

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

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоінженерії

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій Мартинюк

«__» _____ 2023р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-науковою програмою «Інформаційна та комунікаційна радіо-
інженерія» зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

**на тему: «Широкошмугова антенна решітка Ku діапазону
для супутникового зв'язку»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи РІ-11мн

Гергіль Євгеній Євгенійович _____

Науковий керівник:

phD, доц.

Сушко Олександр Юрійович _____

Рецензент: _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2023 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіоінженерії

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-наукова програма «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій МАРТИНЮК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Гергілю Євгенію Євгенійовичу

1. Тема дисертації «Широкопasmована антенна решітка Ku діапазону для супутникового зв'язку», науковий керівник дисертації Сушко Олександр Юрійович, PhD, доц., затверджені наказом по університету від «22» __03__ 2023 р. №1300-с
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єктом дослідження є антенна решітка Ku-діапазону з коловою поляризацією для супутникового зв'язку.
4. Предметом дослідження є електродинамічні характеристики антенної решітки, а саме вплив різних геометричних параметрів на робочу смугу частот, коефіцієнт еліптичності, та діаграму спрямованості антенної решітки Ku-діапазону для супутникового зв'язку.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: огляд існуючих технічних рішень, розробка конструкції одиничного елемента решітки, оптимізація конструкції решітки 2x2 для досягнення необхідних характеристик.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: пояснювальна записка до дипломного проекту.
7. Орієнтовний перелік публікацій: тези РТПСАС, стаття в науковому журналі.

9. Дата видачі завдання 17. 10. 2022 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд існуючих рішень	13.03 – 21.03 Розділ 1	Виконав
2	Розробка та аналіз технічного завдання.	22.03 – 28.03 Розділ 1	Виконав
3	Обґрунтування та вибір елементу решітки	29.03 – 10.04 Розділ 1	Виконав
4	Вибір та обґрунтування елементів конструкції	11.04 – 22.04 Розділ 2	Виконав
5	Оптимізація конструкції антенної решітки	23.04 – 30.04 Розділ 3	Виконав
6	Аналіз результатів моделювання	01.05 – 05.05 Розділ 3	Виконав
7	Оформлення текстової і графічної документації	06.05 – 18.05 Розділ 3	Виконав

Студент

Євгеній ГЕРГІЛЬ

Науковий керівник

Олександр СУШКО

РЕФЕРАТ

Обсяг дисертації складає 46 сторінок, в ній містяться 26 ілюстрацій які повністю розкривають хід даного дослідження та його результати, також наведені 2 таблиці. Список використаних джерел нараховує 21 посилання, які підтверджують наведені факти в дисертації, а також ширше розкривають певні теми.

Останні десятиліття спостерігається стрімкий розвиток космічних технологій. Та впровадження їх у повсякденне життя. Так у 2010 році кількість космічних апаратів на навколосемних орбітах нараховувала близько 940 супутників, в 2020 ця кількість складала вже 2800 супутників, а у 2023 близько 4000 і ця кількість продовжує стрімко збільшуватись. Збільшення кількості космічних апаратів та впровадження сервісів на їх основі (Internet, GPS), продукує необхідність у створенні дешевих та компактних антен. З розвитком космічної галузі виникає протекба у антенах для супутникового зв'язку як бортових, так і наземних, які відповідатимуть сучасним вимогам.

Тому за мету даного дослідження було взято розробку прототипу антенної решітки Ku діапазону для супутникового зв'язку. Оскільки для супутникового зв'язку використовується колова поляризація, то в даній роботі були досліджені способи досягнення колової поляризації для плоских антенних решіток у широкій смузі частот. А також розробка загального підходу до проектування антен такого типу, яка б дозволила промасштабувати даний прототип для реальних застосувань.

В якості об'єкту досліджень виступає антенна решітка 2x2 з паралельним живленням одиничних елементів.

Початком досліджень на будь-якому етапі було вивчення літератури про той чи інший вузол конструкції, після отримання теоретичних знань, проводилось електродинамічне моделювання конструкцій, і проведення кількісного порівняння отриманих характеристик.

До практичного застосування отриманих результатів можна віднести отримання моделі антенної решітки та її реалізація. А також вичерпний опис для подальшого розвитку даної конструкції.

Опис конструкції одиничного елемента, а також дослідження його характеристик, таких як коефіцієнт відбиття, а також коефіцієнт еліптичності, були наведені на науковій конференції РТПСАС.

Ключові слова: колова поляризація, супутниковий зв'язок, Ки-діапазон, живлення, антенна решітка, патч антена.

ABSTRACT

The volume of this work is 46 pages, it contains 26 illustrations that fully disclose the course of this study and its results, and 2 tables are also provided. The list of references includes 21 references that confirm the facts presented in the thesis, as well as expand on certain topics.

Recent decades have seen the rapid development of space technologies. And their implementation in everyday life. Thus, in 2010, the number of spacecraft in Earth orbits was about 940 satellites, in 2020 this number was already 2800 satellites, and in 2023 it was about 4000, and this number continues to grow rapidly. The increase in the number of spacecraft and the introduction of services based on them (Internet, GPS) demonstrates the need for cheap and compact antennas. With the development of the space industry, there is a need for antennas for satellite communications, both on-board and ground-based, that meet modern requirements.

Therefore, the purpose of this study was to develop a prototype Ku-band antenna array for satellite communications. Since circular polarization is used for satellite communications, this work investigated ways to achieve circular polarization for flat antenna arrays in a wide frequency band. And also the development of a general approach to the design of antennas of this type, which would allow to scale this prototype for real applications.

The object of research is a 2x2 antenna array with parallel feeding of single elements.

The beginning of the research at any stage was the study of the literature on a particular structural unit, after obtaining theoretical knowledge, electrodynamic modeling of structures was carried out, and a quantitative comparison of the obtained characteristics was carried out.

The practical application of the results obtained includes the development of an antenna array model and its implementation. As well as a comprehensive description for further development of this design.

The description of the single element design, as well as the study of its characteristics, such as reflection coefficient and ellipticity coefficient, were presented at the RTPSAS scientific conference.

Keywords: circular polarization, satellite communication, Ku-band, power supply, antenna array, patch antenna.

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	13
Вступ.....	14
1 Вибір одиничного елемента решітки.....	15
1.1 Теоретичні викладки.....	15
1.2 Вибір одиничного елемента решітки.....	17
1.2.1 Одиничний елемент з коловою поляризацією	17
1.2.2 Побудова одиничного елемента з коловою поляризацією.....	18
1.2.3 Одиничний елемент з лінійною поляризацією	19
1.2.4 Побудова одиничного елемента з лінійною поляризацією	20
1.3 Моделювання одиничних елементів.....	21
1.3.1 Граничні умови	21
1.3.2 Діапазон частот	22
1.4 Результати моделювання елемента з коловою поляризацією	22
1.5 Результати моделювання елемента з лінійною поляризацією	24
1.6 Висновки	24
2 Проектування антенної решітки.....	25
2.1 Обґрунтування конструкційних характеристик АР	25
2.2 Вибір подільника потужності	26
2.2.1 Огляд інсуючих конструкцій подільників.....	26
2.2.2 Моделювання Т-подібного дільника	27

	9
2.2.1 Модифікація T-подібного діляника	27
2.3 Узгодження антени з фідерним трактом	29
2.4 Умови моделювання AP	30
2.4.1 Розбиття структури на комірки	30
2.4.1 Граничні умови	31
2.5 Результати моделювання AP.....	31
2.6 Висновки.....	33
3 Оптимізація конструкції та аналіз результатів	35
3.1 Вибір методу оптимізації	35
3.2 Вибір параметрів для оптимізації.....	36
3.3 Аналіз отриманих результатів	37
3.4 Висновки.....	42
Висновки	44
Перелік джерел посилань	45
Додаток А.....	48

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АР — Антена решітка
БП — Бічний пелюсток
ГП — Головний пелюсток
ДП — Друкована плата
ДС — Діаграма спрямованості
ЕМХ — Електромагнітна хвиля
КСД — Коефіцієнт направленої дії
САПР — Система автоматизованого проектування

ВСТУП

Останні десятиліття спостерігається стрімкий розвиток космічних технологій. Та впровадження їх у повсякденне життя. Так у 2010 році кількість космічних апаратів на навколосемних орбітах нараховувала близько 940 супутників, в 2020 ця кількість складала вже 2800 супутників, а у 2023 близько 4000 і ця кількість продовжує стрімко збільшуватись. Збільшення кількості космічних апаратів та впровадження сервісів на їх основі (Internet, GPS), продокуює необхідність у створенні дешевих та компактних антен. З розвитком космічної галузі виникає протєба у антєнах для супутникового зв'язку як бортових, так і наземних, які відповідатимуть сучасним вимогам.

На сьогоднішній день перед таким типом антен стоять наступні вимоги: простота виготовлення, повторюваність, масштабованість конструкції та низька собівартість. Для вищеперерахованих вимог добре підходить плоска AP виготовлення на друкованій платі. Протє існують різні варіанти реалізації такої AP, гнучкі, багат шарові, тощо. В даній дипломній роботі будуть розглянуті різні варіанти виконання AP, і наведєне обгрунтування вибраної конструкції.

Метєю дипломної роботи є розробка та виготовлення експерементального зразка антєни для супутникового зв'язку Ku діапазону, та дослідження таких характеристик антєни як: коефіцієнт відбиття, коефіцієнт еліптичності, діаграма спрямованості, тощо.

1 ВИБІР ОДИНИЧНОГО ЕЛЕМЕНТУ РЕШІТКИ

1.1 Теоретичні викладки

У супутниковому зв'язку колова поляризація використовується для мінімізації впливу ефекту множинного відбиття (мультипатного розсіювання), впливу атмосфери і інших ефектів, які можуть виникати при передачі радіосигналів з орбіти. Використання колової поляризації дозволяє зменшити затухання та інтерференцію сигналу під час передачі та отримання його з супутника. Крім того, колова поляризація дозволяє зменшити вплив ефекту Фарадея, який виникає при проходженні радіохвиль через іоносферу. Електромагнітні хвилі, що проходять через іоносферу, можуть зазнавати змін поляризації, що призводить до зменшення відношення сигнал/шум та спотворень сигналу.

Використання колової поляризації дозволяє зменшити цей ефект та покращити якість передачі. Також використання колової поляризації дозволяє збільшити кількість передаваних та отримуваних сигналів на одній частоті за рахунок розв'язки між поляризаціями, що зменшує навантаження на багатоканальні комунікаційні системи та забезпечує більш ефективне використання доступної полоси частот.

Хвилі з коловою поляризацією ділять на право і ліво поляризовані. Право (ліво) поляризовані ЕМХ – це хвилі з коловою поляризацією, в яких вектор електричного поля \vec{E} обертається за (або проти) стрілкою годинника для спостерігача, який дивиться в напрямку поширення хвилі[1].

Для досягнення колової поляризації у мікросмужкових антенах, можна використовувати різні методи: формування колової поляризації на рівні одиничного елемента, або ж подача живлення до одиничних елементів таким чином щоб забезпечувалась колова поляризація[2].

Досягнути колової поляризації в одиничному елементі можна кількома способами, ось найбільш поширені:

- Живлення елемента таким чином, щоб напрямки вектору електричного поля, були перпендикулярними один до одного і мали фазову різницю 90 градусів[3] , [4].
- Використання антени спеціальної форми (еліптична патч антена, патч антени спеціальних форми)[5], [6].
- Посідовне живлення патч антени в кількох місцях, з відповідним фазовим і амплітудним розподілом[7].

