

**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-професійною програмою

«Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему: «Широкопasmової мікросмужкова антена міліметрового діапазону»

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи РІ-11мп

Волинець Олександр Васильович _____

Керівник:

Доцент, к.т.н.

Василенко Дмитро Олексійович _____

Рецензент:

Ст.викладач,

Турєєва Ольга Василівна _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент (-ка) _____

Київ – 2023

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-професійна програма - «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Сергій МАРТИНЮК

«_ 5 _» _вересня_ 2022р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Волинцю Олександрю Васильовичу

1. Тема дисертації «Широкопasmовa мiкрoсмужковa антeнa мiлiмeтpовoгo дiапaзoну», науковий керiвник дисертацiї Василенко Дмитро Олексiйович, к.т.н., доц.,

затвердженi наказом по унiверситету вiд «_ 09 _» _листопада_ 2022 p.
№ _4137-с_

2. Термiн подання студентом дисертацiї 12 грудня 2022 p.

3. Об'єктом дослідження є метод бджолиного рою в задачах випромінювання, прийому та передачі електромагнітних хвиль антeнaми мiлiмeтpовoгo дiапaзoну хвиль.

4. Вихiднi данi Мiкрoсмужковa антeнa для дiапaзoну частот 57-64 ГГц iз кусочно-лiнiйною апроксимацiєю профiлю для використання у MIMO антeнних системах.

5. Перелiк завдань, якi потрiбно розробити

- Зробити огляд мiкрoсмужкових антeн мiлiмeтpовoгo дiапaзoну частот iз розмірами, що не перевищують половину довжини хвилі i придатні для застосування у MIMO антeнних системах;

- зробити огляд лiтератури i визначити, якi методи глобальної оптимiзацiї найкраще пiдходять для оптимiзацiї характеристик широкопasmових мiкрoсмужкових антeн;

- вибрати алгоритм оптимізації і дослідити залежність між параметрами алгоритму і швидкістю проведення синтезу антени;
- Визначити чутливість характеристик антени до кількості точок, що використовуються для апроксимації профілю антени;
- Підготувати креслення антени.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

Необхідно виконати креслення оптимізованої антени. Серед ілюстративного матеріалу обов'язково мають бути діаграма спрямованості і коефіцієнт відбиття антени, графіки залежності характеристик антени від кількості точок на профілі, графіки залежності швидкості синтезу від налаштувань алгоритму

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Дата видачі завдання 5 вересня 2022р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд антен і методів синтезу	5.09 – 30.09	
2	Проведення необхідних налаштувань алгоритму, програмування цільової функції, створення моделі антени	3.10-14.10	
3	Проведення синтезу антен при різних налаштуваннях алгоритму	17.10-18.11	
4	Підготовка необхідних креслень, оформлення дисертації	21.11- 2.12	
5	Завершення оформлення дисертації	4.12 – 11.12	

Студент

Олександр ВОЛИНЕЦЬ

Науковий керівник

Дмитро ВАСИЛЕНКО

РЕФЕРАТ

Магістерська робота складається з 70 сторінок, вона має 4 розділи, 36 ілюстрацій, 10 формул, 22 таблиці і 20 джерела в переліку посилань.

Актуальність. Розробка мікросмужкової антен в міліметровому діапазоні частот (57-64 ГГц) є маловивченою, але перспективною сферою оскільки в ній є великі потенційні можливості використання для передачі інформації і розвитку радарних систем.

Метою роботи є чисельний розрахунок профіля мікросмужкової антени та її оптимізація, задля досягнення широкої робочої смуги частот.

Задачі:

- зробити огляд мікросмужкових антен міліметрового діапазону частот із розмірами, що не перевищують половину довжини хвилі і придатні для застосування у MIMO антенних системах;
- зробити огляд літератури і визначити, які методи глобальної оптимізації найкраще підходять для оптимізації характеристик широкосмужкових мікросмужкових антен;
- вибрати алгоритм оптимізації і дослідити залежність між параметрами алгоритму і швидкістю проведення синтезу антени;
- визначити чутливість характеристик антени до кількості точок, що використовуються для апроксимації профілю антени;
- підготувати креслення антени.

