відповідає CRPA блок. Значення відношення несучої до шуму CNR контролюється антенною решіткою та приймачем.

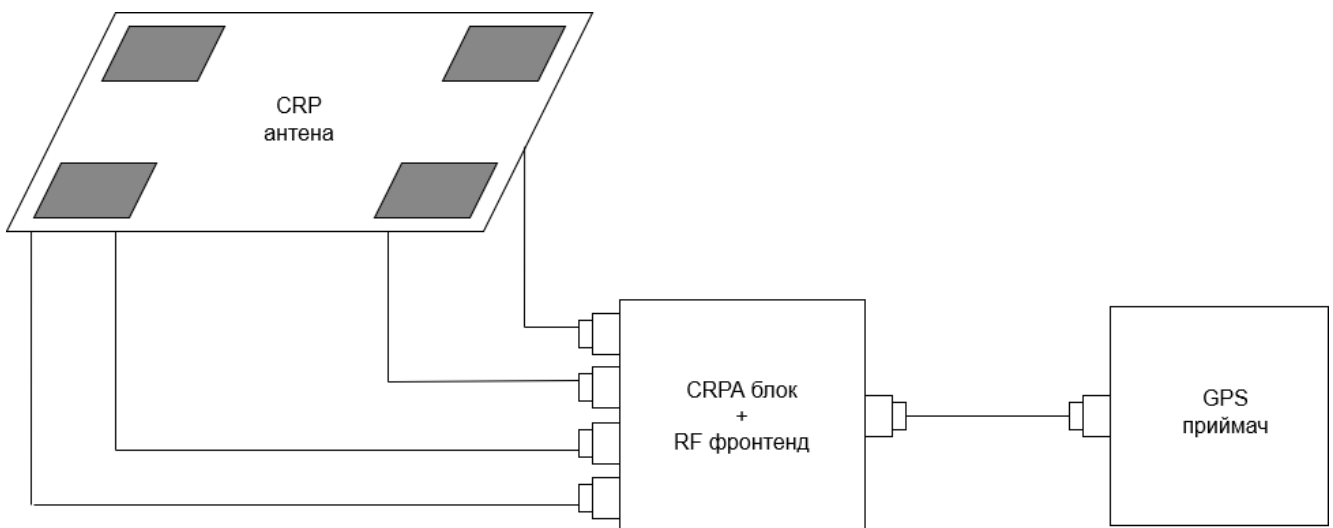


Рисунок 1.1. Схематичне зображення системи з використанням CRP антени

CRPA антени зазвичай можна розподілити на два види антенних решіток: CRPA з елементами однакового розміру різного просторового розміщення, та CRPA з одним “опорним елементом” (reference element), розташованим по центру платформи, та рештою додаткових елементів навколо нього. Центральний елемент при цьому передає GPS сигнал у приймач, а додаткові елементи відповідають за утворення нулів діаграми спрямованості в напрямку існування завади [7].

Серед можливих конфігурацій CRPA антен, в цій роботі буде розглянута саме планарна патчева антена з однаковими елементами. Планарні мікросмушкові

антенні решітки підходять для багатьох GPS застосувань. Зазвичай вони складаються з декількох елементів ( $<10$ ), всі з яких працюють в основному режимі з максимальним напрямком випромінювання спрямованим перпендикулярно до площі розміщення кожного елемента.

### 1.5. Показники ефективності CRPA антени

Для оцінки ефективності створеної моделі, маємо визначити головні параметри [10] роботи антенної решітки, які будуть розглянуті далі.

1. Діаграма спрямованості (radiation pattern) антени або діаграма випромінювання визначається як математична залежність або графічне представлення характеристик випромінювання як функції просторових координат з позиції спостерігача в дальній зоні. Характеристиками випромінювання, які можуть бути представлені за допомогою діаграми спрямованості, є густина потоку потужності, інтенсивність випромінювання, сила поля, напрямленість, фаза або поляризація. Діаграми випромінювання поділяють на діаграми поля та діаграми потужності. Діаграми поля відображають величину магнітного або електричного полів на лінійній шкалі як функцію просторових кутів. Діаграми потужності можуть відображати квадрат величини магнітного або електричного полів на лінійній або величину полів на логарифмічній шкалі в дБ
2. Рівень бічних пелюсток. Окремі області діаграми випромінювання, окреслені регіонами меншої інтенсивності випромінювання, називають пелюстками. Пелюстки поділяють на головну, бічні та задні. Головна пелюстка формується у напрямку максимального випромінювання. Бічні і задні пелюстки представляють випромінювання у небажаних напрямках і мають бути мінімізовані. В цьому контексті важливою характеристикою є рівень бічних пелюсток, який представляє відношення густини потужності зазначеної пелюстки до густини потужності головної пелюстки.

3. Ширина головної пелюстки (HPBW - half power beamwidth) - це величина кута між двома напрямками, в яких інтенсивність випромінювання складає половину від максимуму головної пелюстки. Ширина головної пелюстки є критичною для роздільної здатності антени, і як правило зі зменшенням ширини головної пелюстки підвищується рівень бокових пелюсток, що є небажаним.
4. Коефіцієнт спрямованої дії - це відношення щільності потоку енергії випромінювання антени в заданому напрямку до щільності потоку енергії випромінювання, усередненої за всіма напрямками, визначеної як загальна потужність випромінювання антени, поділена на  $4\pi$
5. Коефіцієнт підсилення антени (gain) - відношення щільності потоку енергії випромінювання в заданому напрямку до щільності потоку енергії, який був би зафіксований від ізотропної антени. Коефіцієнт підсилення - характеристика, яка враховує одночасно ефективність випромінювання та спрямовуючі характеристики антени  
Якщо напрямок не заданий, КСД та коефіцієнт підсилення визначаються за напрямком максимального випромінювання.
6. Робоча смуга частот (bandwidth) - діапазон частот, у якому характеристики роботи антени відповідають нормам і співставні з показниками на центральній частоті (1.575 GHz в ході даної роботи)
7. Поляризація - просторово-часова характеристика хвилі, яка вказує на орієнтацію векторів електричного поля  $E$  та магнітного поля  $H$  під час поширення хвилі. Поляризацію хвилі можна розглядати як порушення осьової симетрії відносно напрямку поширення хвилі, яка проявляється в тому, що величини напруженості електричного і магнітного полів хвилі в різних напрямках, які лежать в площинах, перпендикулярних напрямку поширення, виявляються різними. Порушення осьової симетрії в нашому випадку будуть обумовлені відсутністю осьової симетрії випромінювача - патча антени.

Тип поляризації визначається лінією, яку описує проекція кінця вектора  $E$  на площину, перпендикулярну напрямку поширення. Така лінія називається годографом. В нашому випадку скошеними краями патча створюється колова поляризація, годограф хвилі зазначеного типу поляризації - коло.

8. S-параметри - параметри розсіювання, які описують НВЧ-пристрій у термінах падаючих і відбитих хвиль, які поширюються у підключених до них лініях передач. S-параметри визначені для N-полюсника та представлені як елементи матриці, яка його описує. Для дизайну антенних систем найважливішим є параметр S11, який характеризує коефіцієнт відбиття хвилі від входу до НВЧ пристрою і дорівнює комплексній величині відбитої хвилі до комплексної величини падаючої. S11 також відомий як коефіцієнт відбиття і визначається як:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (1)$$

де  $Z_{in}$  - вхідний імпеданс антени;

$Z_0$  - характеристичний імпеданс лінії передач.

9. Коефіцієнт стоячої хвилі за напруженістю (voltage standing wave ratio) - відношення значень напруженості електричного поля у максимумі і мінімумі стоячої хвилі. КСХ також є показником узгодженості ліній передач. Ідеальним значенням є 1, що свідчить про встановлення режиму біжучої хвилі і повну передачу енергії.

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2)$$

## 2. РОЗРОБКА 3D МОДЕЛІ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ АНАЛІЗ CRP АНТЕНИ

### 2.1. Розробка елемента решітки

Існують різні види патчевих антен. За геометрією патча їх можна поділити на квадратні, прямокутні, круглі та еліпсоїдні. Вони можуть мати додаткові модифікації, такі як зрізані кути чи вирізані слоти в самому патчі, які впливають на характеристики всієї антени. В цій роботі будемо розглядати квадратну конфігурацію зі зрізаними кутами, що забезпечують кругову поляризацію. Кути патча антени обрізані під  $45^\circ$ , що забезпечує зсув за фазою  $90$  градусів між складовими  $E$  та  $H$  полів, завдяки чому формується саме колова поляризація. Співвідношення сторін  $AR$  при цьому прямує до  $1$  (на практиці розглядається значення  $AR$  до рівня  $8$  дБ). Ширина зрізу при цьому також впливає на поляризацію і підбирається з урахуванням заданої частоти [11].

Поляризація приймальної та передавальної антен системи мають співпадати, мати однакове співвідношення сторін (Axial Ratio) та просторову орієнтацію. Сигнали GPS систем мають праву колову поляризацію, звідки впливає необхідність проектування відповідної патчевої антени.

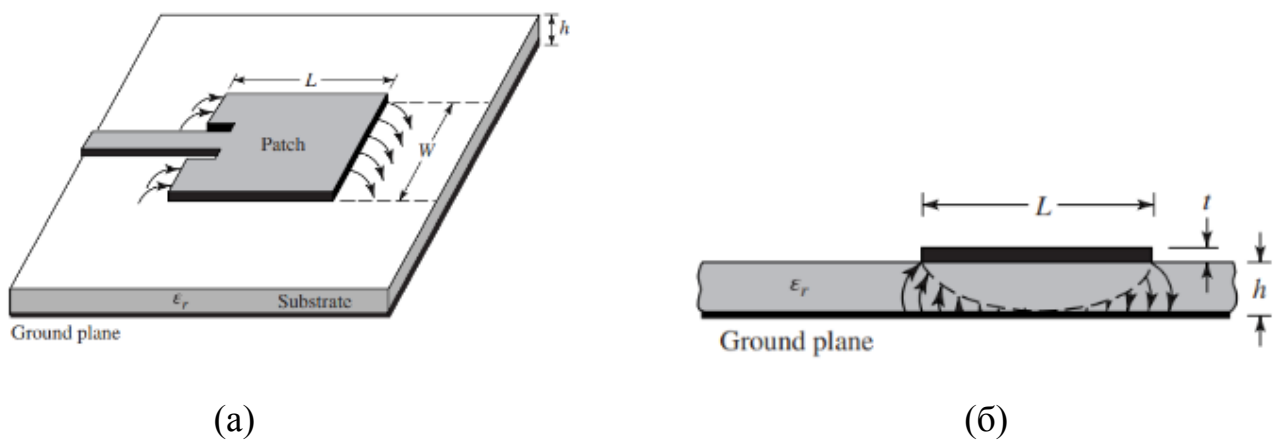


Рисунок 2.1. Параметри CRPA антени, розподіл  $E$  поля, (а) - вид згори, (б) - вид у розрізі

Мікросмуужкова патчева антенна складається з тонкого патчу провідникового матеріалу, розташованого на діелектричному субстраті трохи

більшої ширини і висоти  $h \ll \lambda_0$ , яка має бути сильно менша робочої довжини хвилі антени. Під субстратом розміщена пластина-земля.

Патчева антена може розглядатись як дві випромінюючі апертури шириною  $W_p$  та висотою  $h$ , розділені мікросмушковою лінією з малим імпедансом довжини  $L$ . При цьому схематичний розподіл векторів  $E$  поля можна бачити на рисунку 3. Стає очевидним, що випромінювання відбувається на торцях патчу антени.

В якості субстрату було обрано композитний матеріал на основі фторопласту та кераміки Rogers RT/duroid 6010 LM (товщина  $h = 1.9$  мм, коефіцієнт розсіювання  $\tan d = 0.0023$ , діелектрична проникність  $\epsilon_R = 10.7$ ).

Почнемо розробку моделі антенної решітки зі знаходження параметрів моделі одного елемента решітки - планарної патчевої мікросмушкової антени з коаксіальним фідерним трактом. Так як в цій роботі розглядається CRPA антена, всі елементи якої є однаковими, цю модель буде створено і відтворено  $N$  разів у складі решітки.

Патчева антена по суті є відкритим резонатором, і, як з будь-якою антенною такого виду, частота її роботи легко корегується зміною довжин граней резонатора - в даному випадку ширини, довжини і висоти патча (далі  $W$ ,  $L$ ,  $h$  відповідно).

Наведемо рівняння для знаходження параметрів патчевої антени, яка функціонує на обраній основній частоті  $f_0$  (fundamental mode) з можливістю переходу у інші діапазони [12]. Рисунок 2.2. демонструє схематичне зображення параметрів елемента решітки.

Спочатку розрахуємо ширину патчу, використовуючи задану діелектричну константу обраного субстрату та висоту патчу:

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_R + 1}{2}}} \quad (3)$$

де  $c$  - швидкість світла у вакуумі;

$f_0$  - робоча частота;

$\epsilon_R$  - діелектрична проникність.

Маючи ширину, можемо знайти значення ефективної діелектричної константи:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_R + 1}{2} + \frac{\epsilon_R - 1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left( \frac{h}{W} \right)}} \right] \quad (4)$$

де  $h$  - висота патча.

Тепер можемо розрахувати довжину патча:

$$L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0.824h \left( \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \right) \quad (5)$$

Вхідний опір є рівним співвідношенню електричного та магнітних полів навколо антени. В основному режимі розподіл полів на вході фідерного тракту практично сталий, і вхідний опір антени розраховується наступним чином:

$$Z_{in} = 90 \left( \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \right) \left( \frac{L}{W} \right)^2 \quad (6)$$

Визначимо ширину смуги пропускання. Для цього маємо вказати робочу частоту та довжину хвилі у вільному просторі:

$$BW = 3.77 f_0 \left( \frac{\epsilon_R - 1}{\epsilon_R^2} \right) \left( \frac{W \cdot h}{L \cdot \lambda} \right) \quad (7)$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі.

Наступним кроком маємо узгодити вхідний імпеданс антени і фідерного тракту. Для цього маємо обрати потрібну точку входу фідерного тракту, так як імпеданс антени змінюється з розташуванням на патчі антени. Для знаходження цієї точки визначимо імпеданс по краях патча. Найчастіше для імпедансу фідерного тракту обирається значення 50 Ом. Будемо спиратися на це значення опору для знаходження положення точки входу на патчі.

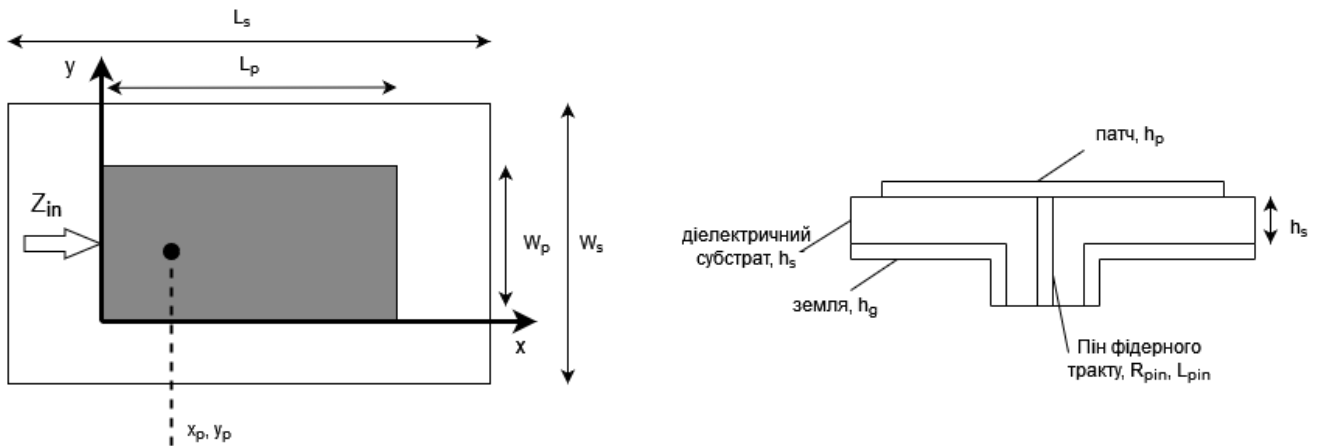


Рисунок 2.2. Параметри елемента решітки, (а) - вид згори, (б) - вид у розрізі

Проектуємо фідерний тракт патча. Популярним рішенням для цього є мікросмушкова лінія, яка заходить у патч на площині субстрату. У даній роботі в якості фідерного тракту буде використовуватись коаксіальний кабель, який заходить в антену з нижньої сторони. Для знаходження точної координати розташування фідерного тракту скористаємось формулою:

$$x_p = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \left( \sqrt{\frac{Z_p}{Z_A}} \right) \quad (8)$$

де  $Z_p$  - заданий імпеданс тракту 50 Ом;

$Z_A$  - розрахований раніше імпеданс антени.