Кожен з цих підходів має свій перелік переваг та недоліків. Перший метод являє собою класичний метод досягнення колової поляризації, а саме досягнення її за допомогою суперпозиції двох ортогональних лінійних поляризацій з відповідним фазовим зсувом. Проте живлення такої антени занадто громіздке, тому його важко інтегрувати в антенну решітку. Другий метод є найпростішим у реалізації та є досить компактним що робить його зручним для інтеграції у антенну решітку, проте часто такі елементи є досить вузько смуговими тому вони не підходять для даного завдання.

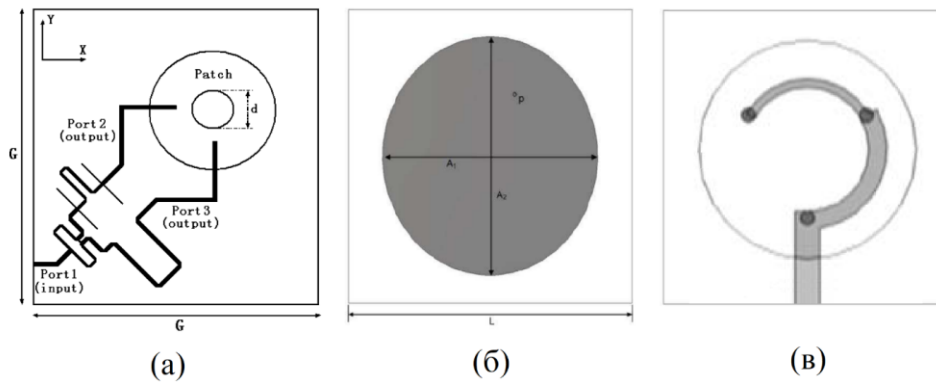


Рисунок 1.1 — Приклади різних способів досягнення колової поляризації за допомогою патч-антени; а — живлення з фазовою різницею 90 градусів; б — спеціальна форма одиничного елемента; в — послідовне живлення патч антени

Останній метод зустрічається не так часто і є більш складним у виготовленні по відношенню до попередніх методів, але даний одиничний елемент є ширококутовим як і з точки зору узгодження з вхідним трактом так і з точки зору поляризації.

1.2 Вибір одиничного елемента решітки

Як зазначалось вище, досягнути колову поляризацію можна різними способами, тому буде розглянуто два типи одиничних елементів, перший з коловою поляризацією на рівні одиничного елемента, другий — з лінійною проте зі спеціальною системою живлення на рівні решітки.

1.2.1 Одиничний елемент з коловою поляризацією

Опираючись на те що антена має працювати у широкому діапазоні частот, а саме: 10,7 — 12,7 ГГц та 14 — 14,5 ГГц, був обраний одиничний елемент з послідовним живленням патчу.

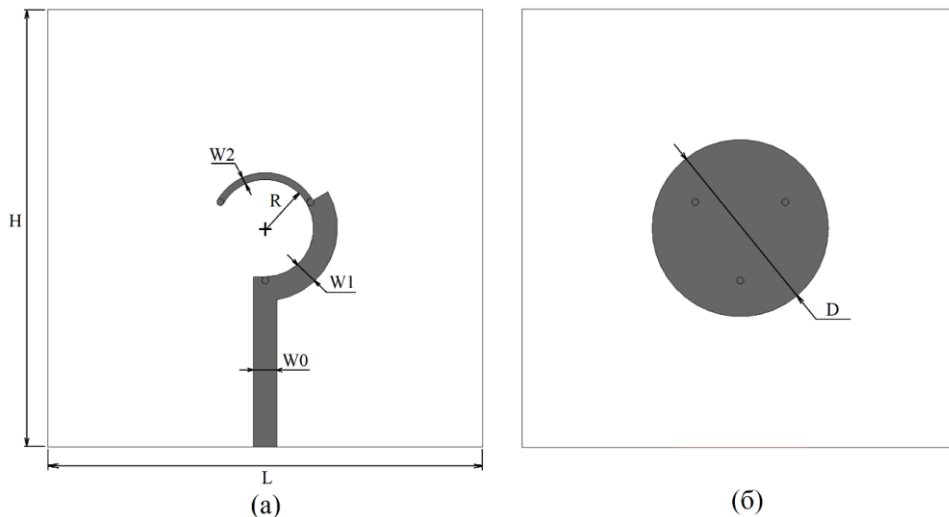


Рисунок 1.2 — Одиничний елемент решітки (вигляд зверху); а — нижня друкована плата; б — верхня друкована плата

Після вибору одиничного елемента, необхідно вибрати з яких шарів складатиметься антена. Система живлення одиничного елемента вимагає побудови антени на основі двох друкованих плат. На нижній платі

реалізоване живлення одиничних елементів, а на верхній — сам патч. Також поширеним методом розширення робочої смуги частот є внесення повітряного прошарку між двома друкованими платами[8]. Хоча таке рішення і ускладнює конструкцію, проте воно є необхідним.

Креслення одиничного елемента зображено на рис. 1.2.

Верхня частина патчу живиться за допомогою металевих дрітків. Конфігурація підібрана таким чином щоб різні частини патчу збуджувались послідовно, завдяки чому і отримано коловою поляризацію.

1.2.2 Побудова одиничного елемента з коловою поляризацією

Зазвичай при проектуванні антенних решіток, відстань між елементами решітки обирають рівні половині довжини хвилі, це обґрунтоване тим при такому розподілі одиничних елементів досягається мінімальна ширина головної пелюстки (ГП) [9]. Проте при врахуванні інших параметрів таких як, підсилення, рівень бічних пелюсток (БП) узгодження антени з вхідним трактом задача вибору відстані між елементами АР ускладнюється, тому в даній роботі вона була вибрана емпіричним шляхом і становить 16,5 мм, що становить 2/3 довжини хвилі на центральній частоті (12 ГГц).

В якості підкладки був використаний матеріал RO4350 18/18. Для даного матеріалу були задані такі параметри: $\epsilon = 3,66$; $\mu = 1$, $\text{tg } \delta = 0,0037$, товщина 0,508 мм.

Ширина W_0 була обрана таким чином, щоб хвильовий опір лінії передачі склав 50 Ом, і складає $W_0 = 1,05$ [мм].

При розрахунку ширин ліній передачі W_1 та W_2 , виникає протиріччя. Оскільки за для технологічності конструкції живлячі зонди були обрані однакового діаметру, відповідно вони мають однаковий імпеданс ($Z_{\text{зон}}$). З точки зору вхідного узгодження, хвильовий опір ліній передачі має розраховуватись таким чином:

$$Z_2 = Z_{\text{зон}} \quad (1.1)$$

$$Z_1 = Z_{\text{зон}} || Z_2 \quad (1.2)$$

Примечание [OS1]: Я б не писав що підсилення максимальне при відстані між елементами пів довжини хвилі на практиці виходило, що при більшій відстані навіть рівній довжині хвилі, підсилення краще, хоч і дещо зростають бічні (але не критично)... просто написати, що часто використовується така відстань

Примечание [OS2]: Моделюванням? Ми ж експеримент не проводили...

$$Z_0 = Z_{\text{зон}} || Z_1 \quad (1.3)$$

Проте при такому розподілі порушиться умова рівноамплітудного збудження одиничного елемента що призведе до погіршення ДС та колової поляризації. Тому такі значення опорів були обрані в якості початкової точки і в подальшому будуть оптимізовані за для досягнення задовільного узгодження і ДС.

Примаючи опір зонду 200 Ом, з формули (1.3) $Z_1 = 65$ [Ом], підставляючи значення Z_1 у формулу (1.2) отримуємо значення $Z_2 = 100$ [Ом].

Знаючи хвильовий опір ліній передачі W_1 та W_2 , а також товщину діелектрично підкладки і її діелектричну проникність, можна розрахувати їх ширину за загальновідомими формулами[10], тому ширини ліній складають: $W_1 = 0,75$ [мм], $W_2 = 0,25$ [мм].

Радіус R обраний таким чином щоб між зондами був набіг фази 120 градусів.

Діаметр патчу D був обраний як половина довжини хвилі на центральній частоті:

$$D = \frac{\lambda_0}{2} = \frac{c}{2f_0} = \frac{3 \times 10^{11}}{2 \times 12 \times 10^9} = 12,5[\text{мм}] \quad (1.4)$$

Товщина повітряного прошарку між двома шарами антени це параметр оптимізації, початкове значення якого було обране 2 мм, що становить 1/6 довжини хвилі.

1.2.3 Одиничний елемент з лінійною поляризацією

Досягнути широкої смуги робочих частот можна різними способами, проте один з найпоширеніших це побудова багатошарового одиничного елемента який зображений на рисунку 1.3.

Живлення одиничного елемента відбувається за допомогою ємнісного зв'язку. Перевагою такої конструкції над попередньою є те, що у ній

Примечание [OS3]: Треба додати дужки всюди

відсутній повітряний прошарок і вона виконується на одній друкованій платі, тому конструкція має кращі механічні характеристики, і кращу повторюваність.

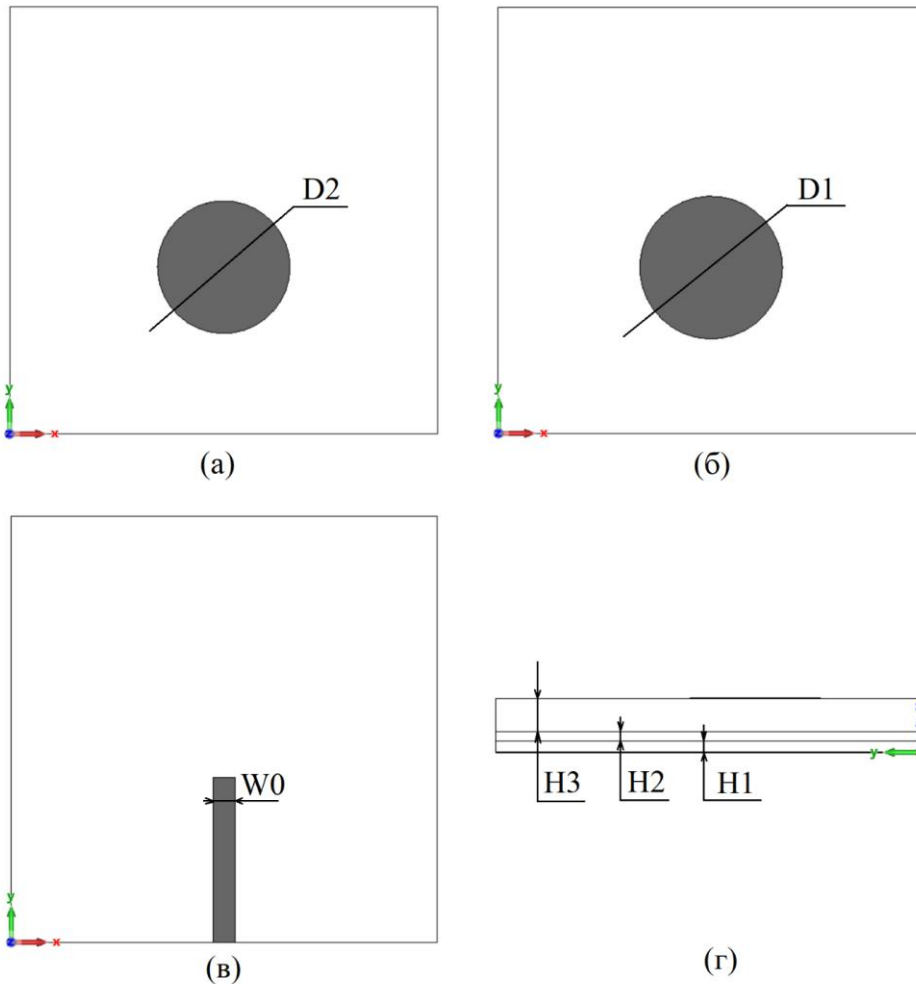


Рисунок 1.3 — Одиничний елемент решітки (вигляд зверху); а — верхній шар; б — середній шар; в — нижній шар; б — вигляд з боку

1.2.4 Побудова одиничного елемента з лінійною поляризацією

Розмір одиничного елемента і тип діелектрику був обраний ааналігчно як і у попереднього патчу (сторона одиничного елемента 16,5мм, матеріал

RO4350) з таких самих міркувань. Проте варто відмітити що дана антена гірше піддається оптимізації, оскільки товщини шарів ДП фіксовані і можуть набувати лише певних значень, що обмежує конструкторів при точному налаштуванні антени.