Для вирішення поставлених завдань будуть використані чисельні пакетні розрахунки за допомогою комп'ютерних програм; конструювання антени в середовищі CST; порівняльний аналіз можливостей алгоритмів оптимізації.

Отримані результати: здійснена оптимізація мікросмужкової антени міліметрового діапазону за допомогою алгоритму бджолиного рою. Розраховані геометричні, частотні, діелектричні характеристики мікросмужкової антени

міліметрового діапазону та діаграми спрямованості. Сформований стартап проект щодо розробці дизайну мікросмужкової антени.

Результати роботи матимуть можливе впровадження у різні радарні систем і системи зв'язку.

Методи вирішення. Для вирішення поставлених завдань будуть використані чисельні пакетні розрахунки за допомогою комп'ютерних програм; конструювання антени в середовищі CST; порівняльний аналіз можливостей алгоритмів оптимізації.

Очікувані результати. Ефективний алгоритм оптимізації мікросмужкової антени міліметрового діапазону; геометричні, частотні, діелектричні характеристики мікросмужкової антени міліметрового діапазону. Стартап проект.

Можливі галузі застосування результатів роботи. Радарні систем і систем зв'язку.

Власний внесок. Огляд сучасної літератури; проведення обчислень і розрахунків, конструювання антени, розробка стартап проекту і формування висновків.

Використані ресурси. Літературні дані (наукова періодика), сформований алгоритм (АБР в середовищі Matlab), CST, онлайн калькулятор від Roogers.

Ключові слова: широкосмугова антена, профільована мікросмужкова антена, алгоритм бджолиного рою.

ABSTRACT

The master's thesis consists of 70 pages, it has 4 chapters, 36 illustrations, 10 formulas, 22 tables and 20 sources in the list of references.

Topicality. The development of microstrip antennas in the millimeter frequency range (57-64 GHz) is a little-studied, but promising field, as it has great potential for use for information transmission and development of radar systems.

The aim of the work is the numerical calculation of the profile of the microstrip antenna and its optimization in order to achieve a wide working frequency band.

Tasks:

- review microstrip antennas of the millimeter frequency range with dimensions not exceeding half the wavelength and suitable for use in MIMO antenna systems;
- review the literature and determine which global optimization methods are best suited for optimizing the characteristics of broadband microstrip antennas;
- choose an optimization algorithm and investigate the dependence between the algorithm parameters and the speed of antenna synthesis;
- determine the sensitivity of the antenna characteristics to the number of points used to approximate the antenna profile;
- prepare a drawing of the antenna.

Numerical batch calculations using computer programs will be used to solve the tasks; antenna design in the CST environment; comparative analysis of possibilities of optimization algorithms.

The results obtained: the optimization of the microstrip antenna of the millimeter range using the bee swarm algorithm was carried out. The geometric, frequency, dielectric characteristics of the microstrip antenna of the millimeter range and the directional pattern are calculated. A start-up project on the development of a microstrip antenna design has been formed.

The results of the work will have a possible implementation in various radar systems and communication systems.

Solution methods. Numerical batch calculations using computer programs will be used to solve the tasks; antenna design in the CST environment; comparative analysis of possibilities of optimization algorithms.

Expected results. An effective algorithm for optimizing the microstrip antenna of the millimeter range; geometric, frequency, dielectric characteristics of the millimeter range microstrip antenna. Startup project.

Possible fields of application of work results. Radar systems and communication systems.

Own contribution. Review of modern literature; conducting calculations and calculations, designing an antenna, developing a startup project and forming conclusions.

Used resources. Literary data (scientific periodicals), generated algorithm (ADB in the Matlab environment), CST, online calculator from Roogers.