Останнім кроком в дизайні елемента решітки буде визначення довжини зрізів під кутом 45 град по діагоналі патча, що забезпечить кругову поляризацію. Вона відбувається через вплив форми патчу на потік струмів у ньому. Параметри зрізу кутів були знайдені методом числової оптимізації - ширина зрізу була підібрана у відповідності до кращих характеристик головної пелюстки діаграми спрямованості патчевої антени.

Розраховані параметри моделі можна бачити у таблиці 1 та таблиці 2.

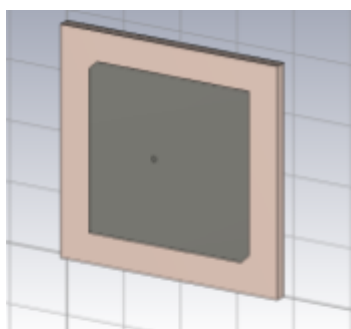
Зображення готової моделі елемента антенної решітки можна бачити на рисунку 2.3.

Таблиця 1 - Параметри елемента антенної решітки

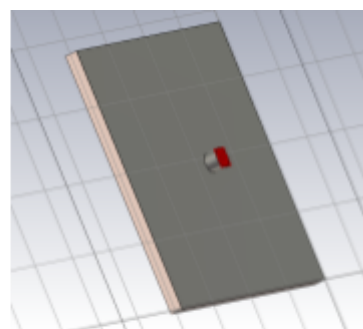
Висота субстрата, $h_s$	Висота патча, $h_p$	Ширина, довжина субстрат $a, W_s = L_s$	Ширина, довжина патча, $W_p = L_p$	Довжина зрізу кута патча, $W_{ch}$	Висота заземлення, $h_g$	Точка входу фідерного тракту $(x, y)$
1.9	0.0035	43.23	28.23	1.45	0.0035	(2.63, 0)

Таблиця 2 - Параметри коаксіального фідерного тракту:

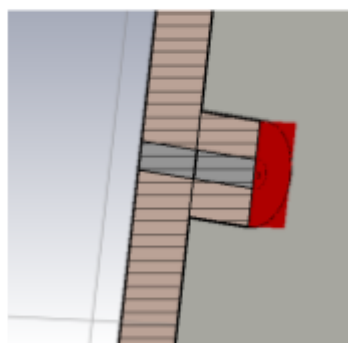
Радіус внутрішнього провідника (PEC), $R_{pin}$	Радіус діелектрика, $R_{coat}$	Радіус металевого провідника (PEC), $R_{cover}$	Довжина, $L_{pin}$
0.39	1.39	1.425	4



(а)



(б)



(в)

Рисунок 2.3. Модель елемента антенної решітки, (а) - вид спереду, (б) - вид ззаду, (в) - фідерний тракт у розрізі

## 2.2. Аналіз моделі елементу решітки

Проаналізуємо параметри моделі, розраховані програмним середовищем CST. Почнемо з S-параметрів.

З графічних даних можна зробити висновок про узгодження елементу антенної решітки та фідерного тракту на робочій частоті системи 1.575 GHz. Параметр S11, також відомий як коефіцієнт відбиття, характеризує потужність відбиту від навантаження (антенної решітки в даному випадку) назад у порт (фідерний тракт). На частоті 1.574 S11 сягає -13.5 дБ, що говорить про достатньо високий ступінь передачі енергії з фідерного тракту до елементу решітки і незначне відбиття енергії назад.

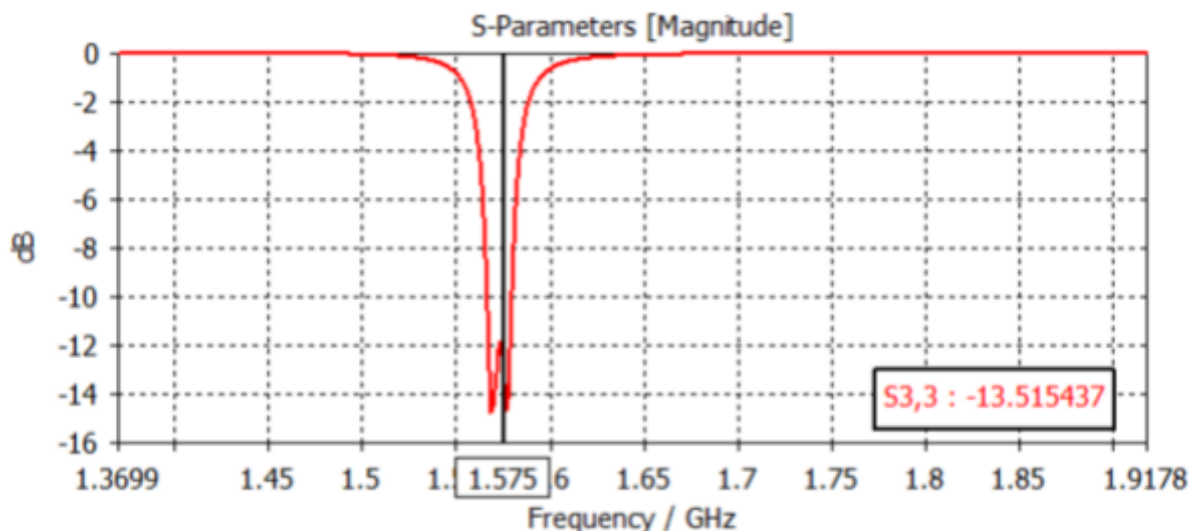


Рисунок 2.4. S-параметри елементу решітки, S11 на несній частоті 1.575 ГГц

Виходячи з умови узгодження елементу решітки і фідерного тракту визначимо смугу пропускання патча. На рисунку 2.5. у проміжку від 1.566 ГГц до 1.578 ГГц маємо узгодження на рівні -10 дБ, що складає смугу пропускання величиною 12 МГц (0.012 ГГц).

Іншим важливим параметром є коефіцієнт стоячої хвилі (VSWR - voltage standing wave ratio). Оптимальним вважається діапазон VSWR від 1 до 2. В ході моделювання було отримано значення 1.537 для робочої частоти 1.575 GHz, рисунок 2.5.

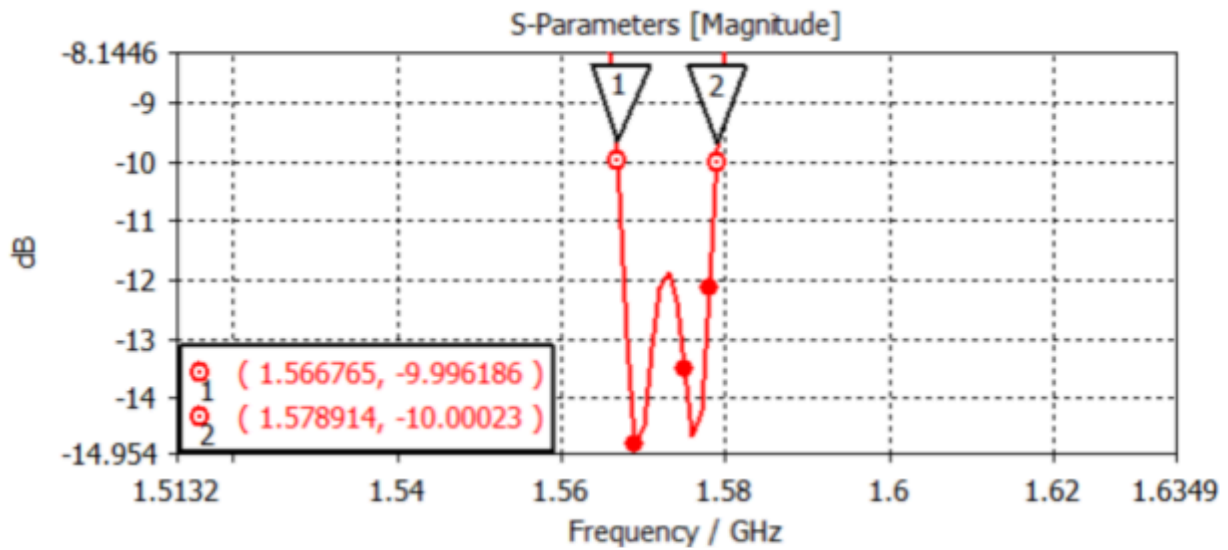


Рисунок 2.5. Параметр S11 елементу решітки, смуга пропускання елементу решітки по рівню -10 дБ

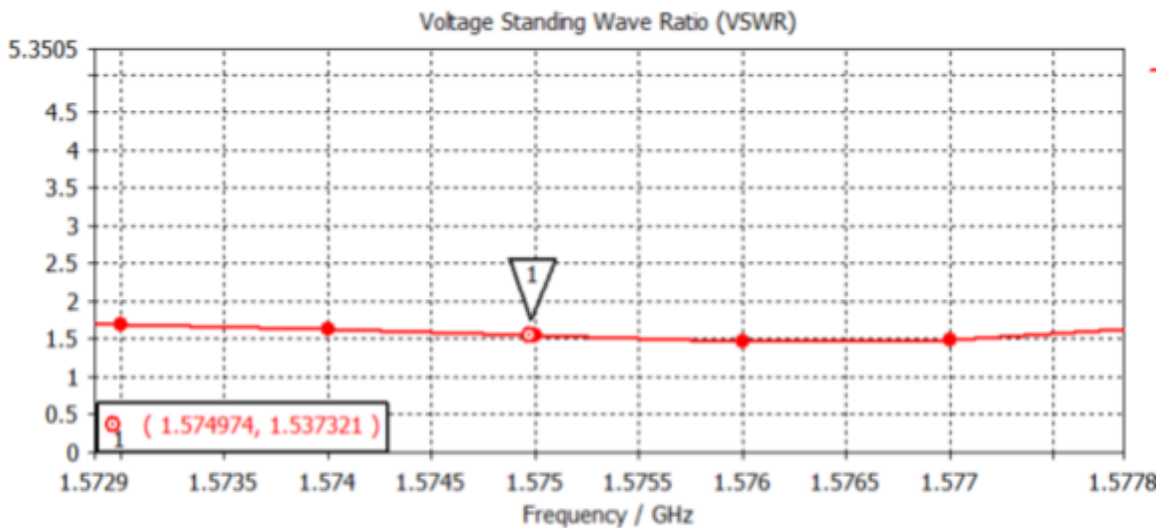


Рисунок 2.6. КСХ елементу решітки

Розглянемо змодельовану діаграми спрямованості в дальній зоні у сферичній та полярній системах координат.

Як можна бачити з рисунків 2.7 та 2.8, на робочій частоті 1.575 GHz отримуємо головну пелюстку шириною 117.5 град по рівню 3 дБ, а рівень задньої пелюстки складає -1.0 дБ. Коефіцієнт спрямованої дії складає 3.05 дБі

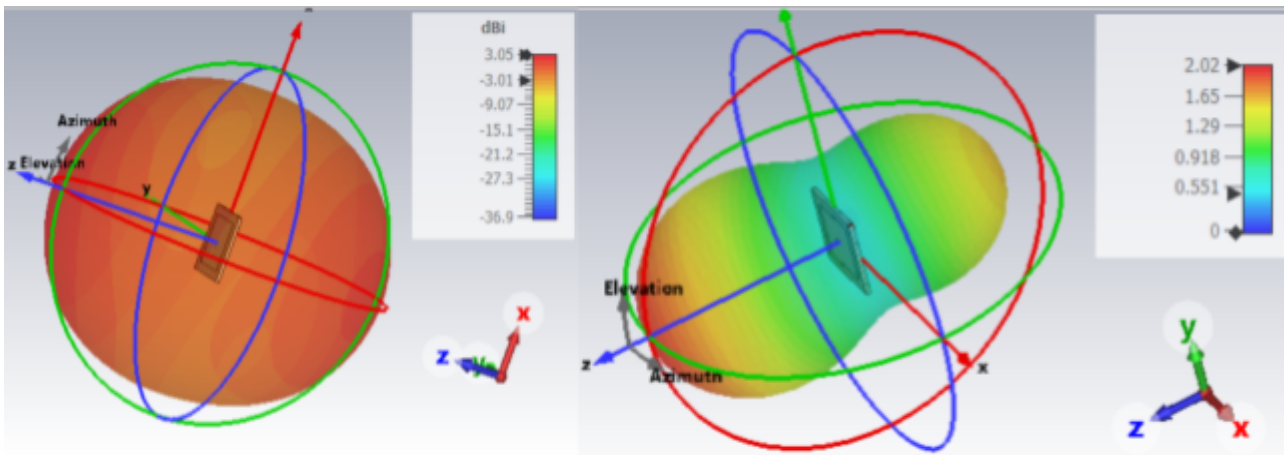


Рисунок 2.7. Сферична діаграма спрямованості антенної решітки, дБ та лінійне представлення

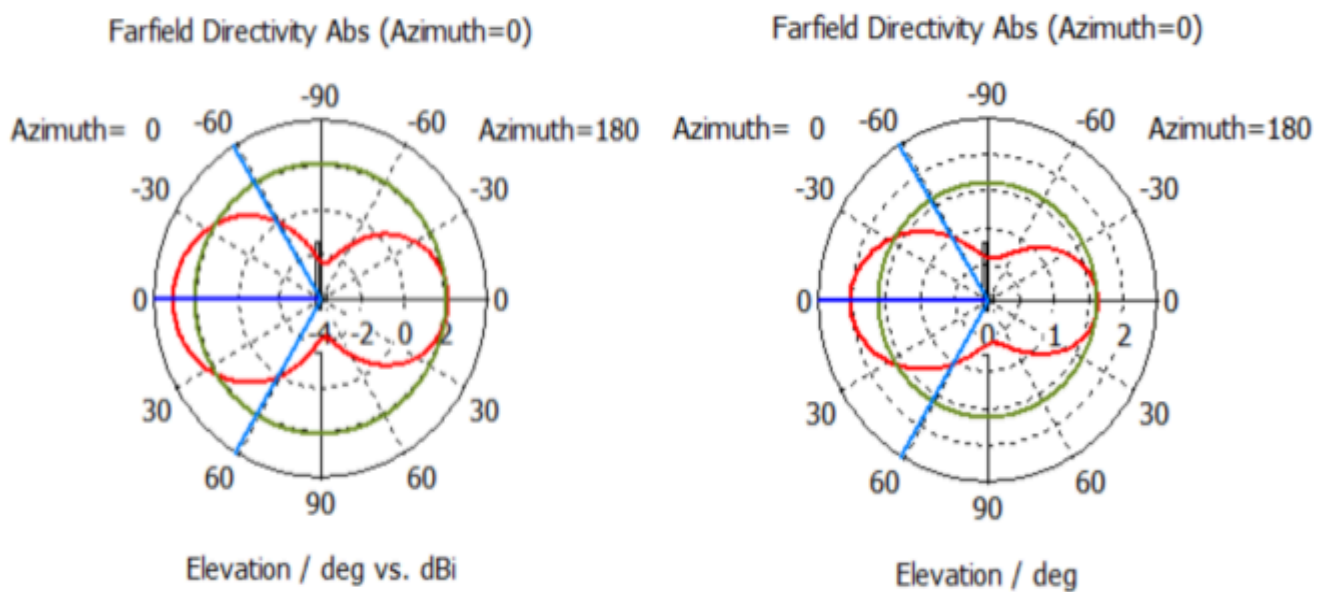
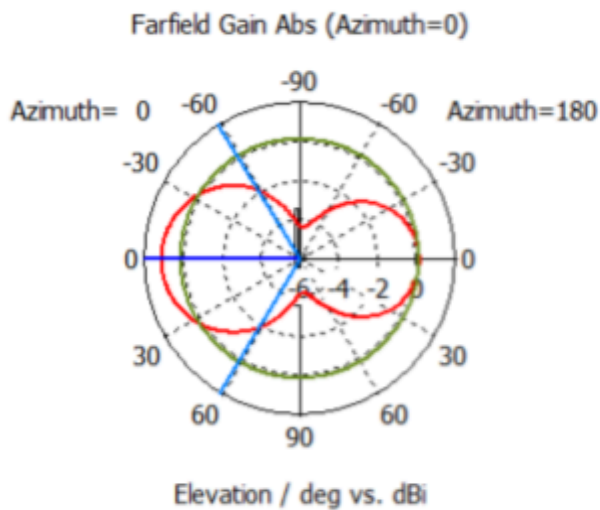
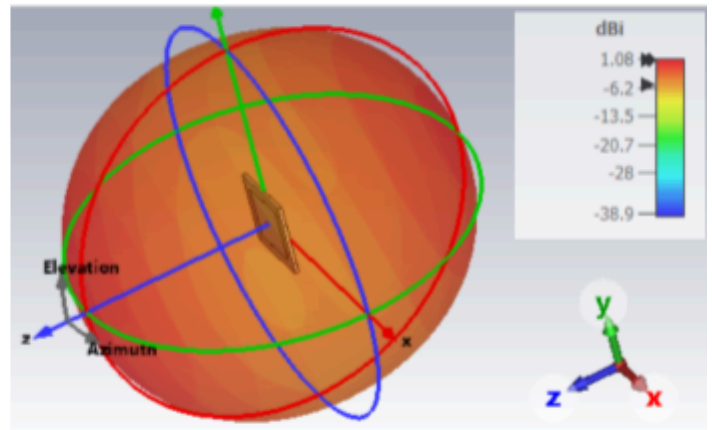