Товщини шарів обрані таким чином: $H_1 = 0,508$ [мм], $H_2 = 0,508$ [мм], $H_3 = 1,524$ [мм].

Ширина лінії живлення була обрана з міркування, щоб вхідний опір становив 50 Ом, $W_0 = 1,05$ [мм].

Діаметр патчів круглої форми був обраний як четвертина довжини хвилі на частоті 12 ГГц:

$$D_1 = D_2 = \frac{\lambda_0}{4} = \frac{c}{4f_0} = \frac{3 \times 10^{11}}{4 \times 12 \times 10^9} = 6,25[\text{мм}] \quad (1.5)$$

Варто відмітити, що дані розміри є початковими і будуть змінені під час оптимізації.

1.3 Моделювання одиничних елементів

Для моделювання конструкції необхідно задати певні параметри: діапазон частот, граничні умови, зовнішнє оточення та метод електродинамічного аналізу моделі (частотний, часовий або інший) [11].

1.3.1 Граничні умови

Існують різні підходи до електродинамічного моделювання НВЧ структур. Основні з них це часовий метод розрахунку та частотний[12]. Правильний вибір методу для конкретної задачі є важливим етапом проектування антени. За основу був взятий часовий метод, оскільки при правильних налаштуваннях сітки розбиття структури, електродинамічне моделювання НВЧ структури дає коректні результати за менший час а ніж частотний метод розрахунку. На рисунку 1.4 зображено розбиття одиничних елементів паралелепіденою сіткою.

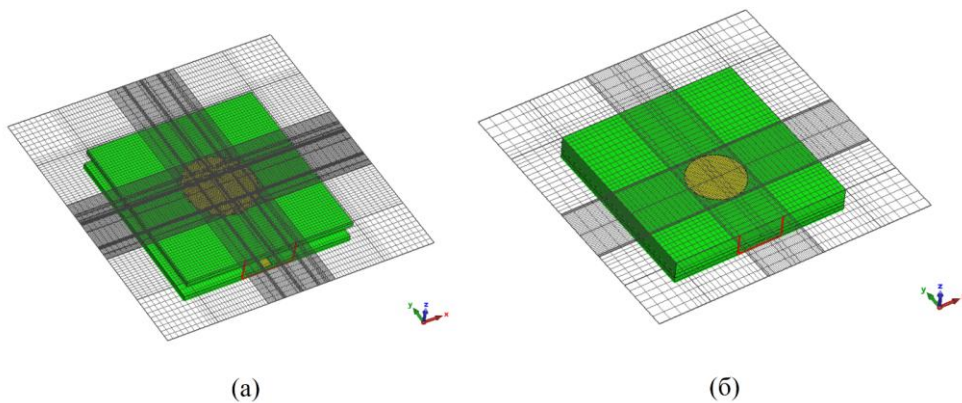


Рисунок 1.4 — Розбиття одиничних елементів решітки; а — елемент з коловою поляризацією; б — елемент з лінійною поляризацією

1.3.2 Діапазон частот

Оскільки необхідний робочий діапазон частот антени складає 10,7 — 12,75 ГГц та 14 — 14,5 ГГц, а за рекомендацією САПР моделювання доцільно проводити в смузі частот яка складає від 20 до 80 відсотків від центальної частоти, то діапазон частот був обраний від 10 ГГц до 15 ГГц

1.4 Результати моделювання елемента з коловою поляризацією

При моделюванні одиничного елемента особлива увага була приділена узгодженню, коловій поляризації та розподілу струмів. Оскільки саме ці параметри були ключовими при виборі конструкції.

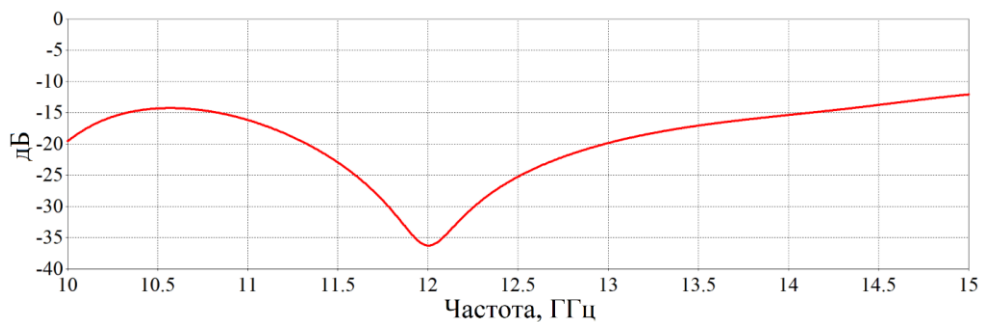


Рисунок 1.5 — Залежність коефіцієнту відбиття від частоти

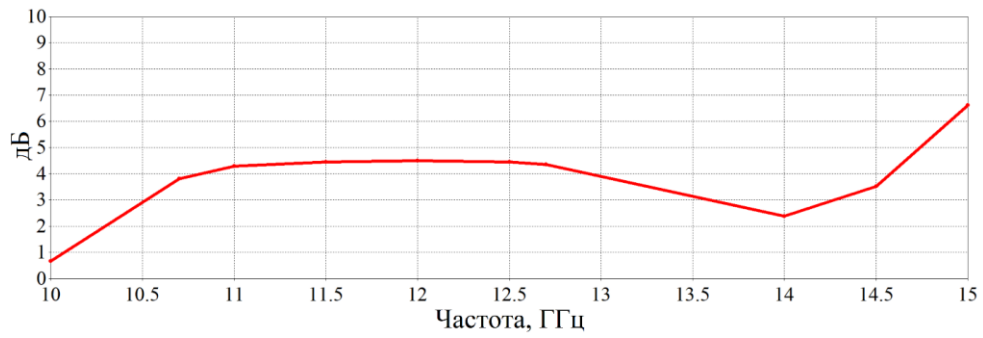


Рисунок 1.6 — Осьове співвідношення векторів електричного поля (коефіцієнт еліптичності) в залежності від частоти

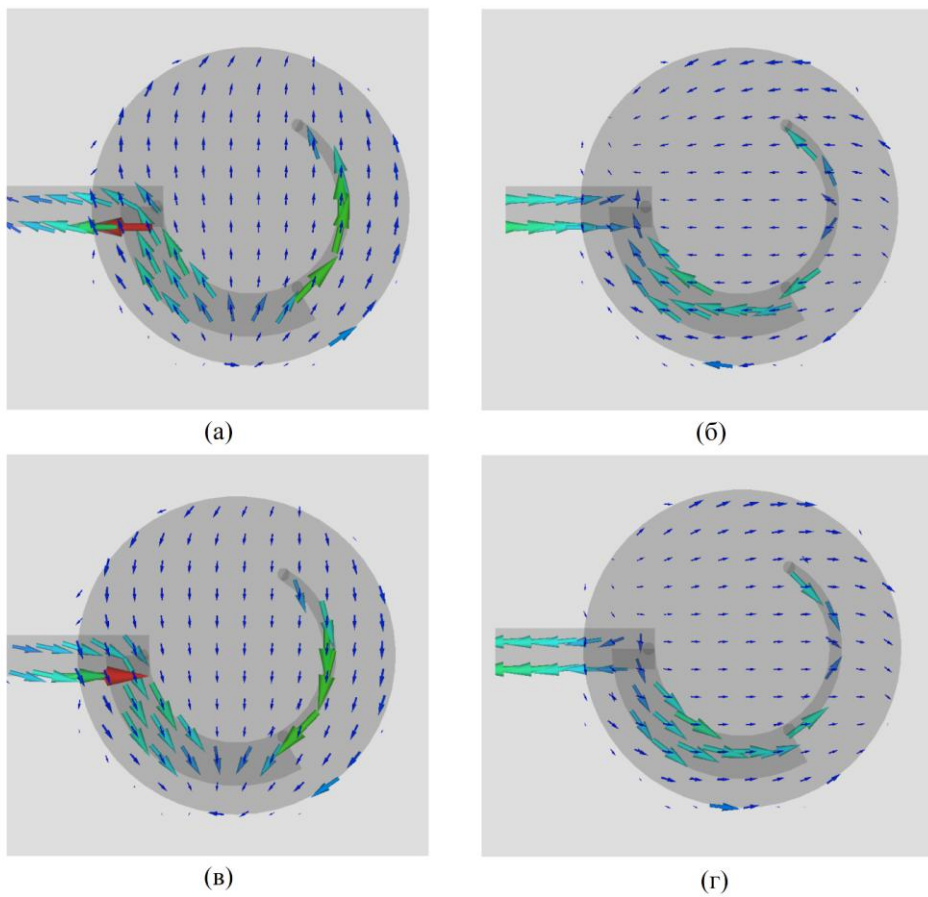


Рисунок 1.7 — Розподіл струмів на поверхні патчу в різні моменти часу;
а — 0° ; б — 90° ; в — 180° ; г — 270°

1.5 Результати моделювання елемента з лінійною поляризацією

Під час аналізу результатів головним критерієм було коефіцієнт узгодження одиничного елемента від частоти.

Грунтуючись на даних з рисунку 1.8, видно що навіть після оптимізації розмірів конструкції одиничного елемента не вдалося досягти потрібного узгодження в необхідній смузі частот.

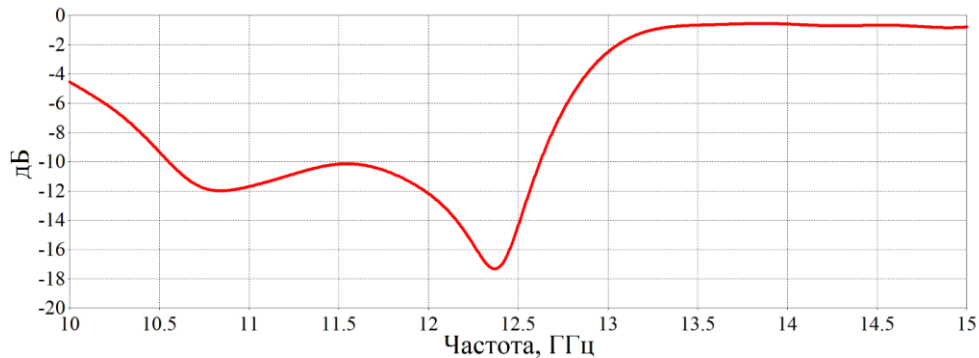


Рисунок 1.8 — Коефіцієнт відбиття від частоти

1.6 Висновки

В даному розділі представлені основні підходи до проектування одиничних елементів решітки, та різні способи досягнення колової поляризації. Розглянуто два типи конструкцій одиничного елемента і проведений порівняльний аналіз.