Keywords: broadband, profiling, patch antenna, reflection coefficient, algorithm, optimization.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	8
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
Вступ.....	10
1. Огляд конструкцій антен міліметрового діапазону	11
1.1 Огляд антен.....	12
1.2 Огляд методів синтезу антен	16
1.3 Висновки за розділом	29
2 Налаштування антени і АБР (PSO).....	30
2.1 Обґрунтування вибору матеріалу, на якому виконуємо антену	30
2.2 Опис конструкції антени з чітким визначенням параметрів для оптимізації	31
2.3 Опис алгоритму PSO – вибір основних його параметрів.....	32
2.4 Опис і обґрунтування вибору цільової функції	35
2.5 Висновки за розділом	36
3 Оптимізація антени	37
3.1 Оптимізація антени з кроком 45° на підкладинці 0.1 мм.....	37
3.2 Оптимізація антени з кроком 45° на підкладинці 0.167 мм.....	49
3.3 Висновки за розділом	61
4. Розробка стартап проекту.....	62
4.1 Вступ.....	62
4.2 Стислий технічний опис розробки	63
4.3 Вигоди впровадження розробки	63
4.4 Очікувана технологія виготовлення: рівень складності, матеріалозатратність	64
4.5 Здатність до поліпшення і удосконалення	64
4.6 Очікувані споживачі розробки	64
4.7 Ймовірні ризики і загрози при впровадженні стартап проекту	65
ВИСНОВКИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	68

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АБР - алгоритм бджолиного рою.

ГА - генетичний алгоритм

МА – мурашинний алгоритм

FR4 - Flame Resistant 4 (незгораючий матеріал 4)

VHTS – Very High Throughput Satellite (дуже високо пропускна супутникова система)

LNA - Low Noise Amplifier (підсилювач з низьким рівнем шуму)

MIMO – Multiple-Input Multiple-Output (багатовхідна багатовихідна технологія)

LTE – Long-Term Evolution (довгострокова еволюція)

PSO – Particle Swarm Optimization (оптимізація роєм частинок)

GA - Genetic Algorithm (генетичний алгоритм)

AOC - Ant Colony Optimization (оптимізація мурашиної колонії)

Вступ

Однією із проблем при конструюванні антен міліметрового діапазону на сьогодні є створення широкосмугових антен, мають розміри менші за половину довжини хвилі і придатні для застосування в МІМО антенних системах. Для розширення смуги пропускання частот автори використовуються різні способи профілювання антен. Одні застосовують вирізи на профілю [1], інші дослідники змінюють розміри профілю [2], ще деякі роблять багатошарові підкладки тощо. Для оптимізації використовуються так звані алгоритми оптимізації. Вибір потрібного алгоритму є не тривіальною задачею і потребує в кожному конкретному випадку окремого дослідження, що як правило супроводжується досить значними витратами на обчислення. Для оптимізації найбільше поширення мають алгоритми бджолиного рою (АБР) та генетичний алгоритм (ГА), все більшого розвитку набувають інші алгоритми, наприклад мурашиний, світлячковий тощо.

Метою роботи є встановити товщину підкладинки, форму профілю та оптимальні параметри алгоритму оптимізації для досягнення робочої смуги частот 57-64 ГГц із коефіцієнтом відбиття в смузі не гірше -10 дБ.

1. Огляд конструкцій антен міліметрового діапазону

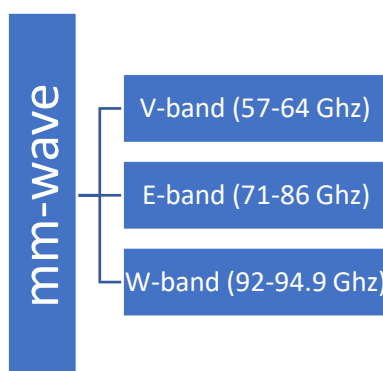
Завданням є реалізація антени для МІМО радарів міліметрового діапазону частот 57-64 ГГц. Розглянемо наявні конструкції антен в визначеному діапазоні частот і в суміжних діапазонах частот, а саме: V-Band, E-Band і W-band.

В зазначений діапазон частот 60-90 ГГц потрапляють різні діапазони [3], рис 1.1.

Зокрема в нижній частині діапазоні 60 ГГц зі смугою пропускання 7 ГГц розташований V-Band (57-66 ГГц) [4] діапазон який не вимагає отримання ліцензії для використання.

Далі розташований E-Band діапазон в інтервалі від 71 ГГц до 86 ГГц. Він має три піддіапазони: нижній із смугою 5 ГГц (71-76 ГГц), середній із смугою 4 ГГц та верхній із смугою 5 ГГц (81-86 ГГц). Середній під діапазон використовується для авторадарів. Частоти E-band потребують ліцензювання при використанні їх.