Рисунок 2.8. Планарна діаграма спрямованості елементу решітки, дБ та лінійне представлення

Розглянемо також коефіцієнт підсилення (gain) елементу антенної решітки. З результатів на рисунку 2.9. можна бачити, що коефіцієнт підсилення елементу решітки по максимуму головної пелюстки складає 3.05 dBi, ширина головної пелюстки 117.5 градусів, рівень бічних пелюсток -1 дБ



(a)



(б)

Рисунок 2.9. Коефіцієнт підсилення елементу решітки, (а) - планарна діаграма спрямованості, (б) - сферична діаграма спрямованості

Перевіримо поляризаційні властивості змодельованої антени. Як зазначалося раніше, дана антенна решітка має праву кругову поляризацію, що можна зрозуміти за графічними результатами - діаграмою випромінення, залежністю AR від просторових кутів та частоти:

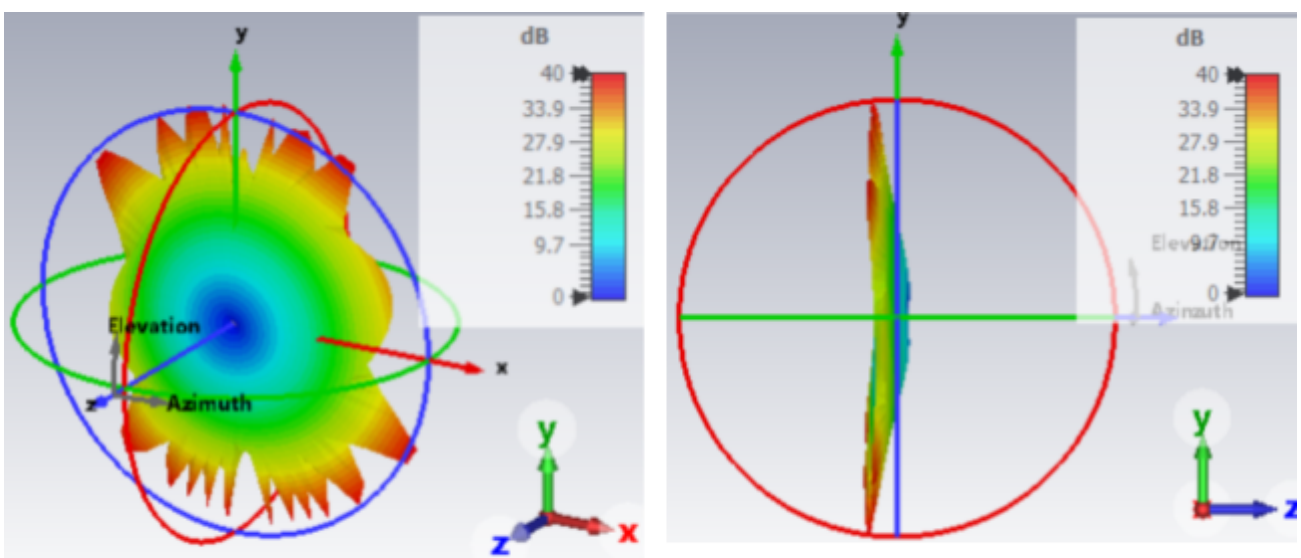


Рисунок 2.10. Axial Ratio елементу антенної решітки

Можна бачити, що AR складає 0.54 дБ, що свідчить про праву еліптичну поляризацію. Додатне значення AR вказує на саме праву поляризацію. Діапазон AR, що вказує на кругову поляризацію, включає значення від 0 до 3 дБ.

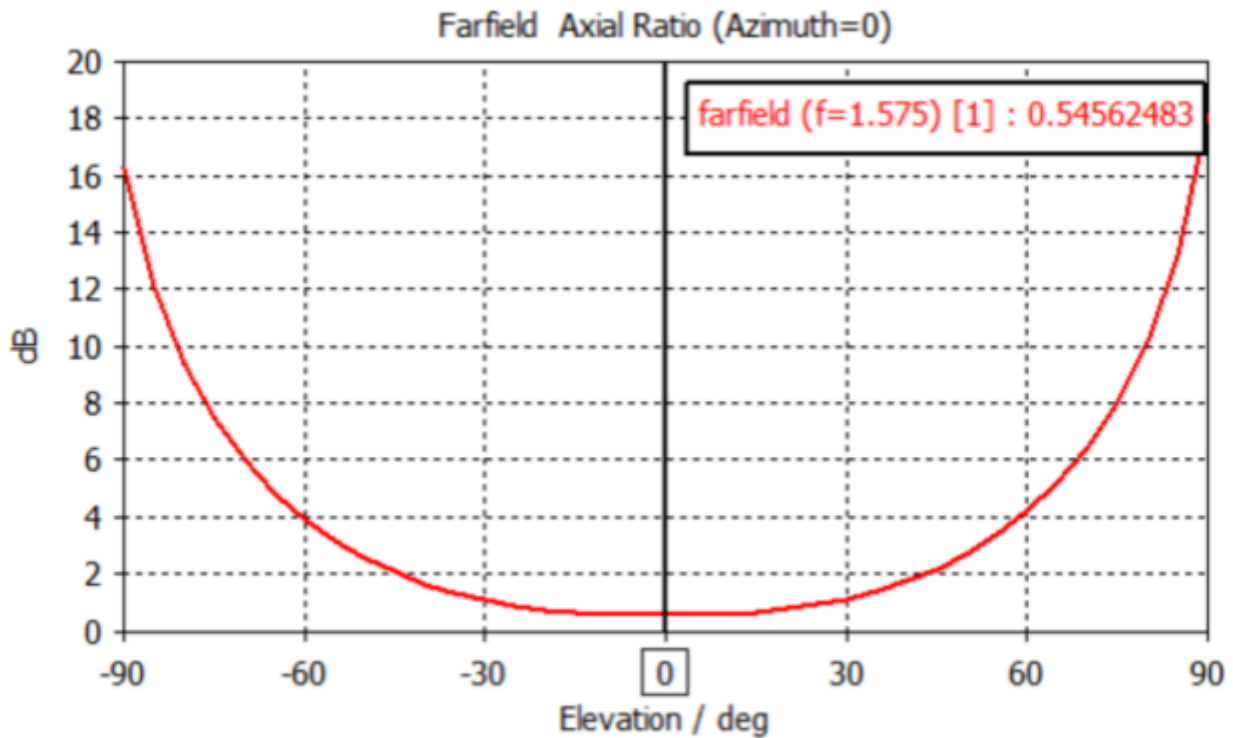


Рисунок 2.11. Axial ratio елементу решітки, залежність від частоти

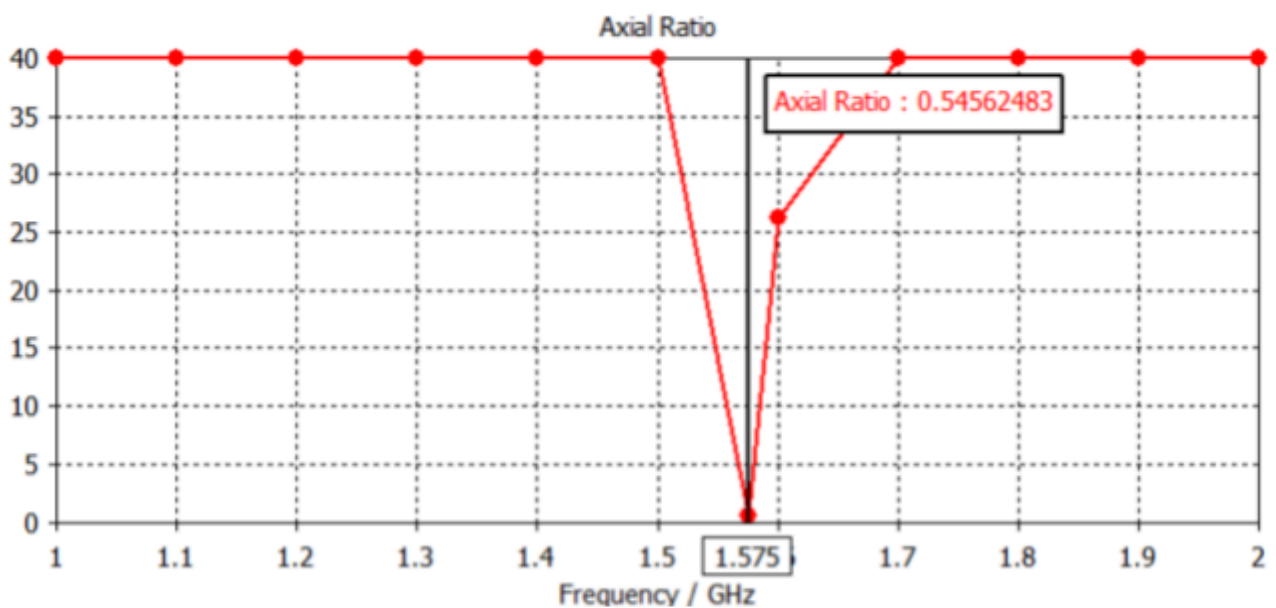


Рисунок 2.12. Axial ratio елементу решітки, просторова залежність

### 2.3. Дизайн антенної решітки з 4х елементів

Коли модель одного елементу було створено і можна бачити, що вона функціонує належним чином, складемо з елементів просту модель решітки 2x2. Така кількість елементів на субстраті є найменшою можливою, яка дозволить в подальшому керувати діаграмою в азимутальній та кутомісній площинах, на відміну від решітки з двох елементів. Відстань між центрами патчів попарно

складає половину довжини хвилі  $d = \frac{\lambda}{2}$ . (менше відстань - розширення голов пелюстки). За меншої відстані взаємний вплив елементів решітки призводить до розширення головної пелюстки, збільшення відстані призводить до появи небажаних бокових пелюсток та зменшує головну пелюстку діаграми спрямованості.

У таблиці 3 наведено параметри моделі антенної решітки. На рисунку 2.13. можна бачити зображення моделі решітки.

Таблиця 3 - Параметри антенної решітки

Висота субстрата, $h_s$	Висота патча, $h_p$	Ширина субстрата, довжина субстрата, $W_s = L_s$	Ширина, довжина патча, $W_p = L_p$	Довжина зрізу кута патча, $W_{ch}$	Висота заземлення, $h_g$	Відстань між центрами патчів, $d$
1.9	0.0035	133.347	28.23	1.45	0.0035	95,147

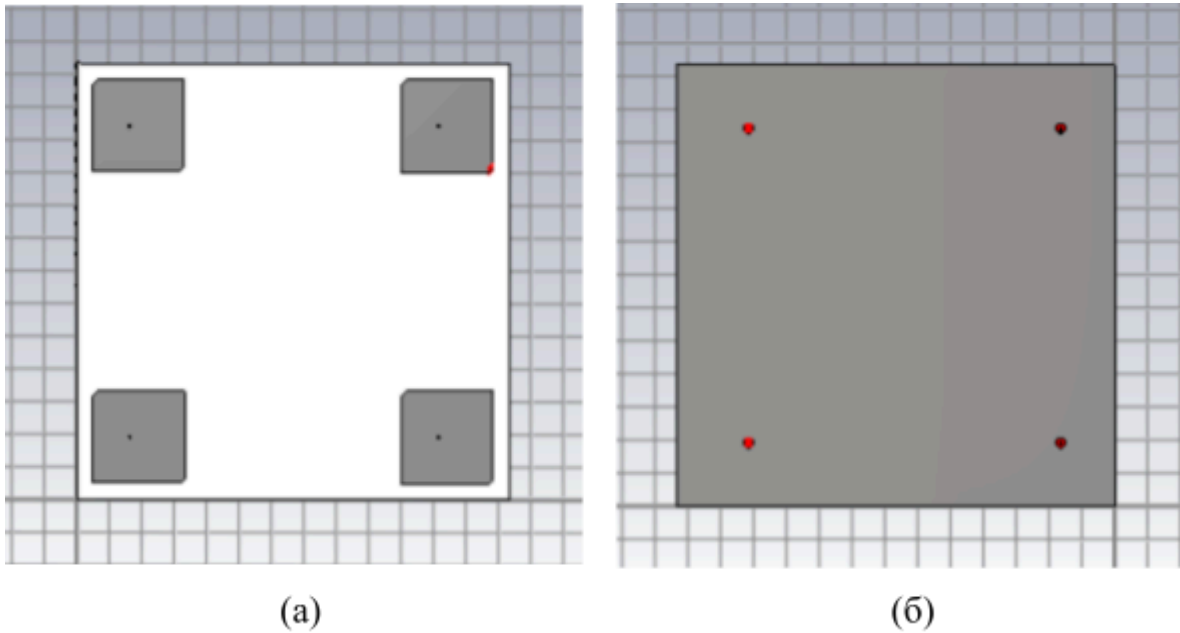
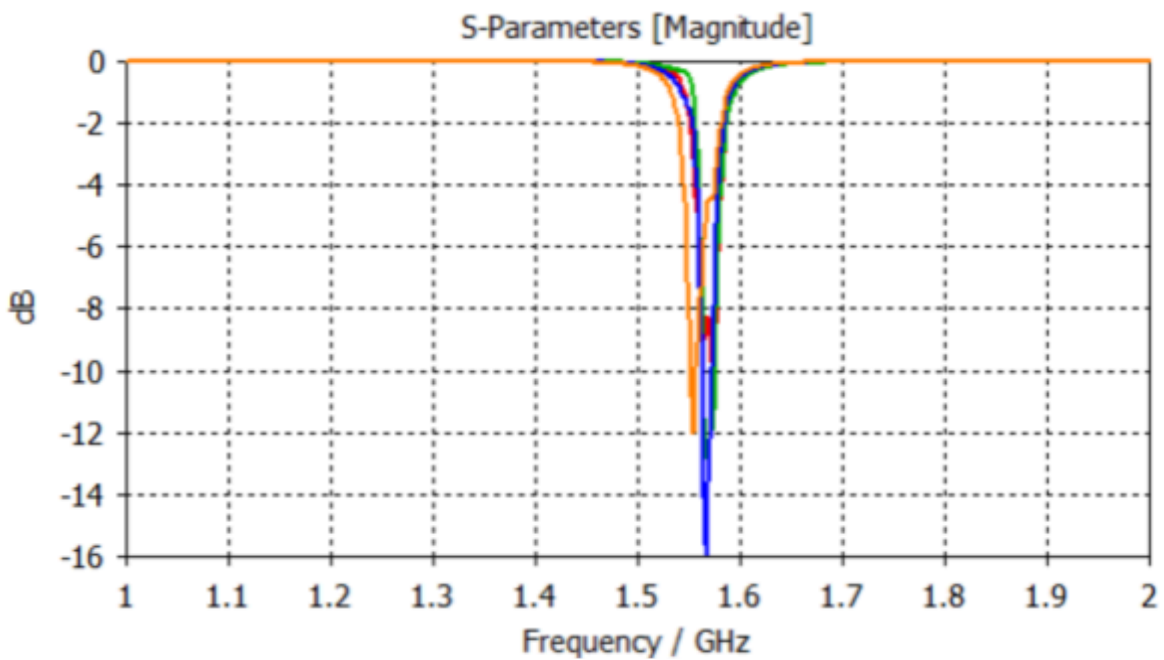