З рисунку 1.5 видно, що антена має потенціал для узгодження в широкій смузі частот, також можна побачити, що коефіцієнт еліптичності не перевищує 5 дБ. Також опираючись на розподіл струмів в антені в різні моменти часу, можна сказати що антена забезпечує колову поляризацію.

На основі вищепредставлених даних, а також конструктивних особливостей даних одиничних елементів, було прийняте рішення використовувати одиничний елемент з коловою поляризацією.

Примечание [OS4]: Краще вживати коеф еліптичності

2 ПРОЕКТУВАННЯ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

2.1 Обґрунтування конструкційних характеристик АР

Існують різні типи підводу живлення до одиничних елементів АР[13], ось деякі з них: послідовне живлення, паралельне живлення. Кожен з цих методів має набір переваг та недоліків.

Серед різних способів підводу живлення до елементів антенної решітки можна виділити два основних, послідовний та паралельний. Схематично ці дві схеми зображені на рисунку 2.1[14].

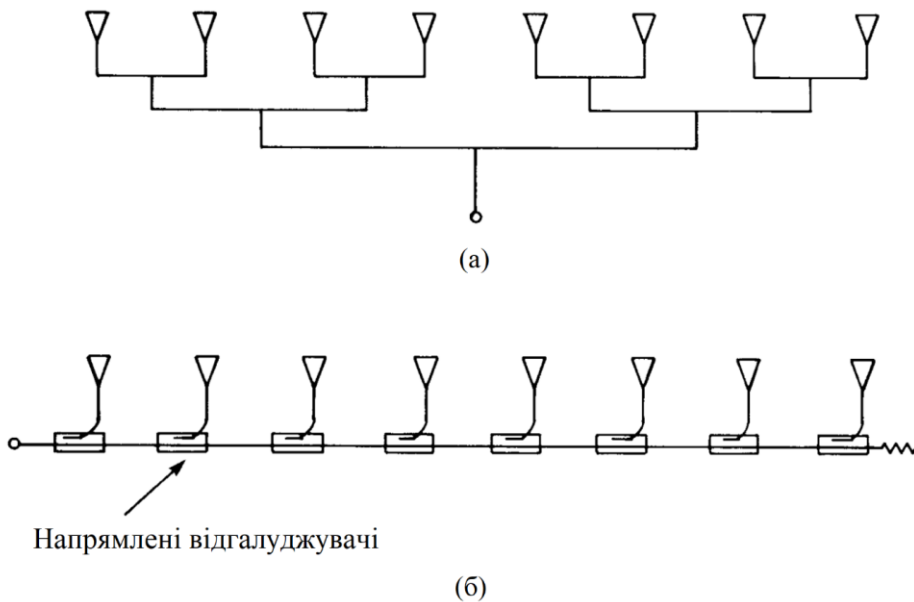


Рисунок 2.1 — Способи підведення живлення до елементів решітки; а — паралельний; б — послідовний

До переваг послідовного живлення можна віднести, компактність, простота виконання. До недоліків можна віднести те, що цей тип живлення є вузькосмуговим. Але оскільки, як зазначалось вище, що для отримання максимального підсилення і вузького ГП необхідно витримувати умову синфазності і рівноамплітудності. Тому зі зміною частоти фазовий набіг до

кожного елементу решітки буде змінюватись що буде негативно відображатись на ДС антени.

Основною перевагою паралельного живлення є широкосмуговість, так як при паралельному живленні відстань до кожного елементу решітки однакова, тому амплітуда і фаза хвилі, яка підходить до кожного з елементів є однаковою на кожній частоті.

Головним недоліком такого способу живлення є те, що він вносить більші втрати і є більш громіздким, що негативно впливає на ДС. Тому при фінальному моделюванні необхідно враховувати цей фактор.

Зважаючи на умови технічного завдання та наведені вище аргументи, був обраний паралельний метод живлення елементів решітки. Також конструкція багат шарової антени має перевагу в спрощенню підводу живлення по відношенню до одношарових плоских АР.

2.2 Вибір подільника потужності

Як зазначалось вище основним недоліком методу паралельного живлення є внесені втрати і вплив на ДС. Тому проведено вибір подільника потужності, який мінімізує ці негативні ефекти.

2.2.1 Огляд інсуючих конструкцій подільників

Існує багато видів подільників потужності: Вілкінсона, квадратурні гібридні, Т-подібні та різні його варіації, тощо[15].

Основною перевагою подільника Вілкінсона є те що його виходи ізольовані один від одного, що корисно в активних пристроях, проте є не доцільним для конкретної задачі.

Квадратурний гібридний подільник потужності, також не підходить для живлення елементів решітки, оскільки різниця фаз на його виходах становить 90 градусів, що є неприпустимим.

Т-подібний дільник є найпростішим варіантом реалізації подільника потужності, він має певні недоліки, такі як відсутність розв'язки між його ви-

ходами та ін. Проте його слід розглянути, оскільки він займає мало місця та має незначні втрати.

2.2.2 Моделювання T-подібного дільника

Конструкція класичного T-подібного дільника зображена на рис. 2.3(а).

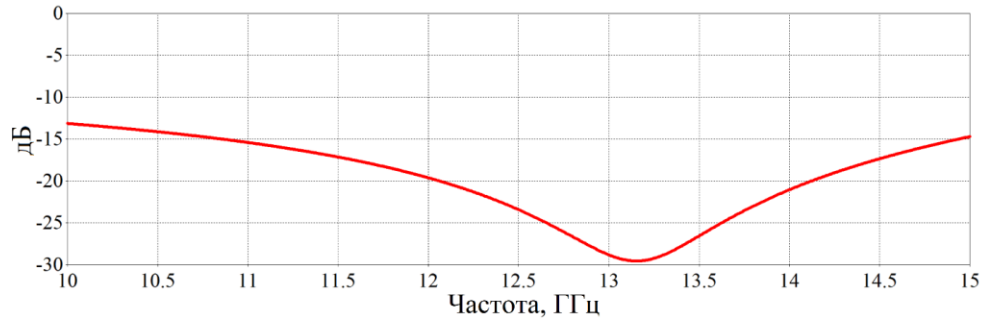


Рисунок 2.2 — Коефіцієнт відбиття T-подібного дільника

З рисунку 2.2 видно, що робоча смуга такого дільника досить широка, проте все ж таки є недостатньою, тому що на краях смуги коефіцієнт відбиття перевищує -15 дБ, що може негативно відобразитись на характеристиках антени, особливо при великій кількості елементів АР. Викорстання такого подільника приведе до неможливості масштабування антени.

2.2.1 Модифікація T-подібного дільника

Для покращення характеристик дільника була запропонована конструкція зображена на рис. 2.3(б). Також варто відміти що нова конструкція є більш компактною що є дуже важливо для інтеграції подільника в конструкцію антени.

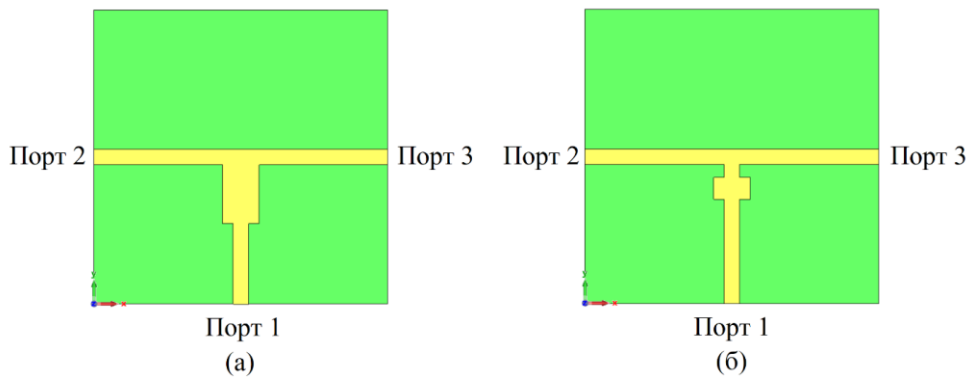


Рисунок 2.3 — Конструкція Т-подібних дільників; а — класичний; б — модифікований

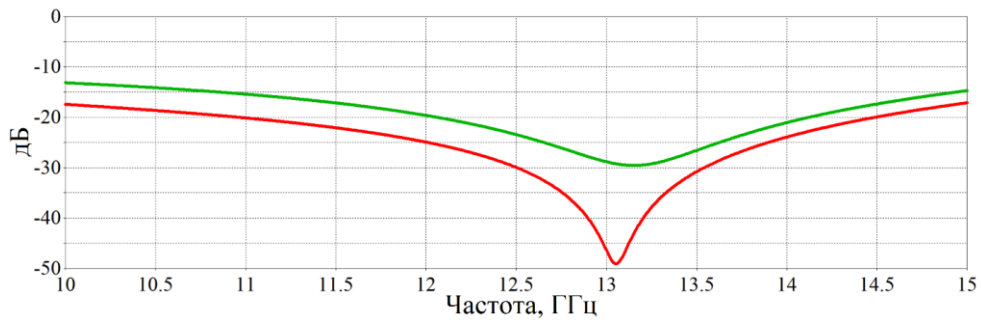


Рисунок 2.4 — Порівняння коефіцієнту відбиття в залежності від частоти Т-подібного дільника та його модифікації; червоний — модифікований Т-подібний дільник; зелений — класичний Т-подібний дільник

Опираючись на графік залежності коефіцієнту відбиття зображеного на рисунку 2.4, можна зробити висновок, що модифікований дільник має краще узгодження в необхідній смузі частот, з відси впливає що його вплив на узгодження AP є мінімальним.

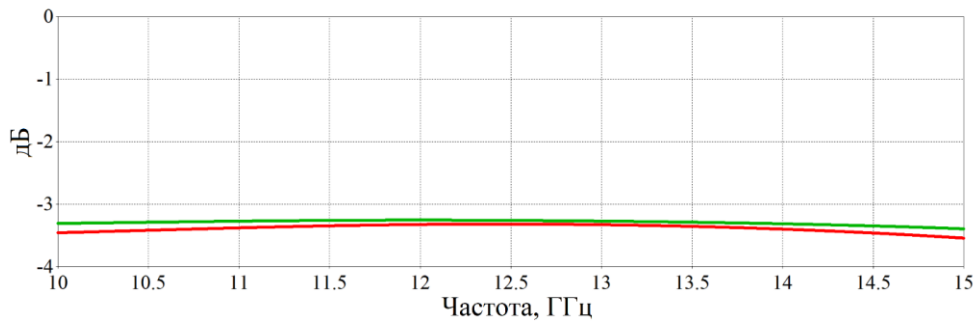


Рисунок 2.5 — Порівняння коефіцієнту передачі в залежності від частоти Т-подібного дільника та його модифікації; червоний — класичний Т-подібний дільник; зелений — модифікований Т-подібний дільник

З рисунку 2.5 видно, що втрати в модифікованому подільнику потужності менші, і майже досягають теоритично мінімальних (-3 дБ).