Ще далі по частоті розташовані W-band (92-94.9 ГГц). З двома піддіапазонами: для внутрішнього користування зі смугою пропускання 2 ГГц (92-94 ГГц) не вимагає ліцензювання; і діапазон для зовнішнього використання



зі смугою пропускання 0,9 ГГц (94-94,9 ГГц) вимагає ліцензію.

Рис.1.1 Міліметровий діапазон частот

Існуючі Q-, V- і Ka-діапазони спектрально перемішані і обмежено придатні для VHTS комунікаційних систем. V-band діапазон також використовується в супутникових системах.

E-band діапазон використовується як фідер в VHTS. Цей діапазон має широку смугу пропускання і незначну плату при ліцензуванні. Тому він привабливий для антенних систем, але недоліком є погодні умови. З самого початку діапазон використовувався в автомобільних радарах, військових цілях і в електромагнітній сумісності.

Тривають дослідження щодо розробки низькочастотного підсилювача (LNA), що працює в E-band діапазоні, як перспективного компонента Tbps system (високошвидкісних систем передачі даних).

1.1 Огляд антен

В світі останніми десятиліттями стрімко розвиваються системи зв'язку в кожній системі зв'язку є антени. Для цих систем необхідні [5] маленькі, компактні, недорогі і легкі у виготовленні антени і найкращим вибором є мікросмужкова антени вони підходять по за всіма вище сказаними критеріями.

Системи MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) [6] використовуються в системах 4G LTE, а також для надійності зв'язку]. Побудувати систему MIMO можна використовуючи три [6] види архітектури: цифрова, аналогова і гібридна. Цифрова архітектура потребує багато радіочастотних ланцюгів і антен, що призводить до великих затрат. Аналогова архітектура є менш затратною ніж цифрова, нею неможливо досягти мультиплексування. Найкращим варіантом є гібридна архітектура вона є розширенням аналогової архітектури і містить найменше радіочастотних ланцюгів і використовується в міліметрових діапазонах частот. Ми будемо орієнтуватися на те, щоб антена підійшла в систему MIMO. Для цього антена має бути менших розмірів, а саме $\lambda/2$ для того, щоб вона вмістилася в MIMO і потрібно по можливості щоб характеристики антени залишалися як в антен які оглянемо нижче.

З використанням МІМО в радарах [7] почали покращуватися продуктивність систем зв'язку. Радари МІМО набагато краще визначають напрямки руху в порівнянні з системами з однією антеною.

На рис. 1.2 ми бачимо характеристики S_{11} чотирьох різних [1] яка працює в діапазоні частот 60-77.5 ГГц.