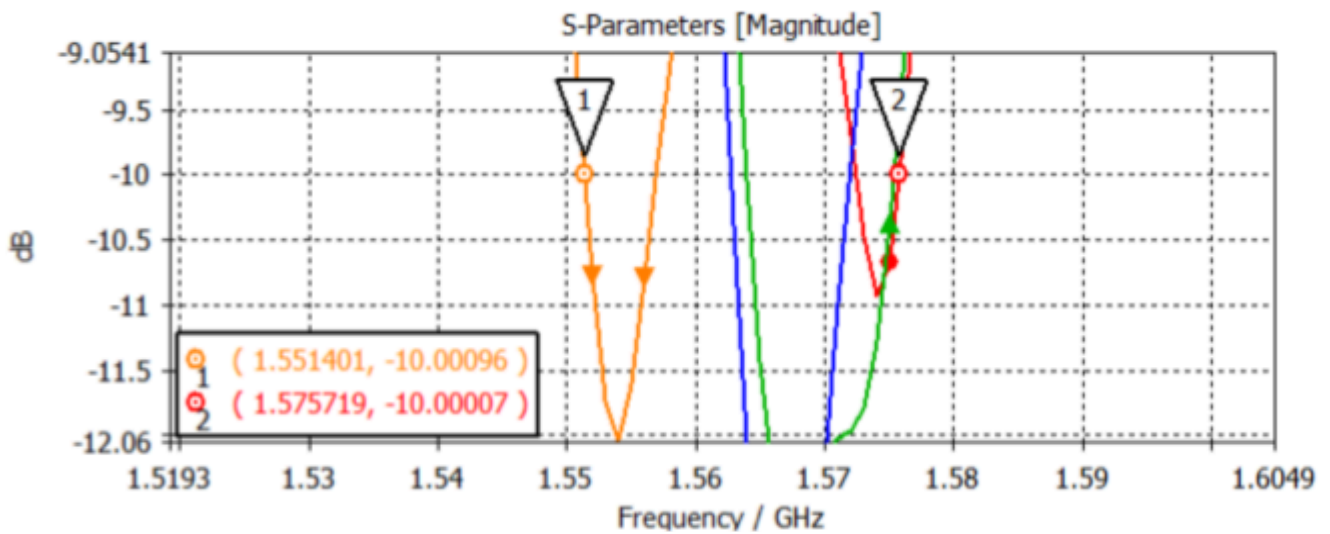
Рисунок 2.13. 3D модель антенної решітки, (а) - вид спереду, (б) - вид ззаду

#### 2.4. Аналіз моделі антенної решітки

Розглянемо модель антенної решітки при одночасному збудженні портів. При цьому отримуємо розрахунок залежних від частоти елементів матриці розсіювання - S параметрів.



(а)



(б)

Рисунок 2.14. Група S-параметрів антенної решітки, (а) - S-параметри в околі несної частоти, (б) - смуга пропускання антенної решітки по рівню -10 дБ

На рисунку 2.13 на частоті 1.574 параметр  $S_{11}$  сягає рівня -10.93 дБ, що говорить про достатньо високий ступінь передачі енергії з фідерного тракту до елементу решітки і незначне відбиття енергії назад. Параметри  $S_{i1}$ ,  $i = 2,3,4$  є коефіцієнтами передачі, які показують потужність передану з порта 1 до портів 2,3,4 відповідно. В околі робочої частоти можна спостерігати значення  $S_{21} = -12.8$  дБ,  $S_{31} = -15.93$  дБ та  $S_{41} = -12.02$  дБ, що свідчать про дуже невеликий рівень передачі потужності з порта 1 (фідерного тракту 1) на патчі портів 2, 3 і 4 відповідно. Вважатимемо за прийнятний рівень відбиття даної системи значення -10 дБ.

Виходячи з умови узгодження елементу решітки і фідерного тракту визначемо смугу пропускання патча на рисунку 2.14. В проміжку від 1.551 ГГц до 1.575 ГГц маємо узгодження на рівні -10 дБ, що складає смугу пропускання величиною 24 МГц (0.024 ГГц). При цьому варто зазначити, що верхня межа смуги пропускання співпадає з робочою частотою 1.575 ГГц, що є недоліком системи і потребує покращення.

Розглянемо змодельовані діаграми спрямованості для дальньої зони опромінення у сферичній і полярній системі координат:

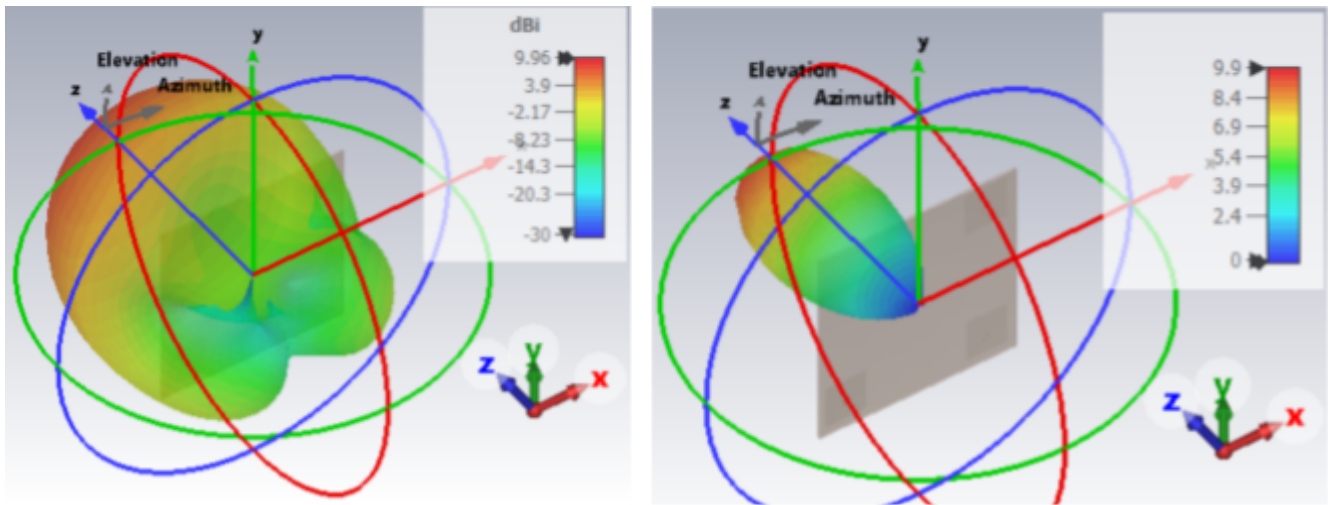


Рисунок 2.15. Діаграма спрямованості антенної решітки, дБ та лінійне представлення

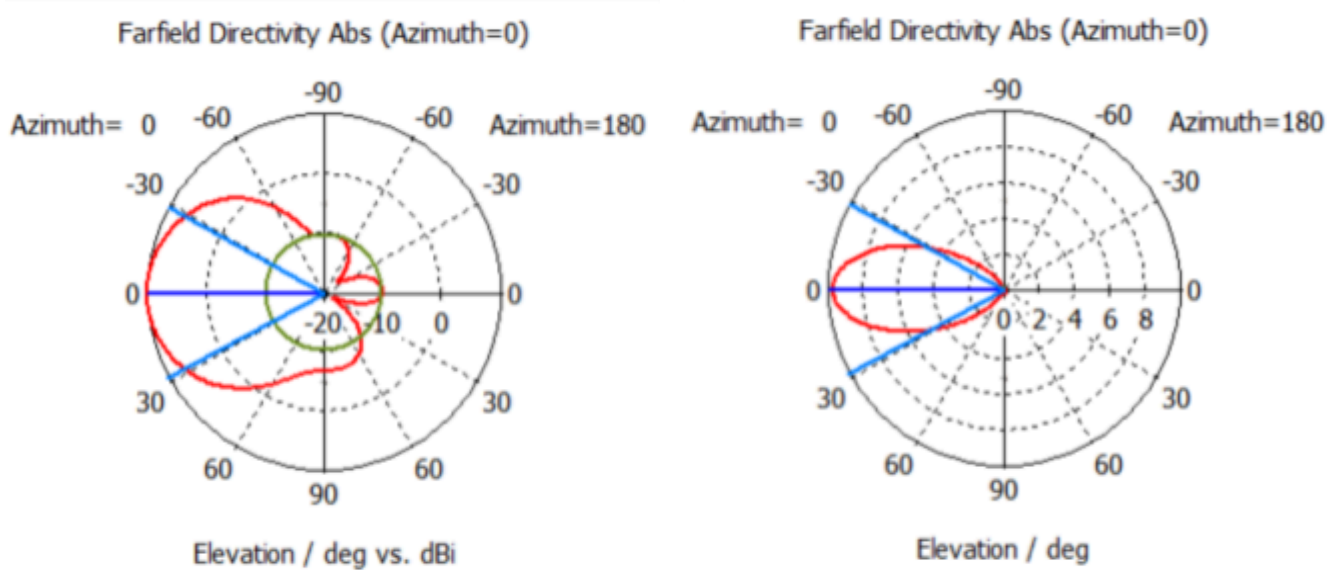


Рисунок 2.16. Планарна діаграма спрямованості антенної решітки, дБ та лінійне представлення

Як бачимо, на робочій частоті 1.575 GHz отримуємо головну пелюстку шириною 56.8 градусів, а рівень бічних пелюсток складає -20 дБ. Величина головної пелюстки складає 9.85 дБі.

Розглянемо також коефіцієнт підсилення (gain) антенної решітки:

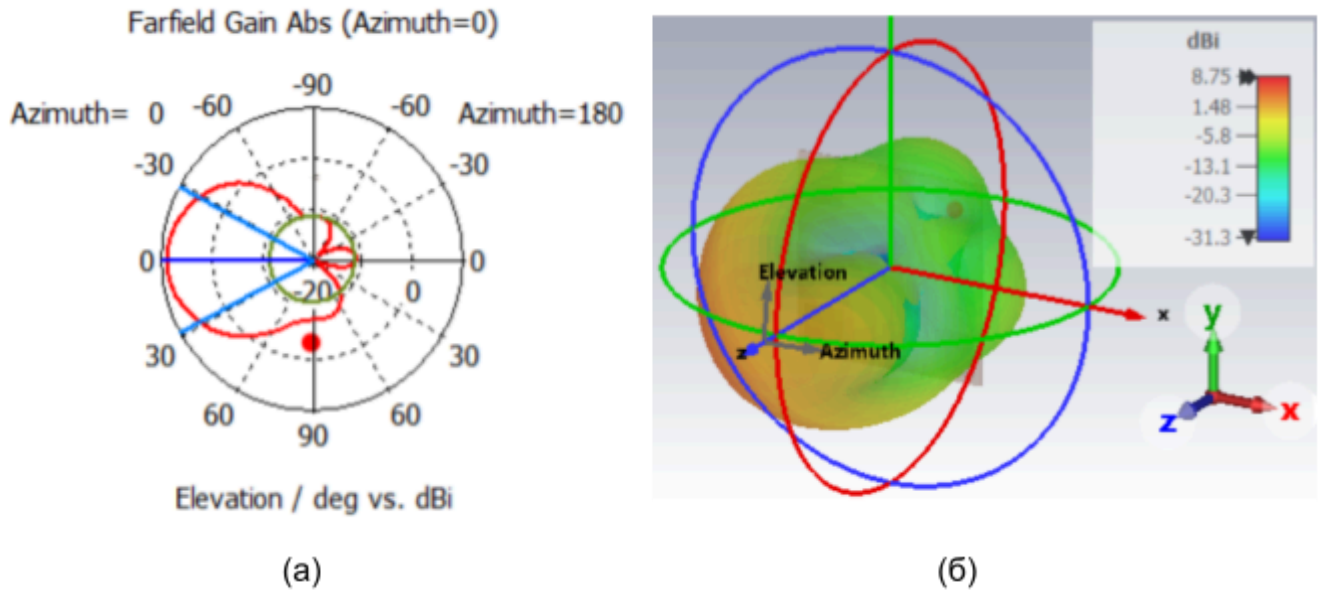


Рисунок 2.17. Коефіцієнт підсилення антенної решітки, (а) - планарна діаграма спрямованості, (б) - сферична діаграма спрямованості

З результатів можна бачити, що коефіцієнт підсилення антенної решітки по максимуму головної пелюстки складає 8.75 dBi, ширина головної пелюстки 56.8 градусів, рівень бічних пелюсток -20 дБ.

Перевіримо поляризаційні властивості змодельованої антени. Як зазначалося раніше, дана антенна решітка має праву кругову поляризацію, що можна спостерігати за результатами графіка - значення співвідношення сторін AR складає 7.708 дБ, що утворює не ідеальний годограф кола, але має достатньо близьку до кола еліптичну форму. AR є додатнім, що вказує на правий тип колової поляризації.

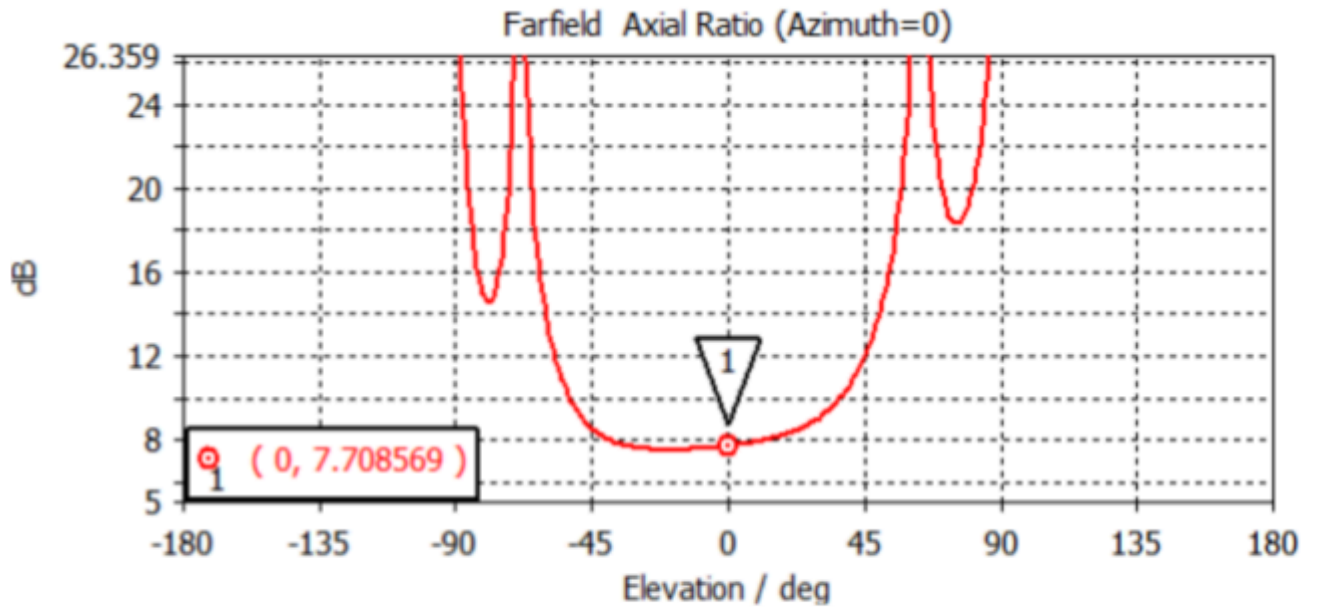


Рисунок 2.18. Axial ratio антенної решітки, просторова залежність

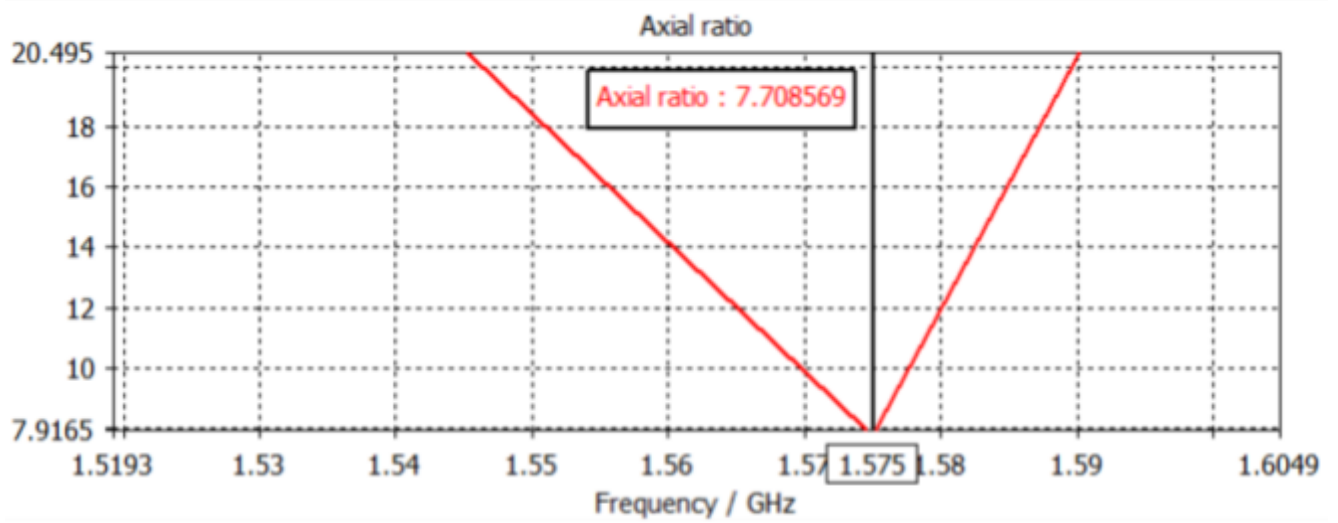


Рисунок 2.19. Axial ratio антенної решітки, частотна залежність

### 3. СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КЕРУВАННЯ ДІАГРАМОЮ СПРЯМОВАНOSTІ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