Зважаючи на вище наведені аргументи, був обраний модифікований Т-подібний дільник, оскільки він компактний, вносить мінімальні втрати і є простим у виконанні.

2.3 Узгодження антени з фідерним трактом

Для мінімізації впливу фідеру живлення на ДС, було прийняте рішення підводу живлення зі зворотньої сторони антени. Була запропонована конструкція, зображена на рисунку 2.6.

Варто зазначити що порт 2 і порт 3 мають хвильовий опір 50 Ом, а розрахунок фідерного тракту відбувався таким самим чином, як і розрахунок Т-подібного дільника, при умові, що хвильовий опір коаксіального кабелю 50 Ом.

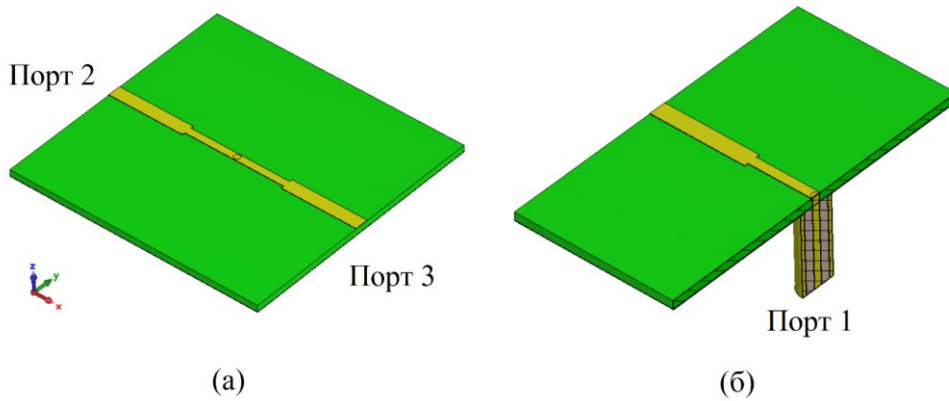


Рисунок 2.6 — Конструкція підводу живлення до АР; а — загальний вигляд; б — вигляд у розрізі

При електродинамічному моделюванні даної конструкції було досягнуто задовільного узгодження (коефіцієнт відбиття не перевищує -20 дБ в усій смузі частот).

2.4 Умови моделювання АР

Умови електродинамічного моделювання структури є дуже важливими, оскільки, всі підходи до проектування, а також наведені результати, є достовірними при умові, що була правильно побудована сітка, яка розбиває структуру, задані вірно граничні умови, тощо.

2.4.1 Розбиття структури на комірки

На відмінну від тетраїдальної сітки, при використанні паралелепіпедної сітки, слід уважно підходити її кроку, оскільки паралелепіпедна сітка гірше апроксимує криволінійні границі.

Загальне розбиття структури склало 30 комірок на довжину хвилі, що в загальному випадку достатньо, проте для підвищення точності в деяких вузлах структури, необхідно змінити розбиття структури.

Для коректних обрахунків поверхневих струмів у зондах, що живлять патчі, було штучно збільшено кількість комірок, як вказано на рисунку 2.7(а).

Також для більш точного розрахунку рекомендується збільшити густоту комірок в місцях з високою напруженістю електричного поля, наприклад у діелектричній підкладці. Згідно з технічної документації на САПР рекомендується від 2 до 5 комірок на товщину діелектричної підкладки.

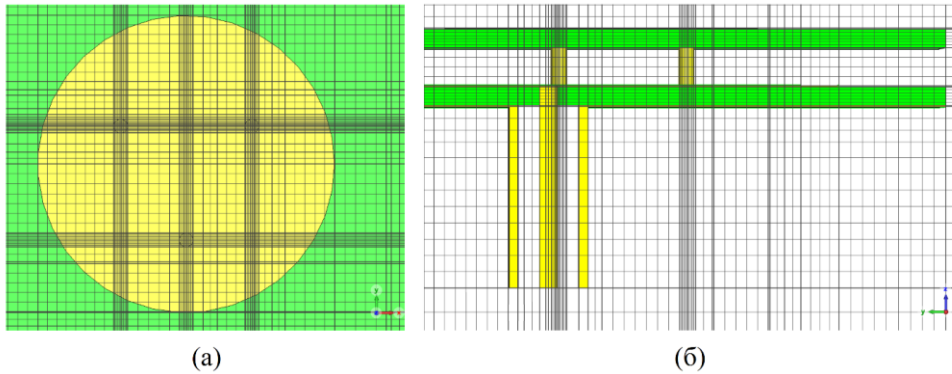


Рисунок 2.7 — Вигляд сітки; а — розбиття зондів ; б — розбиття діелектричної підкладки

2.4.1 Граничні умови

Оскільки структура випромінююча то для отримання достовірних результатів необхідно обрати відкриті границі структури, які будуть поглинати всю енергію, яка до них надходить, що буде еквівалентно антені у відкритому просторі.

2.5 Результати моделювання AP

Після того як окремо були порашовані всі ключові вузли конструкції, проведено електродинамічне моделювання усієї AP, вигляд якої зображений на рисунку 2.8.

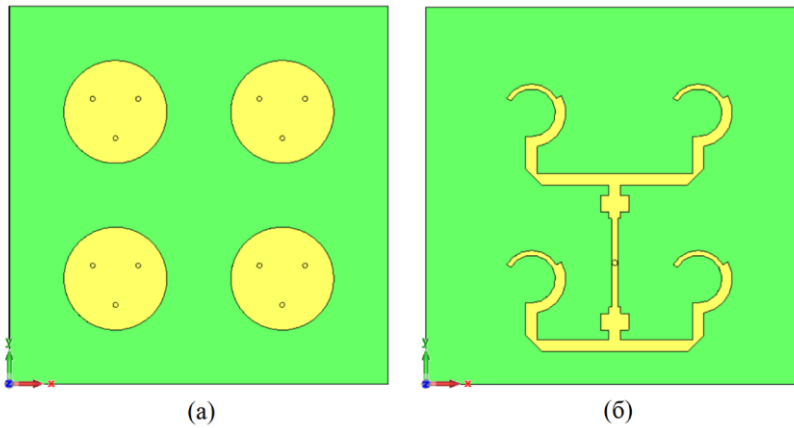


Рисунок 2.8 — Модель АР; а — верхня друкована плата; б — нижня друкована плата

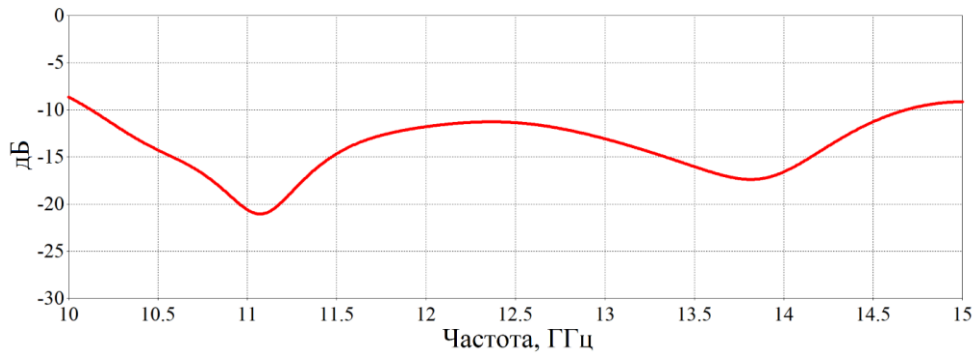


Рисунок 2.9 — Коефіцієнт відбиття від вхідного тракту АР в залежності від частоти

На рисунку 2.9 наведена залежність коефіцієнту відбиття від частоти, з якого можна побачити, що на даному етапі АР ще не є задовільною.

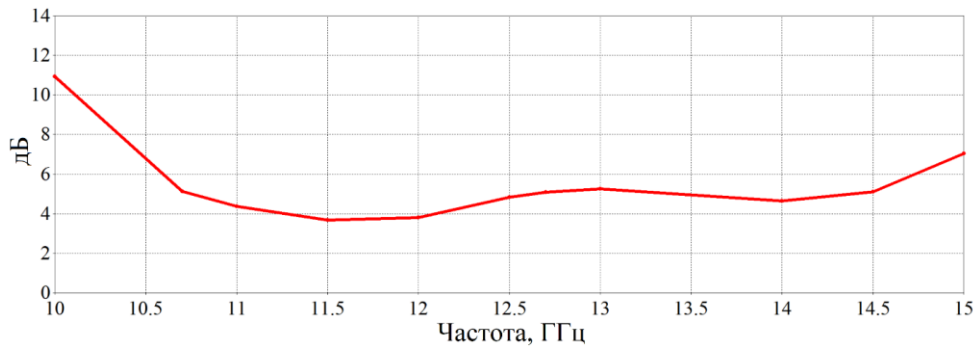


Рисунок 2.10 — Коефіцієнт еліптичності в залежності від частоти

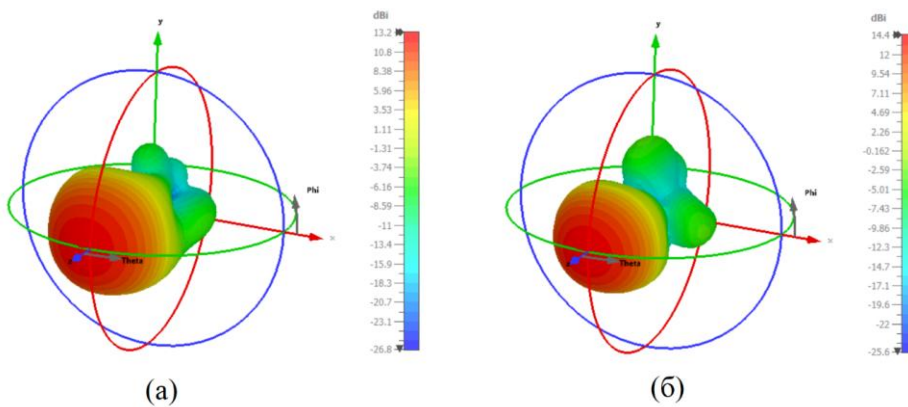


Рисунок 2.11 — Діаграма спрямованості АР; а — на частоті 12 ГГц; б — на частоті 14 ГГц

2.6 Висновки

У даному розділі було розглянуті основні підходи до конструювання АР, системи живлення одиничних елементів та врахування крайових ефектів. Наведені приклади основних конструкційних вузлів та вказані їх переваги та недоліки, проведений кількісний аналіз. Наведені результати моделювання АР (рисунок 2.9 — 2.11).

Якісно аналізуючи ДС антенної решітки на рисунку 2.11 можна побачити, що підходи до проектування, які були описані вище, вірні, оскільки ДС

має один чітко виражений максимум, низький рівень БП, головний пелюсток направлений перпендикулярно площині антени.

Проте, навіть при такому детальному підході до конструювання антенної решітки, можна побачити, що результати моделювання не відповідають вимогам. Це проявляється за рахунок впливу елементів решітки один на одного, та за рахунок певної неузгодженості вузлів між собою (подільників). А саме не досягнуто необхідного рівня колової поляризації, що можна побачити з рисунку 2.10. Тому конструкція АР потребує оптимізації.