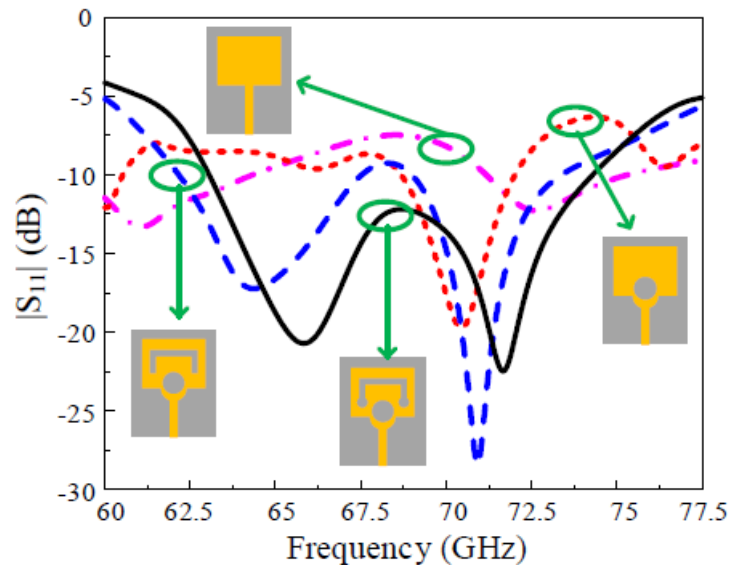


Рис.1.2 Антени з смугою частот 60-77.5 ГГц

Перша антена з розовим графіком це звичайна антена яка має два параметри довжину і ширину патча ми бачимо що було отримано S_{11} приблизно -16 дБ. Друга антена показана червоним графіком з вирізом круга ми змоги досягти кращого S_{11} вже в районі -19 дБ. Третя антена показано синім графіком до неї добавився ще виріз дуги і за рахунок цього вдалося досягти ще кращого S_{11} більше -20 дБ. Четверта антена показана чорним графіком до неї добавилися ще два вирізаних кружки таким чином вдалося досягти ще більшого S_{11} приблизно -28дБ. Роблячи вирізи на профілю, антена починає набувати більш ширшу смугу пропускання (63 – 74,2 ГГц). Можемо зробити висновок, що із зміною профілю можна отримати більш смугу пропускання і кращий коефіцієнт відбиття. В антені [2] рис. 1.3 яка працює в V та E діапазоні частот

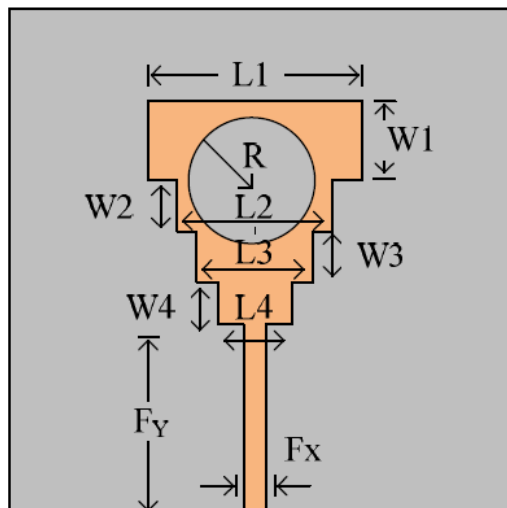


Рис. 1.3 Антена яка працює в двох діапазонах

Для того щоб отримати розширення пропускної здатності мікросмужкової антени, автор вирізає круг з радіусом R , якщо радіус зменшувати то буде зменшуватися діапазон частот, а якщо збільшувати радіус то буде збільшуватися діапазон частот. Таким чином антена може працювати в двох діапазонах частот перший 55–77 ГГц з пропускною здатністю 22 ГГц і другим діапазоном 79–100 ГГц з пропускною здатністю 21 ГГц. Оглянувши цю антену також можна зробити, що при зміні профілю можна збільшити робочу смугу частот антени і досягти роботу на двох діапазонах частот.

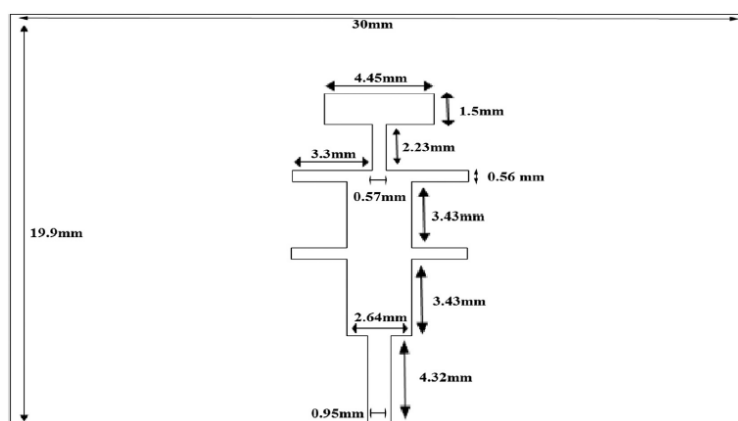


Рис. 1.4 Антени з смугою частот 26.5–40 ГГц

На рис 1.4 за допомогою такого профілювання автору [8] вдалося досягти роботу антени в двох діапазонах частот 29,87 ГГц та 35,02 ГГц, які входять в

діапазон Ка. Для першого діапазону частот ширина смугу пропускання становить 1,24 ГГц S_{11} на рівні -17,16 дБ та 2 ГГц (S_{11}) на рівні -20,35 дБ для другої смуги пропускання. У висновках автор [8] написав що можна вдосконалювати профіль антени і ширина пропускання і коефіцієнт підсилення буде покращуватися.