#### 3.1. Обґрунтування математичної моделі

Так само як масив передаючих елементів має діаграму випромінювання, масив приймальних елементів має діаграму відгуку, яка описується як вхідна напруга масива елементів, яка залежить від зміни напрямку приходу плоскої хвилі. Для масива однакових елементів вихідна енергія визначається адитивно - як сума окремих елементів [140] (Цей і подальші вирази наводяться у сферичній системі координат, де  $Az$ ,  $El$  - азимутальний та зенітний кути відповідно,  $r$  - відстань до початку координат):

$$E(Az, El, r) = A \sum_{m=0}^{M-1} f(Az, El) \frac{e^{-ikr_m}}{r_m} \quad (9)$$

$$r_m = r - \rho_m a_v(Az, El) \quad (10)$$

де  $r_m$  - відстань від  $m$ -того елементу у точці спостереження поля;

$M$  - кількість елементів решітки;

$A$  - задана амплітуда;

$k$  - хвильове число (просторова частота), рівне  $2\pi / \lambda$  ;

$\lambda$  - довжина хвилі;

$\rho_m$  - векторні позиції елементів у решітці;

$a_v$  - одиничний вектор, що вказує напрям від центру антенної решітки до точки спостереження поля:

$$\rho_m = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix}, \quad a_v(Az, El) = \begin{bmatrix} \cos(Az) \cos(El) \\ \sin(Az) \cos(El) \\ \sin(El) \end{bmatrix} \quad (11)$$

де  $x_m, y_m, z_m$  - координати за осями  $x, y, z$  відповідно.

Звідси виведемо рівняння напруженості поля для дальньої зони, тобто за умови  $r \gg \lambda^2 / L$ , де  $L$  - найбільший розмір джерела випромінювання:

$$E(Az, El, r) = A \frac{e^{-ikr}}{r} \sum_{m=0}^{M-1} f(Az, El) e^{ika_v \rho_m} \quad (12)$$

Запишемо діаграму спрямованості антенної решітки по полю, тобто покажемо залежність випромінювання від азимутального та зенітного кутів. Також врахуємо, що елементи решітки ідентичні:

$$E(Az, El) = Af(Az, El) \sum_{i=1}^N e^{-ik\rho_i a_v(Az, El)} = Af(Az, El) F_{array}(Az, El) = E_e(Az, El) F_{array}(Az, El) \quad (13)$$

де  $E_e(\theta_\gamma, \theta_z)$  – діаграма поля елемента;

$F_{array}(\theta_\gamma, \theta_z)$  – коефіцієнт антенної решітки.

Добуток одиничного вектора  $a$  та вектора позицій елементів  $\rho_m$  можна виразити у скалярному вигляді через азимутальний та зенітний кути:

$$a_v \rho_m = a_v(Az, El) \rho_m = \cos(Az) \cos(El) x_m + \cos(Az) \sin(El) y_m + \sin(El) z_m \quad (14)$$

Особливістю антенної решітки є можливість сканування простору, тобто в поширенні або прийомі хвиль в довільному напрямку. Ця досягається шляхом фазування елементів решітки. Для фазування елементів в коефіцієнт антенної решітки вводиться множник напрямку приймання та випромінювання хвиль  $sv_0$ :

$$sv_{0m} = e^{ika_v(Az_0, El_0)\rho_m} = e^{ika_v\rho_m} \quad (15)$$

де  $a_0$  - одиничний вектор прийому та поширення хвиль у заданому напрямку

$Az_0$  - азимутальний кут напрямку;

$El_0$  - зенітний кут напрямку;

Звідси коефіцієнт антенної решітки:

$$F_{array}(Az, El) = \sum_{m=0}^{M-1} e^{-ik(a_v - a_0)\rho_m} = \sum_{m=0}^{M-1} e^{-ika_v\rho_m} e^{-ika_0\rho_m} \quad (16)$$

Для того щоб максимально збільшити потужність роботи решітки у визначеному напрямку, або щоб максимізувати відгук решітки для конкретного напрямку, з якого приходить хвиля, вводяться комплексні вагові коефіцієнти:

$$\dot{w}_m = |w_m| e^{i\varphi_m} \quad (17)$$

де  $|w_m|$  – амплітуда м-того елементу;

$\varphi_m$  – фаза м-того елементу.

Тоді коефіцієнт антенної решітки приймає вигляд:

$$F_{array}(Az, El) = \sum_{m=0}^{M-1} |w_m| e^{i\varphi_m} e^{-ik(a_v - a_0)\rho_m} = \sum_{m=0}^{M-1} |w_m| e^{i\varphi_m} e^{-ika_v\rho_m} e^{ika_0\rho_m} \quad (18)$$

Нарешті, введемо вираз діаграми спрямованості антенної решітки за потужністю випромінювання. Він визначається як кутовий розподіл потужності випромінювання поля  $Urad(Az, El)$ . Фізично потужність випромінювання електромагнітного поля, створеного антенною решіткою, визначається як:

$$U_{rad}(Az, El) = \frac{r^2}{2Z_0} |E(Az, El, r)|^2 = \frac{1}{2Z_0} |E(Az, El)|^2 \quad (19)$$

де  $Z_0$  - хвильовий опір вільного простору.

Звідси діаграма антенної решітки за потужністю:

$$U(Az, El) = |E(Az, El)|^2 = |E_e(Az, El) F_{array}(Az, El)|^2 \quad (20)$$

Тепер введемо направленість. Направленість масива визначається так само, як направленість елемента - потужність випромінювання в заданому напрямку поділена на потужність ізотропного випромінювання. З точки зору масивів коефіцієнтів на спрямовуючих векторів, направленість може бути записана у вигляді:

$$D(Az, El) = 4\pi \frac{|E(Az, El)|^2}{P_{total}} = 4\pi \frac{|E_e(Az, El) F_{array}(Az, El)|^2}{P_{total}} \quad (21)$$

де  $P_{total}$  - загальна спільна потужність випромінювання масива елементів.

Тоді направленість у інтегральній формі:

$$D(Az, El) = 4\pi \frac{|E(Az, El)|^2}{\int |E(Az, El)|^2 \cos(El) dAz dEl} \quad (22)$$

І в дискретній:

$$P_{total} = \frac{2\pi^2}{MN} \sum_m^{M-1} \sum_n^{N-1} |E(Az_m, El_n)|^2 \cos(El_n) \quad (23)$$

Таким чином кінцевий вираз направленості антенної решітки:

$$D(Az, El) = \frac{2MN |E(Az, El)|^2}{\pi \sum_m^{M-1} \sum_n^{N-1} |E(Az_m, El_n)|^2 \cdot \cos(El_n)} \quad (24)$$

### 3.2. Огляд результатів моделювання Matlab. Порівняння з моделлю CST

#### 3.2.1. Перевірка відтворення моделі елементу та решітки

В першу чергу перевіримо механізм зчитування і відтворення даних для E поля елементу решітки, так як саме ці значення будуть використовуватись для подальших розрахунків. Імпортуємо відповідні дані з CST та відображаємо графічно:

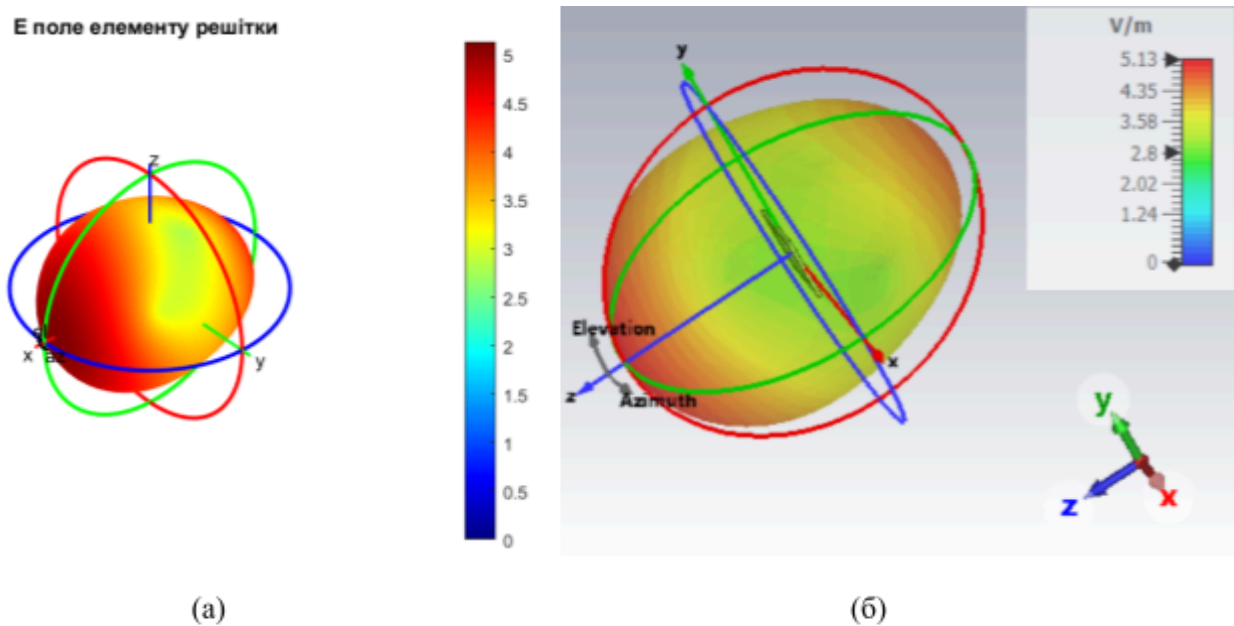
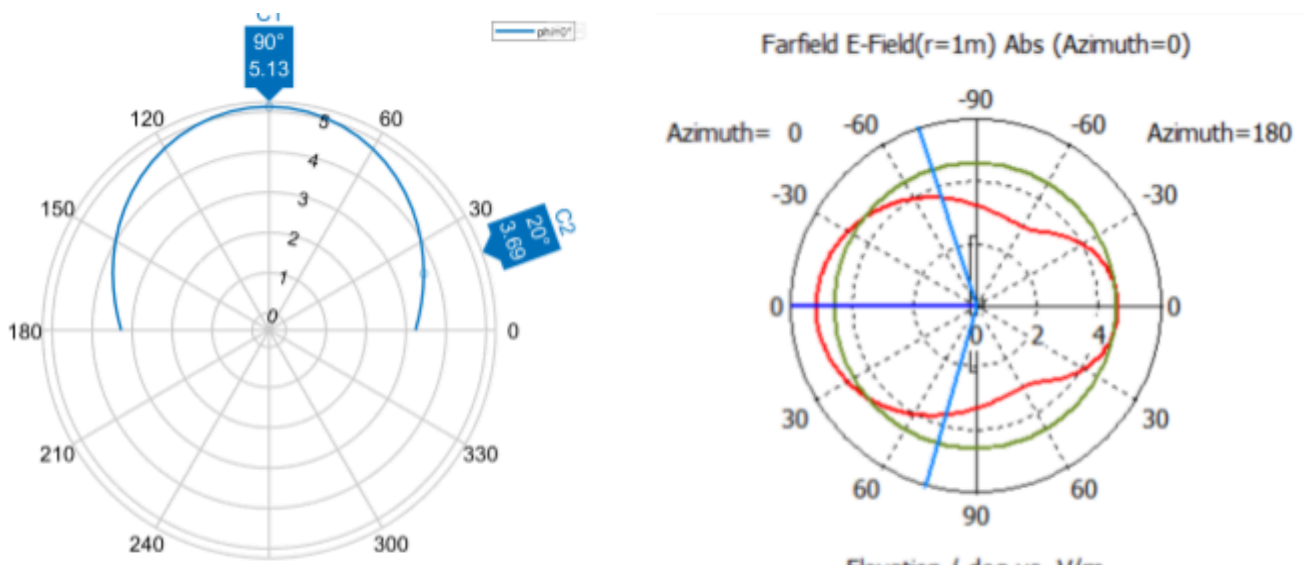


Рисунок 3.1. Порівняння діаграми E поля елементу решітки, лінійне представлення, (а) - математична модель, (б) - модель CST



За результатами можна бачити, що дані відображаються коректно і можуть бути використані для подальших розрахунків. Максимум  $E$  поля в моделі, отриманій за допомогою CST, відповідає максимуму моделі, відображеній у Matlab, і складає  $5.13 \text{ V/m}$ , ширина головної пелюстки складає  $140$  градусів.