Примечание [OS5]: Незавершене, або неправильно сформоване речення

3 ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Оптимізація є важливим етапом у проектуванні та розробці антен, оскільки дозволяє покращити їх характеристики та забезпечити задані параметри роботи. Зазвичай, антени мають складну форму та багато параметрів, що ускладнює оптимізацію. Однак, застосування математичної оптимізації дозволяє знайти оптимальні значення параметрів антени, що відповідають заданим вимогам[16].

3.1 Вибір методу оптимізації

Існує багато різних методів оптимізації, які можуть використовуватися для покращення характеристик антен. Деякі з найпоширеніших методів оптимізації включають в себе:

- Метод перебору (Exhaustive search): цей метод полягає в тому, щоб перебрати всі можливі комбінації параметрів антени і вибрати ту, яка дає найкращі результати. Цей метод простий в реалізації, але зазвичай потребує багато часу і обчислювальних ресурсів.
- Градієнтний метод (Gradient descent): цей метод використовує градієнт функції втрат для пошуку мінімуму. Цей метод може бути швидким, але може застрягнути в локальному мінімумі[17].
- Метод Нелдера-Міда (Nelder-Mead method): цей метод є ітераційним методом оптимізації, який здійснює зміщення, розширення і скорочення симплексу для пошуку мінімуму. Цей метод ефективний для випадків, коли функція має багато локальних мінімумів.
- Метод Trust Region Framework: цей метод комбінує в собі підхід градієнтного методу з підходом симплекс-методу. Він

використовує техніку довірчої області для забезпечення швидкості та збіжності до глобального мінімуму[18].

- Генетичний алгоритм, який базується на моделі Дарвіна, та вирізняється з поміж інших методів тим, що може приводити до нестандартних рішень[19].

Для оптимізації був обраний метод Trust Region Framework, оскільки він досить ефективний для задач з оптимізації антенного дизайну, оскільки базується на пошуку мінімуму функції в обмеженому регіоні. Це дозволяє забезпечити роботу алгоритму в обмеженому діапазоні параметрів, про що свідчить значна кількість наукових статей за цією тематикою[20], [21]. Крім того, цей метод може бути ефективним для задач з обмеженою кількістю обчислювальних ресурсів, оскільки він використовує мінімальну кількість обчислень для оцінки результуючої функції.

На сьогоднішній день, найпоширеніші методи оптимізації вже в будовані в різні САПР і метод Trust Region Framework не є виключенням.

3.2 Вибір параметрів для оптимізації

Початкове значення параметрів, які будуть піддаватись оптимізації є дуже важливе, тому що такі методи оптимізації як градієнтний метод, метод Trust Region Framework добре працюють в околі мінімуму цільової функції. Для алгоритму оптимізації було задано 3 критерії:

- Коефіцієнт відбиття не має перевищувати -15 дБ в діапазоні частот 10,7 — 12,7 ГГц
- Коефіцієнт відбиття не має перевищувати -20 дБ в діапазоні частот 14 — 14,5 ГГц
- Коефіцієнт еліптичності не має перевищувати значення 5 дБ в діапазоні частот 10,7 — 12,7 ГГц та 14 — 14,5 ГГц

Діапазон зміни параметрів оптимізації був заданий 60% від початкового значення.

В таблиці 1, наведені параметри оптимізації, їх початкові значення та значення, які були отримані після оптимізації.

Примечание [OS6]: Треба вказати в тексті який був критерій оптимізації і в якому діапазоні в % змінювались параметри

Таблиця 1

Параметр	Опис	Початкове значення	Кінцеве значення
h_air	Повітряний прошарок між ДП	1 [мм]	1,6 [мм]
D	Діаметр патчу (рис. 1.2)	9,27 [мм]	8,68 [мм]
W1	Шимина мікросмужки (рис. 1.2)	0,94 [мм]	1,17 [мм]
W2	Шимина мікросмужки (рис. 1.2)	0,43 [мм]	0,44 [мм]
R	Радіус мікросмужки (рис. 1.2)	2,15 [мм]	2,08 [мм]
W1T	Ширина шлейфу (2.3(б))	2,5 [мм]	2,33 [мм]
L1T	Довжина шлейфу (2.3(б))	1,5 [мм]	1,4 [мм]

3.3 Аналіз отриманих результатів

Оскільки початкова точка для оптимізатора була вибрана в околі мінімуму цільової функції, математичний алгоритм досить швидко прийшов в точку оптимуму, про що свідчить незначна кількість викликів функції (160 викликів) зробленої оптимізатором. Нижче наведені результати оптимізації в порівнянні з початковими результатами.

Примечание [OS7]: Якось це перефразувати

Примечание [OS8]: Яка?

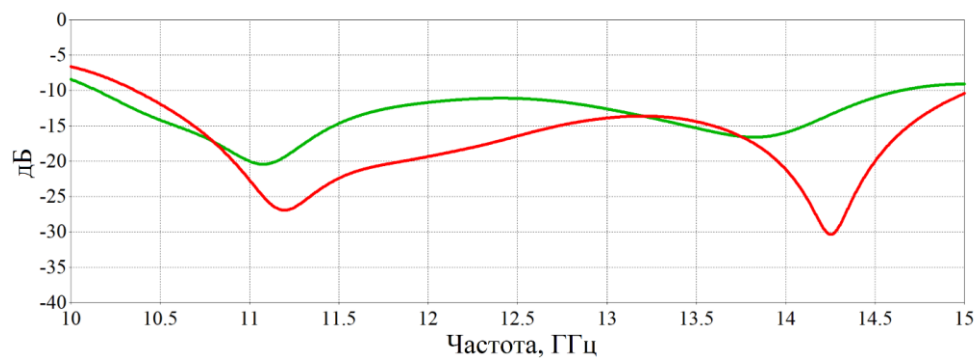


Рисунок 3.1 — Порівняння коефіцієнту відбиття від вхідного тракту АР в залежності від частоти

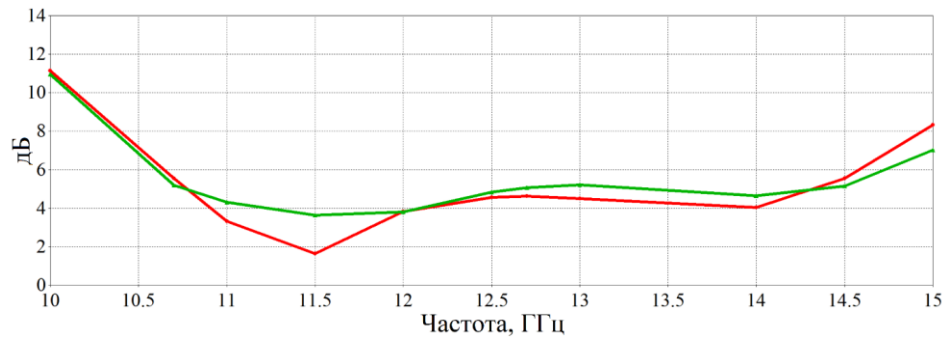


Рисунок 3.2 — Порівняння коефіцієнту еліптичності в залежності від частоти

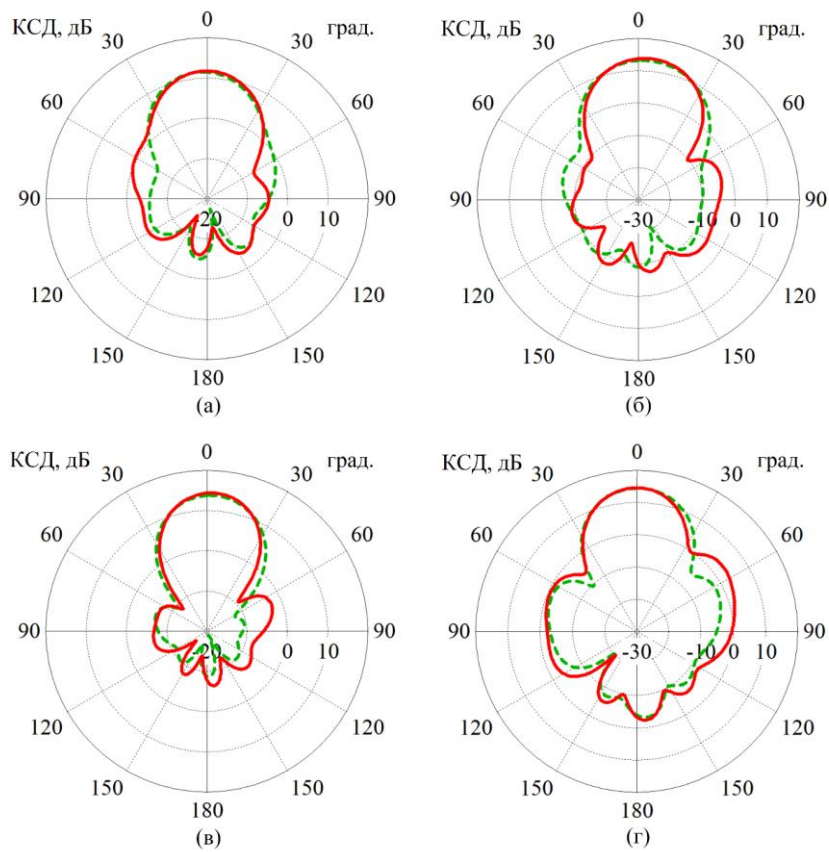


Рисунок 3.3 — Діаграма спрямованості АР в площині zOx , для початкової моделі (зелений графік) та після оптимізації (червоний графік); а — на частоті 10,7 ГГц; б — на частоті 12 ГГц; в — на частоті 12,7 ГГц; г — на частоті 14,5 ГГц

Для рисунків 3.1 — 3.4 зелений графік відповідає результатам електродинамічної симуляції початкової моделі, а червоний — результатам симуляції після застосування методу математичної оптимізації.

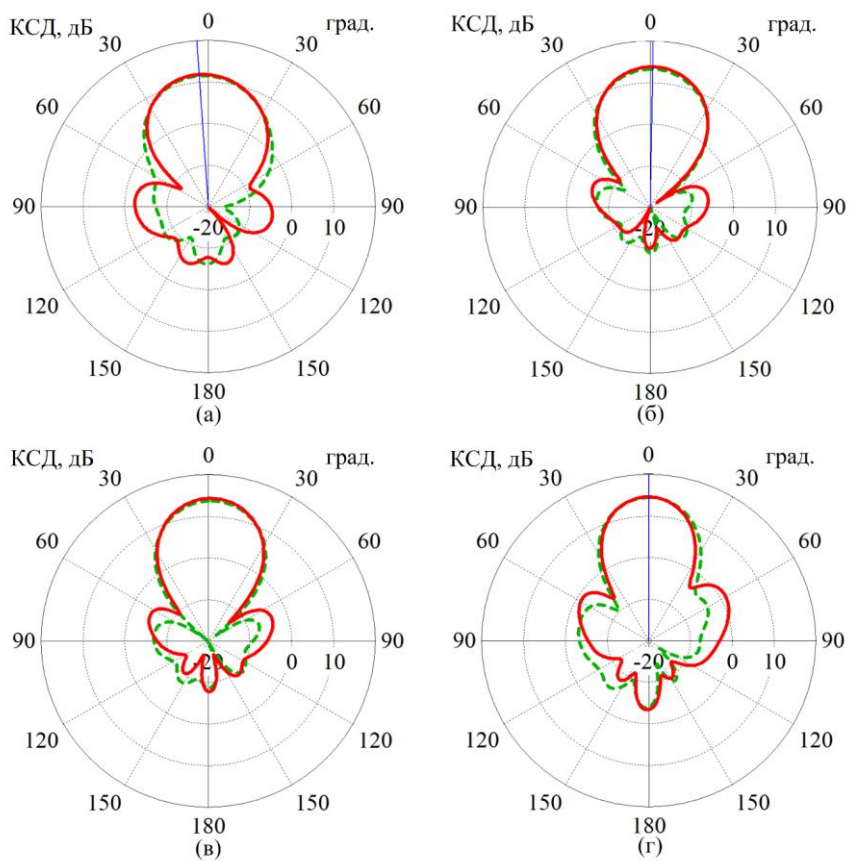


Рисунок 3.4 — Діаграма спрямованості АР в площині zOy , для початкової моделі (зелений графік) та після оптимізації (червоний графік); а — на частоті

10,7 ГГц; б — на частоті 12 ГГц; в — на частоті 12,7 ГГц; г — на частоті 14,5 ГГц

З рисунку 3.2 видно, що рівень еліптичності складає менше 5 дБ у всій робочій смузі частот, низька чутливість коефіцієнту поляризації одна з переваг даної конструкції патчу.