Ознайомимось з розрахованим графічним представленням фактору решітки, яке грає вирішальну роль у створенні моделі:

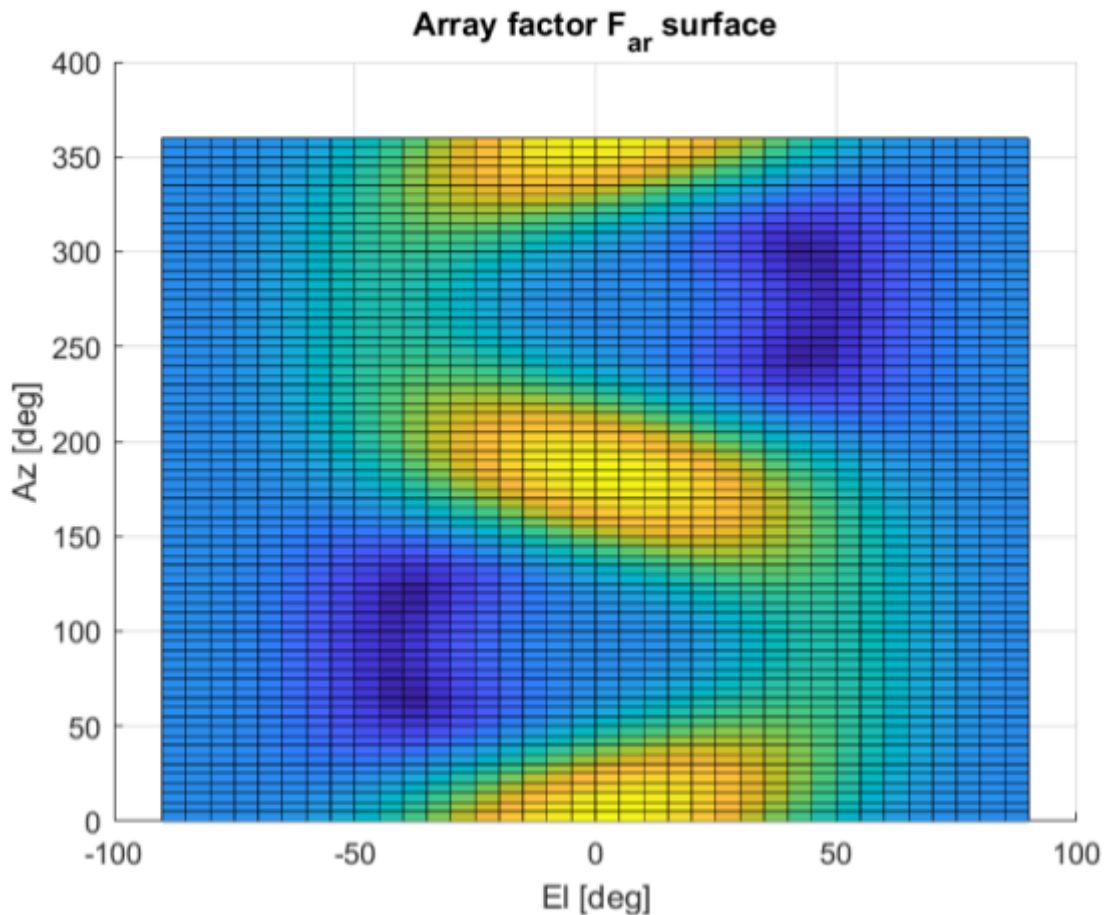


Рисунок 3.3. Отриманий фактор решітки

Перейдемо до розрахованої моделі діаграми спрямованості, сформованої як добуток  $E$  поля антенної решітки на вираз фактору решітки. Порівняємо отриману математичну модель з результатом електромагнітної симуляції в середовищі CST, відповідні дані занесемо в таблицю 4:

Діаграма спрямованості антенної решітки

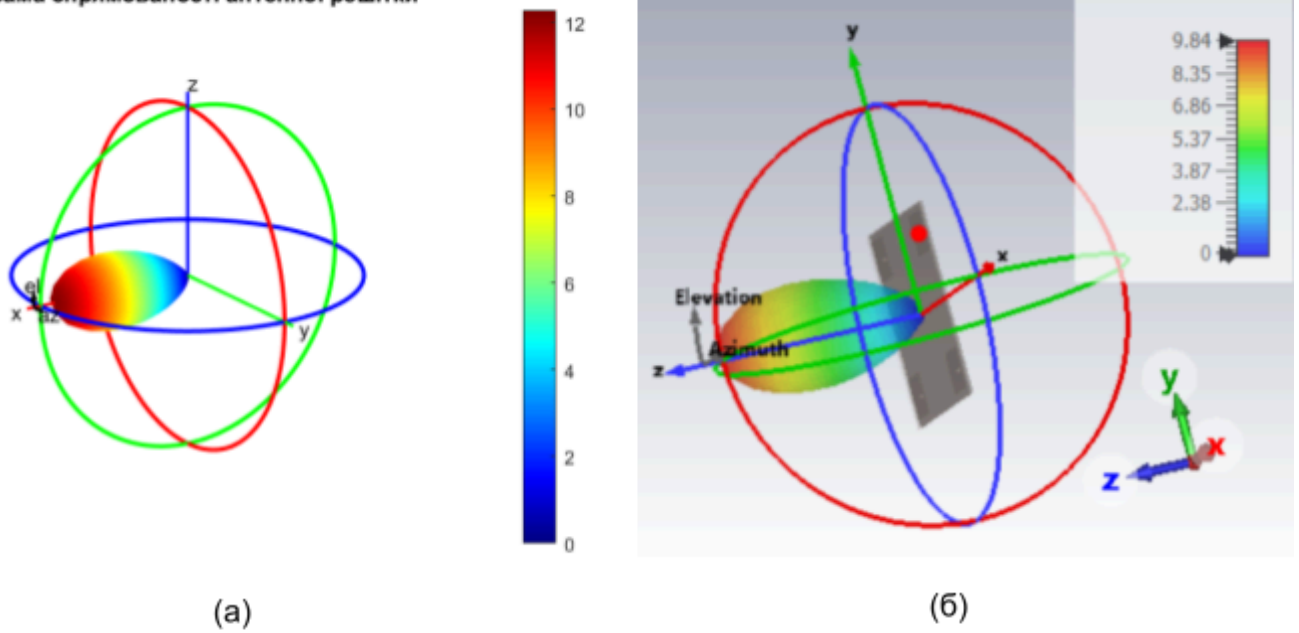


Рисунок 3.4. Порівняння діаграми спрямованості математичної моделі (а) та моделі CST (б) антенної решітки

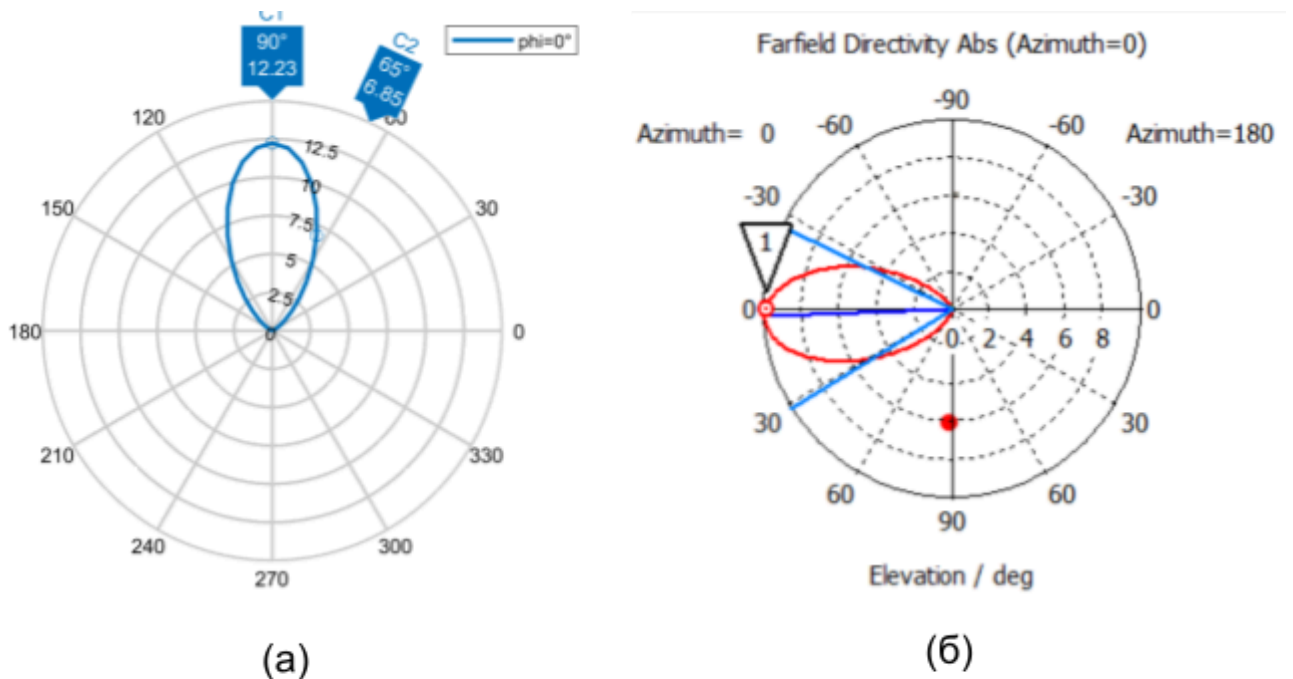


Рисунок 3.5. Порівняння планарної діаграми спрямованості математичної моделі (а) та моделі CST (б) антенної решітки

Таблиця 4 - Порівняння параметрів діаграми спрямованості, вагові коефіцієнти відсутні

	Математична модель	Модель CST
Максимум діаграми, рази	12.23	9.86
Максимум діаграми, дБі	10.8743	9.94
Значення по рівню 3 дБ, дБ	5	5.1
Ширина пелюстки, град	58	59

Як бачимо, математична модель досить до добре апроксимує роботу решітки - ширина пелюстки і значення по рівню 3 дБ практично не відрізняються. Бачимо різницю по рівню головної пелюстки у менше ніж 1 дБ. Цю похибку можна пояснити грубим наближенням у моделі впливу рефлектора - пластини-землі. Її вплив розраховується шляхом занулення значень ДС для азимуту від 90 до 270 градусів, за аналогією з ДС, змодельованою у середовищі CST - там спостерігаємо повну відсутність задніх пелюсток. Натомість в розрахованій моделі таке наближення зменшує значення потужності ізотропного випромінювача, яке використовується при знаходженні значень ДС. Що і призводить до трохи збільшеного значення ДС.

### 3.2.2. Перевірка відтворення моделі елементу решітки з використанням вагових коефіцієнтів

Проведемо порівняльний аналіз моделі у середовищі CST та розрахованої математичної моделі за умови подачі на вхід фідерних трактів антени сигналів з ваговими комплексними коефіцієнтами. У середовищі CST подаємо на порти AP сигнали з заданими відмінними модулями  $w_m$  та фазами  $\varphi_m$ , що відповідає реалізації формули (16) розділу 3.1. Розглянемо декілька випадків

1. Відсутнє живлення на першому порті ( $w_1 = 0, \varphi_1 = 0$ ):

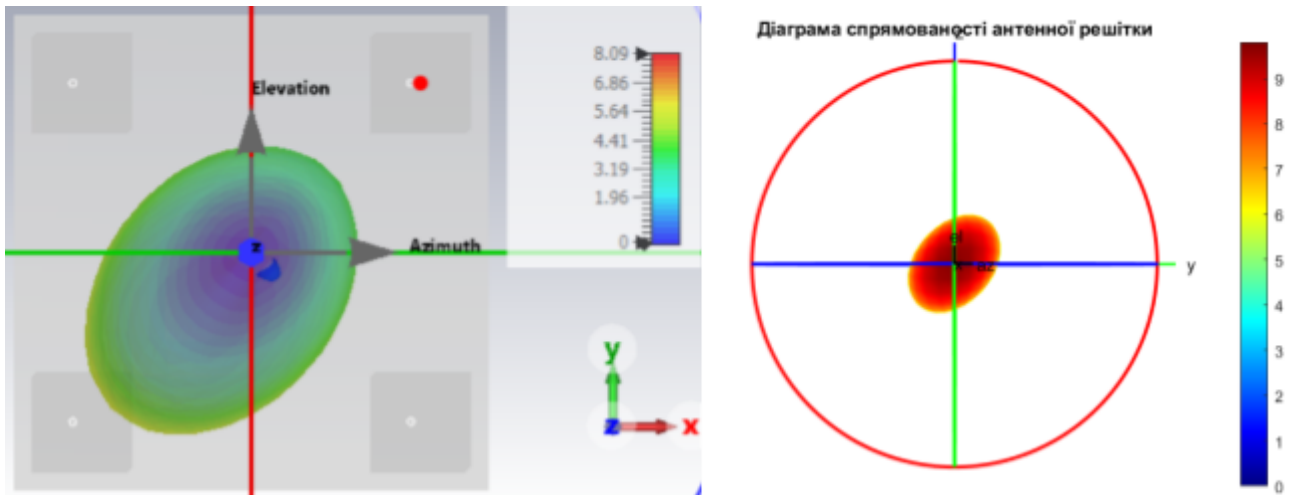


Рисунок 3.6. Діаграма спрямованості антенної решітки,  $W1 = 0$ , (а) - модель CST, (б) - математична модель

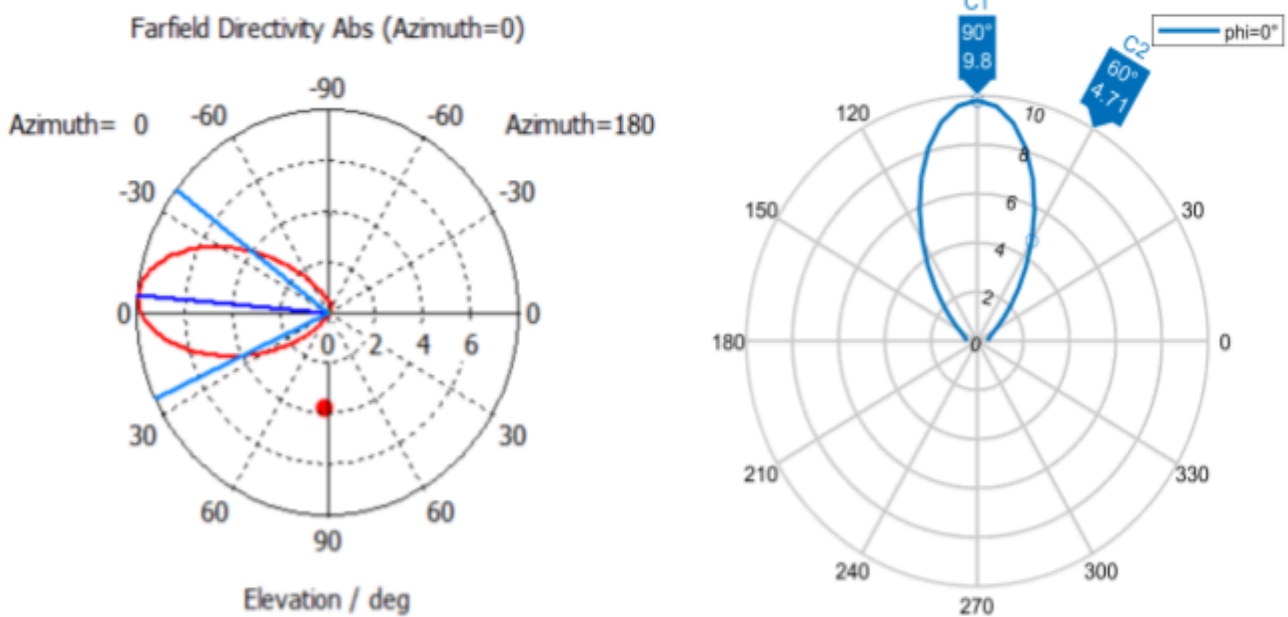


Рисунок 3.7. Планарна діаграма спрямованості антенної решітки,  $W1 = 0$ , (а) - модель CST, (б) - математична модель

Таблиця 5 - Порівняння параметрів діаграми спрямованості, вагові коефіцієнти  $W1 = 0$

	Математична модель	Модель CST
Максимум діаграми, рази	9.8	8.32

Максимум діаграми, дБі	9.9	9.206
Значення по рівню 3 дБ, дБ	4.9	4.3
Ширина пелюстки, град	57	61.1

Як можна бачити з результатів порівняння, математична модель досить добре апроксимує значення моделі CST. Різниця максимумів складає 0.7 дБі, що є допустимою похибкою, різниця в ширині головної пелюстки - 4.1 градусів, різниця значень по рівню 3 дБ - 0.6 дБ.

2. Відсутнє живлення на 2 та 3 портах ( $w_2 = 0$ ,  $w_3 = 0$ ,  $\phi_2 = 0$ ,  $\phi_3 = 0$ ):

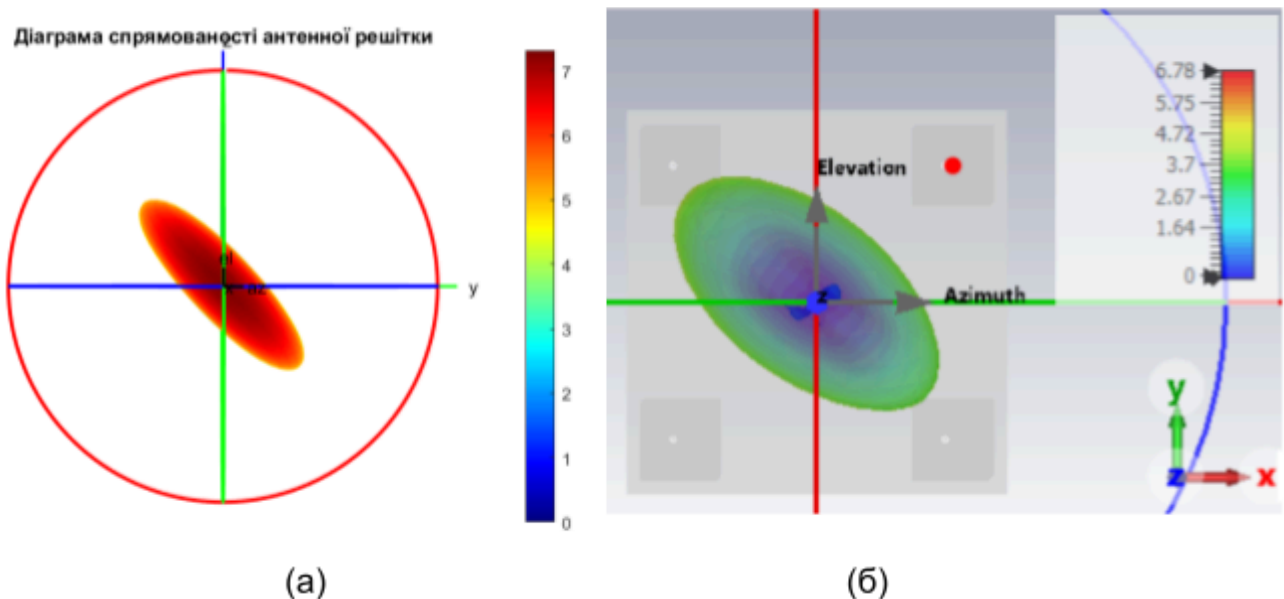


Рисунок 3.8. Діаграма спрямованості антенної решітки,  $W_2 = 0$ ,  $W_3 = 0$ , (а) - модель CST, (б) - математична модель

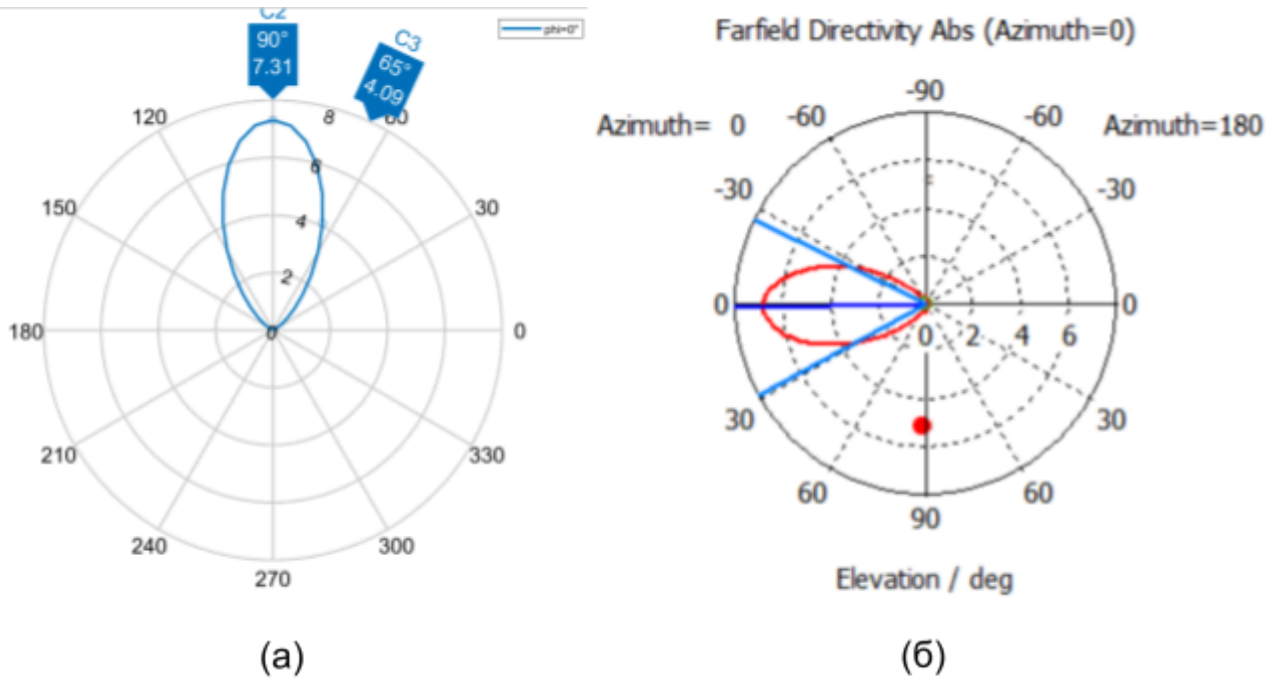
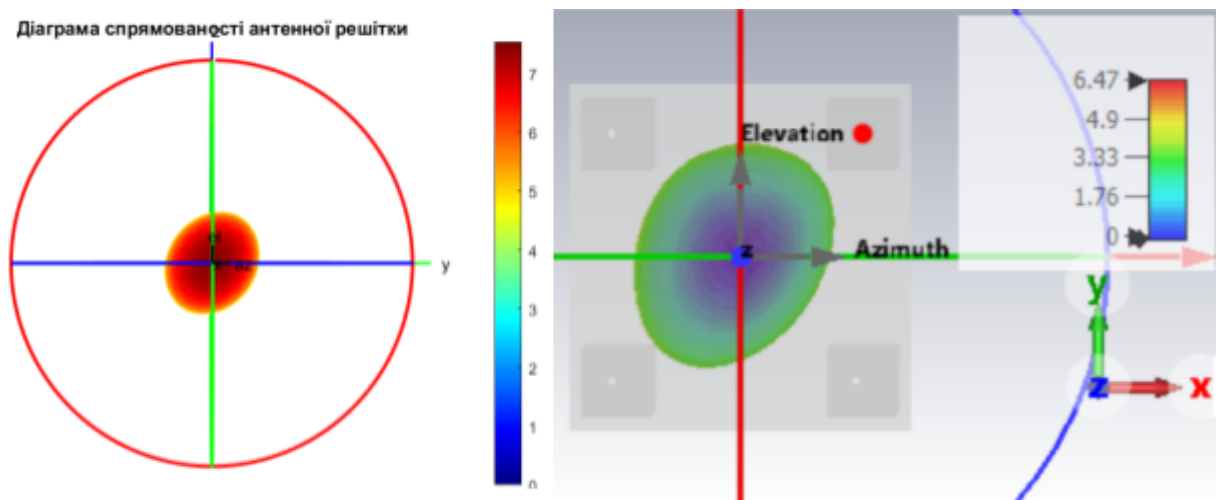
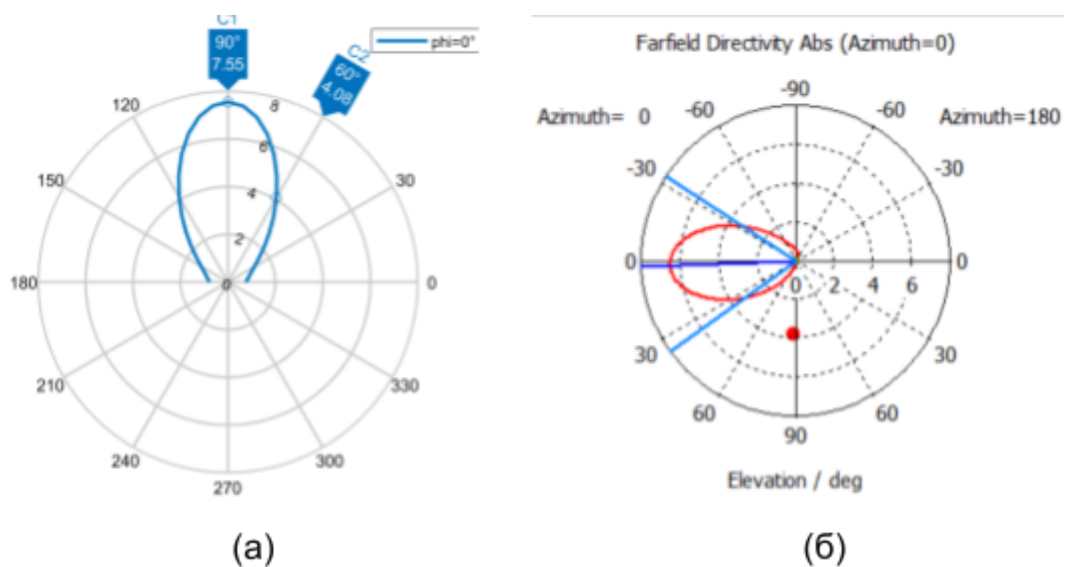


Рисунок 3.9. Планарна діаграма спрямованості антенної решітки,  $W_2 = 0$ ,  $W_3 = 0$ ,  
(а) - модель CST, (б) - математична модель

Таблиця 6 - Порівняння параметрів діаграми спрямованості, вагові коефіцієнти  
 $W_2=W_3=0$

	Математична модель	Модель CST
Максимум діаграми, рази	7.31	6.78
Максимум діаграми, дБі	8.63	8.31
Значення по рівню 3 дБ, дБ	3.65	3.4
Ширина пелюстки, град	56	54.8

Різниця максимумів складає 0.32 дБі, що є допустимою похибкою, різниця в ширині головної пелюстки - 2.8 градусів, різниця значень по рівню 3 дБ - 0.25 дБ.

3. Живлення на 2 порті з коефіцієнтами  $w_2 = 5$ ,  $\phi_2 = 0$ :Рисунок 3.10. Діаграма спрямованості антенної решітки,  $W_2 = 5$ , (а) - математична модель, (б) - модель CSTРисунок 3.11. Діаграма спрямованості антенної решітки,  $W_2 = 5$ , (а) - математична модель, (б) - модель CST

Таблиця 7 - Порівняння параметрів діаграми спрямованості, вагові коефіцієнти  $w_2 = 5$ ,  $\phi_2 = 0$ :

	Математична модель	Модель CST
Максимум діаграми, рази	7.55	6.48
Максимум діаграми,	8.77	8.11

дБі		
Значення по рівню 3 дБ, дБ	3.77	3.4
Ширина пелюстки, град	66	68.7

4. Живлення на 2 та 3 портах з коефіцієнтами  $w_2 = 5$ ,  $\phi_2 = 0$  та  $w_3 = 5$ ,  $\phi_3 = 0$  відповідно

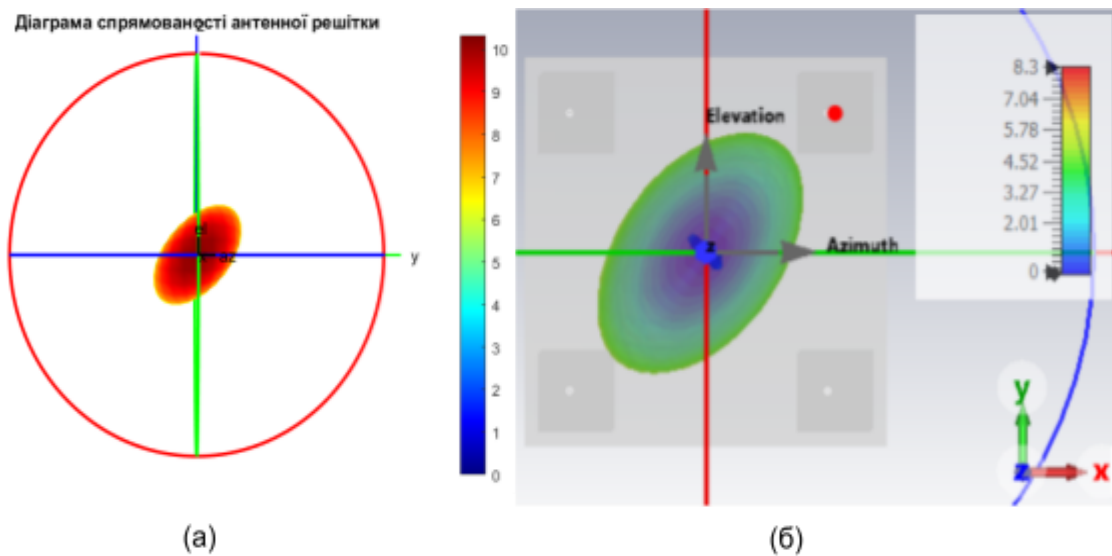


Рисунок 3.12. Діаграма спрямованості антенної решітки,  $W_2 = W_3 = 5$ , (а) - математична модель, (б) - модель CST

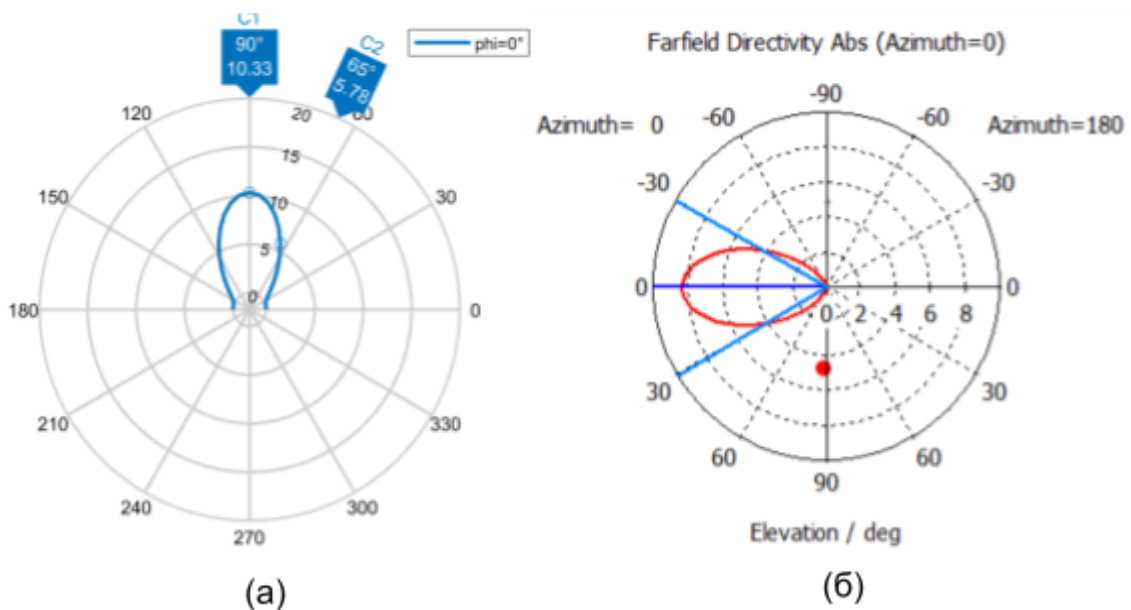


Рисунок 3.13. Діаграма спрямованості антенної решітки,  $W_2 = W_3 = 5$ , (а) - математична модель, (б) - модель CST

Таблиця 8 - Порівняння параметрів діаграми спрямованості, вагові коефіцієнти

$$W_2 = W_3 = 5$$

	Математична модель	Модель CST
Максимум діаграми, рази	10.33	8.3
Максимум діаграми, дБі	10.14	9.19
Значення по рівню 3 дБ, дБ	5.165	4.2
Ширина пелюстки, град	57	60.2

5. Живлення на 2 та 3 портах з коефіцієнтами  $w_2 = 5$ ,  $\phi_2 = 0$  та  $w_3 = 5$ ,  $\phi_3 = 0$  відповідно

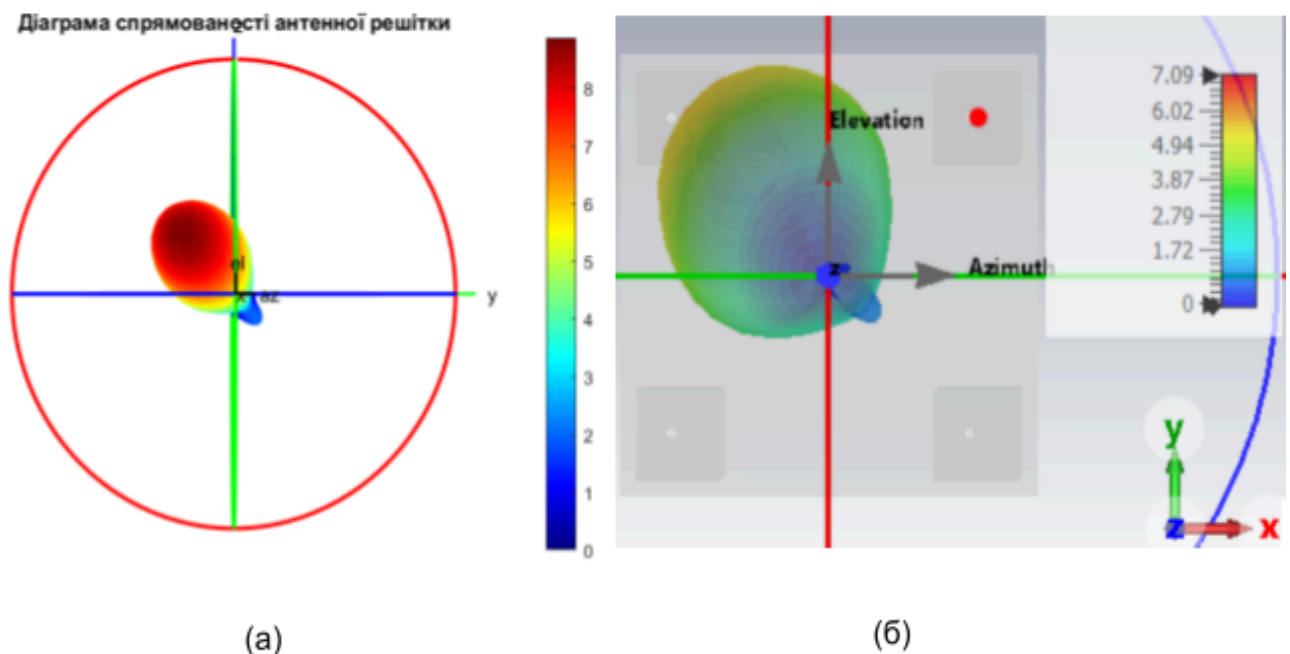


Рисунок 3.14. Діаграма спрямованості антенної решітки,  $W_2 = 1$ ,  $\Phi_2 = 90$ , (а) - математична модель, (б) - модель CST