На рисунках 3.3 — 3.4 продемонстровані перерізи діаграм спрямованості в двох площинах, видно що ГП став вужчим в обох площинах. Ширина ГП в площинах zOx та zOy наведені в таблиці 2.

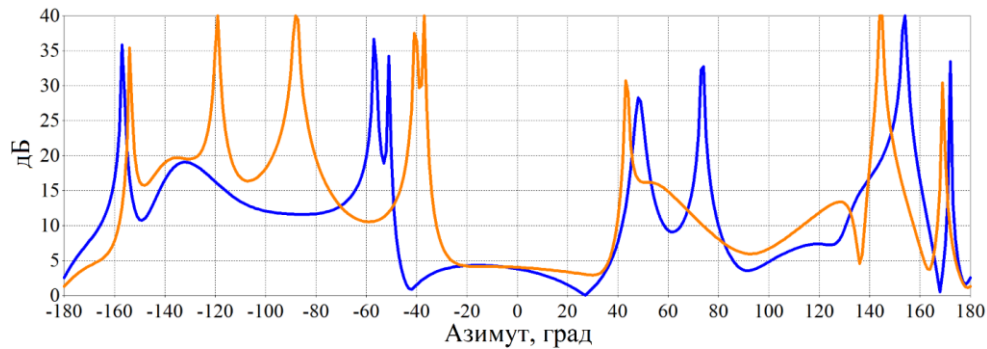


Рисунок 3.5 — Коефіцієнт еліптичності AP в площині zOy ; синій графік — 12 ГГц; помаранчевий графік — 14 ГГц

На рисунку 3.4 видно, що незначне відхилення напрямку головного випромінювання від перпендикулярного до площини AP. Це пов'язано з впливом впромінням ЕМХ з лінії передачі, опис того, як мінімізувати цей вплив був наведений в попередньому розділі.

Як видно на вищих частотах рівень бічних пелюсток зріс незначним чином, але все ж знаходиться на допустимому рівні. Рівень бічних пелюсток коливається в залежності від частоти і складає від -15 дБ до -11 дБ в найгіршому випадку.

Примечание [OS9]: Вказати який саме рівень

Таблиця 2

Частота	Ширина ДС zOx	Ширина ДС zOy
10,7 ГГц	42,5°	45,6°
12 ГГц	36,6°	38,6°
12,7 ГГц	35,1°	36°
14,5 ГГц	31°	31,2°

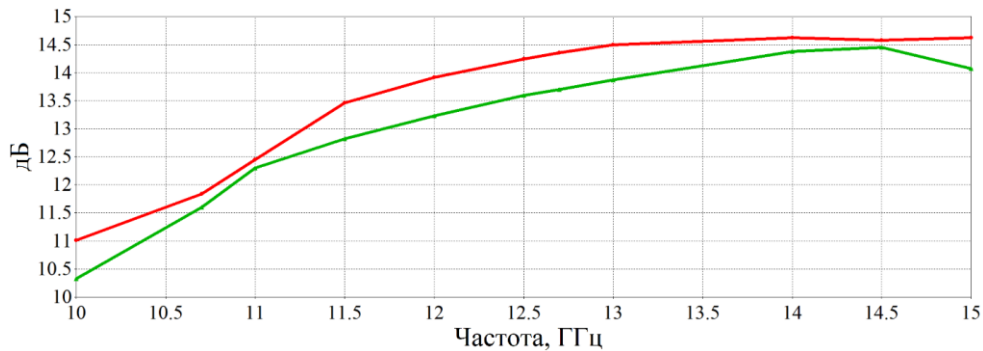


Рисунок 3.6 — Залежність підсилення AP від частоти; зелений графік — результат симуляції початкової моделі; червоний — результат симуляції після застосування методу математичної оптимізації

Кількісно аналізуючи дані з рисунку 3.6, видно що підсилення у оптимізованої AP більше ніж у початкової моделі, варто відмітити що ці дані корелюють з даними про ДС, чим вузьчий ГП, тим вище підсилення у напрямку головного випромінювання.

Таку нерівномірність підсилення в області робочих частот можна пояснити тим, що на вищих частотах лінійні розміри антени стали більшими по відношенню до довжини хвилі.

Для оцінки підсилення AP, ватро розрахувати теоретичне підсилення для апертурної антени таких розмірів. Теоретично розраховане підсилення такої антени з коефіцієнтом використання площі 0.8:

$$G = \frac{4\pi \cdot 37^2 \cdot 0.8}{25^2} = 13,5 \text{ [дБ]} \quad (3.1)$$

Важливою характеристикою антен є внесені втрати. Ця характеристика стає більш критичною з підвищенням робочої частоти, тому що для мікросмужки і для мікросмужкових патч антен втрати зростають з підвищенням частоти в основному за рахунок втрат в діелектрику. Одним із способів зменшення внесених втрат, є використання в якості підкладки діелектрику з низьким тангенсом кута діелектричних втрат ($\text{tg } \delta$). Іншим методом зменшення втрат є заміна класичної мікросмужкової лінії передач на інший тип лінії передач, але в даній роботі цей варіант не розглядався, через технологічну складність.

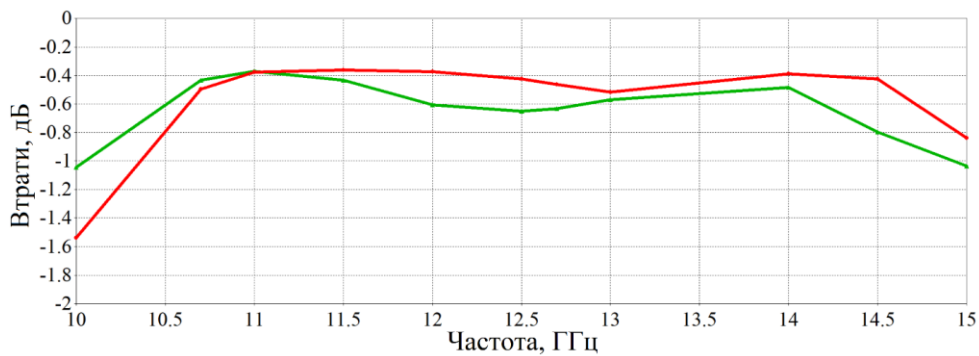


Рисунок 3.7 — Активні втрати енергії в НВЧ структурі; зелений графік — результат симуляції початкової моделі; червоний — результат симуляція після застосування методу математичної оптимізації

3.4 Висновки

В цьому розділі наведені різні методи математичної оптимізації, які в тому числі можуть використовуватись для оптимізації НВЧ структур, в даному випадку — антени. Продемонстровані переваги та недоліки кожного з методів математичної оптимізації, та обґрунтований вибір методу Trust Region Framework.

Наведені досягнуті характеристики, а також порівняння характеристик АР до оптимізації та після. Опираючись на отримані дані, можна зробити висновок, що модель АР відповідає умовам технічного завдання.

ВИСНОВКИ

В даній дипломній роботі було проведено електродинамічне моделювання і експериментальне дослідження антенної решітки з коловою поляризацією для супутникового зв'язку, діапазону 10,7 — 12,7 ГГц та 14 — 14,5 ГГц.

Результати моделювання антенної решітки:

- КСД на частоті 12 ГГц складає 14 дБ
- Ширина головної пелюстки коливається в діапазоні від 30° до 45°
- Внесені втрати менше 0,5 дБ

Науковою новизною роботи є:

- досягнення колової поляризації із коефіцієнтом еліптичності краще 5 дБ в широкій смузі частот від 10.7 до 14.5 ГГц та в широкому діапазоні кутів від -27 до +37 градусів для решітки 2x2.
- дизайн подільника, що забезпечує коефіцієнт відбиття кращий за -20 дБ в широкосмуговому діапазоні від 10.7 до 14.5 ГГц.

Також в даній роботі наведені основні підходи до проектування АР такого типу. Наведені переваги застосування методів математичної оптимізації.

Розглянута в даній дипломній роботі антена є прототипом, і щоб використовувати таку антенну решітку для практичних застосувань, її необхідно масштабувати за для збільшення підсилення і звуження ГП. Проте такого прототипу достатньо для демонстрації всіх переваг цієї конструкції антени.

Примечание [e10]: дорацювати

Примечание [OS11]: Додати наукову новизну, про коеф еліптичності, дизайн подільника

Примечание [OS12]: ?

Примечание [OS13]: Додати, що в перспективі буде використовуватись для ФАР

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

Примечание [e14]: Має бути близько 20 джерел

1. Канарейкин Д. Б., Павлов Н. Ф., Потехин В. А. Поляризация радиолокационных сигналов. – М., 1966.
2. A. Chen, Y. Zhang, Z. Chen, and C. Yang, Development of a Ka-band wideband circularly polarized 64-element microstrip antenna array with double application of the sequential rotation feeding technique, *IEEE Trans Antennas Propag* 10 (2011), 1270–1273.
3. Y. -X. Guo, L. Bian and X. Q. Shi, "Broadband Circularly Polarized Annular-Ring Microstrip Antenna," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 8, pp. 2474-2477, Aug. 2009, doi: 10.1109/TAP.2009.2024584.
4. F. Ferrero, C. Luxey, G. Jacquemod and R. Staraj, "Dual-band circularly polarized microstrip antenna for satellite applications," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 4, pp. 13-15, 2005, doi: 10.1109/LAWP.2004.841622.
5. Mirko Barbuto Fabrizio Trotta Filiberto Bilotti Alessandro Toscano , "Circular Polarized Patch Antenna Generating Orbital Angular Momentum," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 148, 23-30, 2014.
6. J. -Y. Sze and W. -H. Chen, "Axial-Ratio-Bandwidth Enhancement of a Microstrip-Line-Fed Circularly Polarized Annular-Ring Slot Antenna," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 7, pp. 2450-2456, July 2011, doi: 10.1109/TAP.2011.2152314.
7. Fartookzadeh, M. and Armaki, S.H.M. (2014), Serial-feed for a circular patch antenna with circular polarization suitable for arrays. *Int J RF and Microwave Comp Aid Eng*, 24: 529-535.
8. B. Wang, X. Q. Lin, L. Y. Nie and D. Q. Yu, "A Broadband Wide-Scanning Planar Phased Array Antenna With Equivalent Circuit

- Analysis," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2154-2158, Dec. 2020, doi: 10.1109/LAWP.2020.3025340.
9. B. Wang, X. Q. Lin, L. Y. Nie and D. Q. Yu, "A Broadband Wide-Scanning Planar Phased Array Antenna With Equivalent Circuit Analysis," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2154-2158, Dec. 2020, doi: 10.1109/LAWP.2020.3025340.
 10. Pozar, D. M., 2011, *Microwave Engineering* (John Wiley & Sons, Inc.), 4th ed. Edition
 11. I. Munteanu and I. Hänninen, "Recent advances in CST STUDIO SUITE for antenna simulation," 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Prague, Czech Republic, 2012, pp. 1301-1305, doi: 10.1109/EuCAP.2012.6206600.
 12. F. Hirtenfelder, "Effective Antenna Simulations using CST MICROWAVE STUDIO®," 2007 2nd International ITG Conference on Antennas, Munich, Germany, 2007, pp. 239-239, doi: 10.1109/INICA.2007.4353972.
 13. Aram, M.G. *Antenna Design, Radiobiological Modelling, and Non-Invasive Monitoring for Microwave Hyperthermia*. Licentiate Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2021.
 14. R. J. Mailloux, *Phased array antenna handbook*. Artech house, 2005.
 15. Branner, George R. "Power Dividers." *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering* (1999): 1-14.
 16. Bakr, Mohamed. *Nonlinear optimization in electrical engineering with applications in matlab*. The Institution of Engineering and Technology, 2013.
 17. Ruder, Sebastian. "An overview of gradient descent optimization algorithms." *arXiv preprint arXiv:1609.04747* (2016).
 18. Rafiei, Mina, and Luis A. Ricardez-Sandoval. "A trust-region framework for integration of design and control." *AIChE Journal* 66.5 (2020): e16922.

19. Mirjalili, Seyedali, and Seyedali Mirjalili. "Genetic algorithm." *Evolutionary Algorithms and Neural Networks: Theory and Applications* (2019): 43-55.
20. S. Koziel and S. D. Unnsteinsson, "Expedited Design Closure of Antennas by Means of Trust-Region-Based Adaptive Response Scaling," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 6, pp. 1099-1103, June 2018, doi: 10.1109/LAWP.2018.2834145.
21. Koziel, Slawomir, and Sigmar D. Unnsteinsson. "Expedited design closure of antennas by means of trust-region-based adaptive response scaling." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 17.6 (2018): 1099-1103.

ДОДАТОК А

ШИРОКОСМУГОВА СМУЖКОВА АНТЕНА З КОЛОВОЮ ПОЛЯРИЗАЦІЄЮ ДЛЯ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

Гергіль Є. Є.¹; Сушко О. Ю.¹, PhD.¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Сучасна радіотехніка висуває все більш вимогливі критерії для антен. Серед цих вимог, ультраширока смуга робочих частот, низькі втрати, низькі рівні кросполяризації, технологічність виготовлення, можливість масштабування для подальшого виробництва, та низька вартість. Часто оптимальним рішенням, що найповніше задовільняє вказані критерії є смужкові антени. Одним із основних недоліків смужкових антен є їх робоча смуга частот, яка складає кілька відсотків, що не задовільняє сучасні потреби. Проте, використання багат шарових смужкових антен, дозволяє розширити робочу смугу таких антен і привести у відповідність із потребами сучасних телекомунікаційних систем [1]. Проте такі антени часто мають значні втрати (за рахунок втрат в діелектрику), і мають конструктивні складнощі [2] у виготовленні (багат шарові друковані плати є складнішими у виготовленні та набір товщин діелектриків є строго обмеженим, що ускладнює оптимізацію конструкцій).

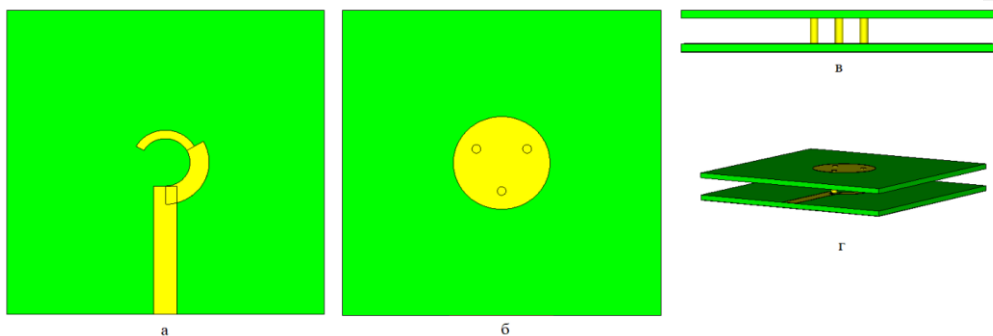


Рисунок 1 — Конструкція мікросмужкової антени; а – нижня друкована плата (вигляд зверху); б – верхня друкована плата (вигляд зверху); в – вигляд з боку; г – 3D модель мікросмужкової антени;

В даній роботі пропонується конструція антени, яка вирішує вищепераховані недоліки. Дана антена розрахована на роботу в діапазоні супутникового зв'язку 10.7-12.75 ГГц (узгодження не гірше -15 дБ) і має колову поляризацію, яка досягається за рахунок особливостей живлення цієї антени.

Головними перевагами є те, що антена складається з двох окремих двошарових друкованих плат, з'єднаних жорсткими провідниками, за рахунок використання повітряного зазору замість діелектрика зменшуються втрати у антені, досягається ширша смуга робочих частот [3], та є можливість варіювання повітряного зазору при моделюванні антени, що робить дану конструкцію більш придатною для оптимізації.

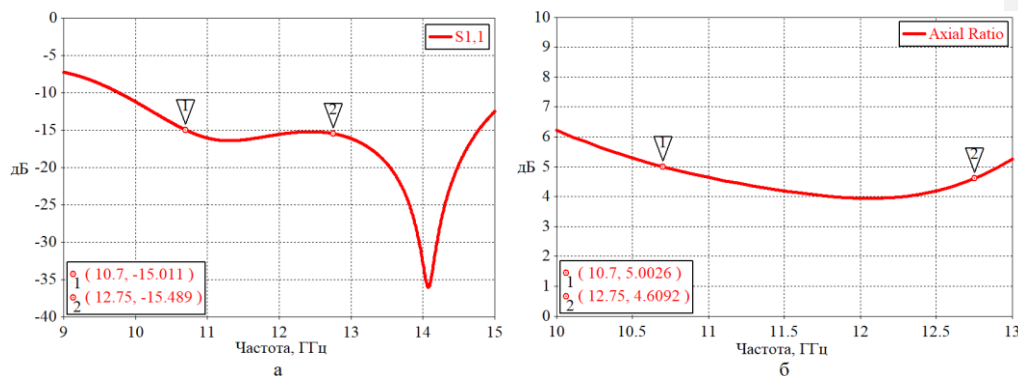


Рисунок 2 — Досягнуті характеристики смужкової антени; а - частотна залежність коефіцієнту відбиття S_{11} ; б - частотна залежність коефіцієнту еліптичності

Із рис. 2а видно, що данна антена узгоджена по рівню -15 дБ в широкій смузі частот від 10.7 до 14.7 ГГц. Для забезпечення надійності каналу зв'язку для телекомунікаційних систем (в тому числі Starlink [4]) використовується колова поляризація. Тому в даній роботі окремою вимогою крім узгодження є також забезпечення колової поляризації в широкому діапазоні кутів.

Даний коефіцієнт еліптичності досягнуто за допомогою оптимізації структури і має місце для кутів діаграми спрямованості від -40 до +40 градусів.

Оскільки при виготовленні даної антени дотримання відповідного повітряного зазору є найменш точним параметром, проведено дослідження його впливу на узгодження антени.

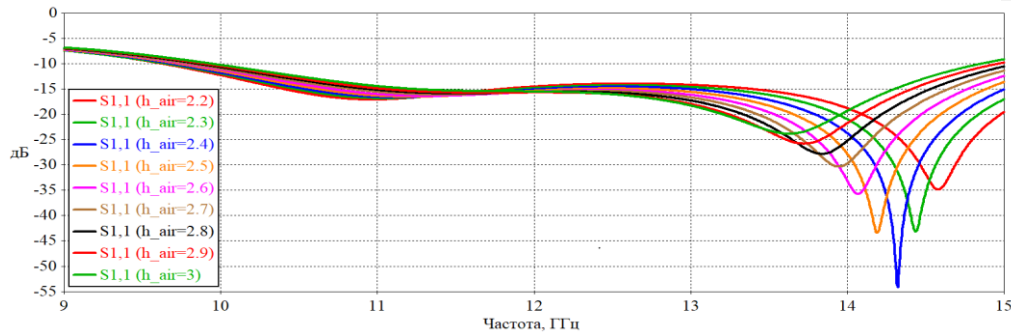


Рисунок 3 — Сімейство частотних залежностей коефіцієнту відбиття S_{11} для різних товщин повітряного зазору

З рисунку 3 видно, що коефіцієнт відбиття слабо залежить від товщини повітряного зазору, що в свою чергу зменжує вимоги до виготовлення антени.

Висновки

В даній роботі виконано електродинамічне моделювання та оптимізація антени для супутникового зв'язку. Перевагами даної антени є малі втрати, а саме 0.3 дБ (втрати на відбиття від входу та діелектричні втрати) та простота виготовлення. В результаті смуга робочих частот склала 10.7 — 12.75 ГГц, та коефіцієнт еліптичності не більше 5 дБ в межах кутів -40...+40°.

Перелік посилань

1. Гергіль Є. Є., Сушко О. Ю., Моделювання широкосмугових смужкових антен Ку-діапазону для супутникового зв'язку.
2. Y. Jia, Y. Liu, and S. Gong, "Slot-coupled broadband patch antenna," *Electron. Lett.*, vol. 51, no. 6, pp. 445-447, 2015.
3. Gildas P. Gauthier, Alan Courta, and Gabriel M. Rebeiz, MICROSTRIP ANTENNAS ON SYNTHESIZED LOW DIELECTRIC-CONSTANT SUBSTRATES; *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, VOL. 45, NO. 8, AUGUST 1997

4. Elham Baladi, Min Yin Xu, Nicolas Faria, Jeff Nicholls and Sean V. Hum, Dual-Band Circularly Polarized Fully Reconfigurable Reflectarray Antenna for Satellite Applications in the Ku Band, DOI 10.1109/TAP.2021.3090577, IEEE

Анотація

В даній статті проведено електродинамічне моделювання та оптимізація багатошарової смужкової антени з коловою поляризацією, для діапазону частот 10.7 – 12.75 ГГц (узгодження краще за -15 дБ по параметру S11 спостерігається в смузі від 10.7 до 14.7 ГГц). Отриманий коефіцієнт еліптичності не більше 5 дБ в робочій смузі частот в діапазоні кутів -40...+40°.

Ключові слова: смужкова антена, широка смуга робочих частот, Ku-діапазон.

Abstract

In this paper, the electrodynamic simulation and optimization of a multilayer strip antenna with circular polarization for the chat range of 10.7 - 12.75 GHz (matching better than -15 dB on the parameter S11 is observed in the band from 10.7 to 14.7 GHz). The obtained ellipticity factor is not more than 5 dB in the operating frequency band in the range of angles -40...+40°.

Keywords: strip antenna, wide operating frequency band, Ku-band.