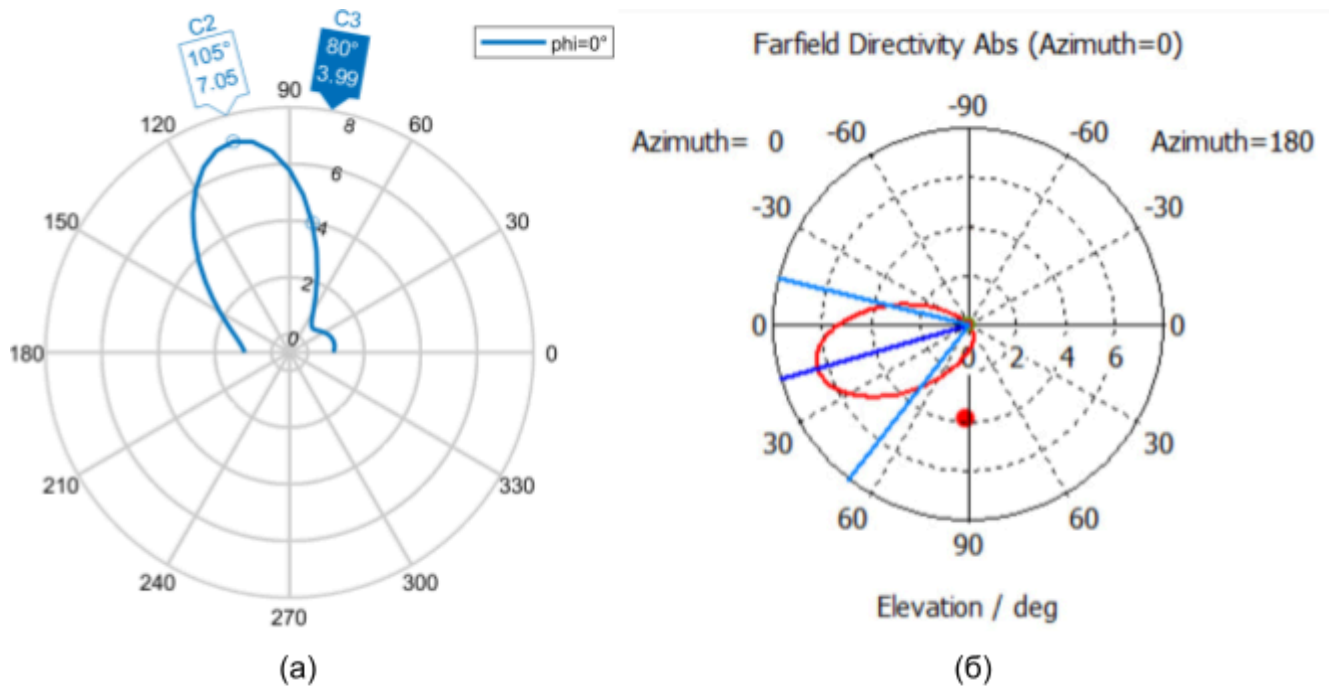


Рисунок 3.15. Планарна діаграма спрямованості антенної решітки,  $W_2 = 1$ ,  $\Phi_2 = 90$ , (а) - математична модель, (б) - модель CST

Таблиця 9 - Порівняння параметрів діаграми спрямованості, вагові коефіцієнти  $w_2 = 1$ ,  $\phi_2 = 90$

	Математична модель	Модель CST
Максимум діаграми, рази	7.05	6.41
Максимум діаграми, дБі	8.48	8.06
Значення по рівню 3 дБ, дБ	3.525	3.6
Ширина пелюстки, град	59	66

## ВИСНОВКИ

В даній дипломній роботі показана актуальність та необхідність створення антенних систем з використанням CRPA. Розглянуті принципи функціонування CRP антен та головні показники їх ефективності. Було створено модель елемента решітки та патчевої антенної решітки, проведено моделювання роботи елемента і решітки, досліджено їх електромагнітні характеристики. Моделі елемента антенної решітки та кінцевої антенної решітки мають характеристики, зазначені в таблиці 10 та таблиці 11 відповідно.

Таблиця 10 - Характеристики антенної решітки

1.	Смуга пропускання	1566-1578 МГц (12 МГц)
2.	Поляризація	Права кругова
3.	Коефіцієнт підсилення	3,05 дБі
4.	Заміри	43.23x43.23x1.9035 мм
5.	Ширина головної пелюстки	117.5
6.	КСХ	1.537
7.	Рівень бічних пелюсток	-1 дБ
8.	Axial Ratio, дБ	0.545 дБ

Таблиця 11 - Характеристики антенної решітки

1.	Смуга пропускання	1566-1575 МГц (9 МГц)
2.	Поляризація	Еліптична
3.	Коефіцієнт підсилення	8,75 дБі
4.	Заміри	137.347x137.347x1.9035 мм
5.	Ширина головної пелюстки	56.8
6.	КСХ	1.537
7.	Рівень бічних пелюсток	-20 дБ
8.	Axial Ratio, дБ	7,708 дБ

В ході роботи в середовищі програмування Matlab було створено математичну модель, що апроксимує антенну решітку, було продемонстровано принцип керування її діаграмою спрямованості за допомогою комплексних коефіцієнтів та проведено порівняння з електромагнітною моделлю решітки, створеною в програмному середовищі CST. При математичному моделюванні були отримані результати, близькі до електромагнітної симуляції, що свідчить про задовільний рівень апроксимації моделі.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Navigating the L1, L2 and L5 Band Options for GNSS [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу:  
<https://www.everythingrf.com/community/navigating-the-l1-l2-and-l5-band-options-for-gnss>
2. New Civil Signals [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу:  
<https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>
3. Супутникова навігація : основні принципи роботи. Проблеми та методи їх вирішення [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу:  
[https://xn--j1ahb.xn--j1amh/articles/GPS\\_GLONASS\\_AGPS\\_RTK/](https://xn--j1ahb.xn--j1amh/articles/GPS_GLONASS_AGPS_RTK/)
4. Control Segment [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу:  
<https://www.gps.gov/systems/gps/control/>
5. Satellite Navigation - GPS - Control Segment [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу:  
[https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/techops/navservices/gnss/gps/controlsegments](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/gps/controlsegments)
6. Satellite Navigation - GPS - User Segment [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу:  
[https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/techops/navservices/gnss/gps/usersegments](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/gps/usersegments)
7. Compact controlled reception pattern antenna for interference mitigation tasks of global navigation satellite system receivers
8. Understanding GPS Principles and Applications Second Edition / Elliott D. Kaplan Christopher J. Hegarty - 2006 ARTECH HOUSE, INC. - с 243
9. GNSS/GPS antenna design: FRPA or CRPA? [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу:  
<https://www.planetanalog.com/gnss-gps-antenna-design-frpa-or-crpa/>

10. Antenna theory analysis and design, third edition/ Constantine A. Balanis - 2005  
by John Wiley & Sons, Inc. - c 27
11. Analysis of feeding techniques of a patch antenna array for 5g nr / Bc. Jiří  
Křivák - Brno 2021 - c 43
12. Phased Array Antenna Handbook / Robert J. Mailloux - 2005 ARTECH  
HOUSE, INC - c 258

## ДОДАТОК

```

E_data = readtable('final_patch_efield_linear','VariableNamingRule','preserve');
E_data.Properties.VariableNames = {'theta', 'phi', 'abs_e', 'abs_theta', 'phase_theta', 'abs_phi',
'phase_phi', 'ax_ratio'};

Dir_data = readtable('final_patch_directivity_linear','VariableNamingRule','preserve');
Dir_data.Properties.VariableNames = {'theta', 'phi', 'abs_dir', 'abs_theta', 'phase_theta', 'abs_phi',
'phase_phi', 'ax_ratio'};

global EI;
EI = -90:5:90;
global Az;
Az = 0:5:360;
%abs_e_element = [E_data.abs_e; E_data.abs_e(1:1:length(EI))];
global abs_e;
global abs_d;
%заповнюємо щілину
abs_e = reshape([E_data.abs_e; E_data.abs_e(1:1:length(EI))],[length(EI),length(Az)]);
abs_d = reshape([Dir_data.abs_dir; Dir_data.abs_dir(1:1:length(EI))],[length(EI),length(Az)]);

e_db = pow2db(abs_e);
d_db = pow2db(abs_d);

%вагові коефіцієнти
mod_W1 = 1;
ph_W1 = 0;
mod_W2 = 1;
ph_W2 = 90;
mod_W3 = 1;
ph_W3 = 0;
mod_W4 = 1;
ph_W4 = 0;
%global mod_W;
%global ph_W;
mod_W = [mod_W1, mod_W2, mod_W3, mod_W4];
ph_W = [ph_W1, ph_W2, ph_W3, ph_W4];

E_array = E_array_f(mod_W, ph_W);

% створення матриці коефіцієнту решітки:
F_array = zeros(length(Az)+length(EI),1);

```

47

```
i = 1;
for az = Az
    for el = EI
        F_array(i) = F_ar(az, el, mod_W, ph_W);
        i = i+1;
    end
end
```

```
F_array = reshape(F_array,[length(EI),length(Az)]);
%abs_e_vector = reshape(abs_e_vector,[length(EI),length(Az)]);
E_array(1,25)=0;
abs_e(1,25) = 0;
```

```
X = Az;
Y = EI;
Z1 = abs(E_array);
Z2 = abs(F_array);
```

```
Phi = Az;
Theta = (90-EI);
figure;
patternCustom(transpose(abs(E_array)), Theta, Phi);
title('E поле антенної решітки');
%розрахунок напрямленості
%для врахування рефлектора створюємо поле без задньої пелюстки Az[90;270]
Dir_array = Dir_array_f(E_array);
```

```
Phi = Az;
Theta = (90-EI);
figure;
patternCustom(transpose(abs(Dir_array)), Theta, Phi);
title('Діаграма спрямованості антенної решітки'); %з рефлектором
```

```
figure;
surf(X,Y,Z2);
xlabel('Az [deg]'), ylabel('EI [deg]'), zlabel('F_(ar)');
title('Array Factor Surface');
```

```
figure;
surf(X,Y,Z2);
xlabel('Az [deg]'), ylabel('EI [deg]'), zlabel('E field [dB(V/m)]');
title('Array factor F_a_r surface');
%{
figure;
surf(X,Y,abs_e_vector);
xlabel('Az [deg]'), ylabel('EI [deg]'), zlabel('E field [dB(V/m)]');
```

48

```
title('Patch E field Surface');  
%}
```

```
figure;  
patternCustom(transpose(abs(E_array)),Theta,Phi,'CoordinateSystem','polar','Slice','phi','SliceValue',0  
);  
title('Планарна діаграма E поля антенної решітки');
```

```
patternCustom(transpose(abs(Dir_array)),Theta,Phi,'CoordinateSystem','polar','Slice','phi','SliceValue',  
0);  
title('Планарна діаграма спрямованості антенної решітки')
```

```
Phi = Az;  
Theta = (90-EI);  
figure;  
patternCustom(transpose(abs_e), Theta, Phi);  
title('E поле елемента решітки');
```

```
figure;  
patternCustom(transpose(abs_d), Theta, Phi);  
title('Діаграма спрямованості елемента решітки');
```

```
%розрахунок направленості  
%для врахування рефлектора створюємо поле без задньої пелюстки Az[90;270]  
figure;  
patternCustom(transpose(abs(abs_d)),Theta,Phi,'CoordinateSystem','polar','Slice','phi','SliceValue',0);  
title('Планарна діаграма спрямованості елемента решітки')
```

```
figure;  
patternCustom(transpose(abs(abs_e)),Theta,Phi,'CoordinateSystem','polar','Slice','phi','SliceValue',0);  
title('Планарна діаграма E поля елемента решітки')
```

```
function [xyz_a] = ort_a(az, el)  
    xyz_a(1) = cosd(az).*cosd(el);  
    xyz_a(2) = sind(az).*cosd(el);  
    xyz_a(3) = sind(el);  
end
```

```
function F_ar = F_ar(az, el, mod_W, ph_W)  
M = 4;  
freq = 1.575e9;  
lambda = physconst('LightSpeed')/freq;  
k = 2*pi/lambda;
```

```
%після виправлення відповідають портам  
%z, y, x
```

```
p31 = [1.935 114.247 19.1]; %раніше p1  
p11 = [1.935 114.247 114.247]; %раніше p2
```

49

```
p41 = [1.935 19.1 19.1]; %раніше p3  
p21 = [1.935 19.1 114.247]; %раніше p4
```

```
%{  
%координати портів для решітки елементів без спільного субстрата
```

```
p30 = [0 40 0];
```

```
p00 = [0 0 -40];
```

```
p10 = [0 -40 0];
```

```
p20 = [0 0 40];
```

```
p31 = [1.9 40 0];
```

```
p01 = [1.9 0 -40];
```

```
p11 = [1.9 -40 0];
```

```
p21 = [1.9 0 40];
```

```
%}
```

```
%p = [p00; p10; p20; p30]; %вектор у площині z = 0,
```

```
p1 = [p11; p21; p31; p41]; %вектор у площині z = 1.9, як в оригінальній решітці
```

```
pm = p1 .*0.001;
```

```
F_ar = 0;
```

```
for N = 1:M
```

```
test1 = pm(N, :)*ort_a(az, el).';
```

```
F_ar = F_ar + mod_W(N)*exp(1i*ph_W(N) - 1i*k*test1);
```

```
end
```

```
end
```

```
function E_el = E_el(az, el)
```

```
global Az;
```

```
global EI;
```

```
global abs_e;
```

```
az_pos = find(Az==az);
```

```
el_pos = find(EI==el);
```

```
E_el = abs_e(el_pos, az_pos);
```

```
end
```

```
function [E_array] = E_array_f(mod_W, ph_W)
```

```
global Az;
```

```
global EI;
```

```
E_array = zeros(length(Az)+length(EI),1);
```

```
i = 1;
```

```
for az = Az
```

```
for el = EI
```

```
E_array(i) = F_ar(az, el, mod_W, ph_W)*E_el(az, el);
```

```
i = i+1;
```

```
end
```

```
50
end
```

```
E_array = reshape(E_array,[length(EI),length(Az)]);
end
```

```
function [Dir_array] = Dir_array_f(E_array)
global Az;
global EI;
```

```
Dir_array = zeros(length(Az)+length(EI),1);
```

```
P_total = 0;
i = 1;
for az = Az
    for el = EI
        if (az >= 90 && az <= 270)
            E_array(i) = 0.5;
        end
        P_total = P_total + (abs(E_array(i)))^2*cosd(el);
        i = i+1;
    end
end
```

```
i = 1;
for az = Az
    for el = EI
        num = 2*length(EI)*length(Az)*(abs(E_array(i)))^2;
        denom = pi*P_total;
        Dir_array(i) = num/denom;
        i = i+1;
    end
end
Dir_array = reshape(Dir_array,[length(EI),length(Az)]);
Dir_array(1,25)=0;
```

```
end
```