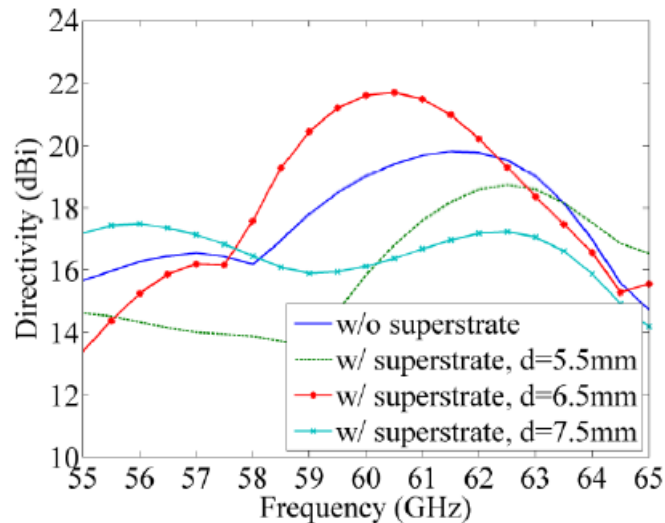


Рис. 1.5 Максимальна направленість залежно від частоти для антени "Бикове око" без та з діелектричною підкладинкою товщиною 0,25 мм при $d=5,5$, $6,5$ та $7,5$ мм.

На рис 1.5 ми бачимо як можна покращити характеристики антени [9] за допомогою діелектричної підкладинки вдалося покращити ширину смуги пропускання з 4.63 ГГц до 4.75 ГГц. На рис 4 видно що з підкладинкою $d=6.5$ мм вдалося отримати найкращий результат. Ця антена охоплює діапазон частот 55-65 ГГц.

Оглянуті антени вони покривають наш діапазон частот і є досить не поганими, але для системи МІМО не підходять через свої великі розміри. Я буду робити антену з частотою 57-64 ГГц і з розмірами $\lambda/2$ для систем МІМО.

1.2 Огляд методів синтезу антен

Алгоритм бджолиного рою

Загальні принципи організації Алгоритму бджолиного рою

Широке використання АБР (PSO) для цілей оптимізації в різних галузях техніки показало його ефективність, зокрема і при конструюванні антен. АБР розроблений у 1995 Kennedy та Eberhart [10] і продовжує широко розвиватися, про що свідчать численні **публікації**.

АБР відноситься до класу стохастичної розрахункової технології, що використовую еволюційні принципи. За рядом параметрів АБР перевищує теж відомий метод оптимізації - генетичний алгоритм.

Принцип дії АБР найкраще пояснити «мовою» тих параметрів, для середовища якого він розроблявся, а потім «перекласти» на аспект розробки дизайну антен.

Поведінка бджолиного рою у полі узгоджується з потребою відшукування місць з найвищою щільністю квітів-медоносів. Без будь-яких апріорних знань про поле, бджоли починають у випадкових місцях з випадковою швидкістю шукати квіти. Кожна бджола може запам'ятати розташування віднайдених місць розміщення квітів. Додаткову інформацію вона отримує про місця, з найбільшою кількістю квітів, про які повідомляють інші бджоли. Розриваючись між цими мотивами, прискорює в обох напрямках, змінюючи свою траєкторію, щоб летіти десь посередині між ними двома точкам: «ностальгії» та «соціального впливу» [11].

По дорозі бджола може знайти місце з більшою концентрацією квітів ніж вона знайшла раніше. Її притягне до цього нового місцезнаходження, але одночасно спричинятиме вплив місцезнаходження більшості знайдених квітів всього рою. І навпаки, у випадку якщо одна бджола може пролетіти над місцем з більшою кількістю квітів, ніж будь-яка інша бджола у рою, тоді увесь рій

потягнеться до цього розташування на додаток до їх власного особистого відкриття [11].

У цьому пошуковому режимі бджоли досліджують поле. Постійно, вони будуть попередньо перевіряють територію, а потім скорегувувати політ у місця з найвищою концентрації квітів. Зрештою, політ бджіл веде їх до одного місця в полі з найвищою концентрацією квітів. Невдовзі всі бджоли будуть роїться навколо цієї точки.

Кеннеді та Еберхарт [10] розробили оптимізатор намагаючись змодельовати таку поведінку.

Технічна терміни вживані в АБР несуть відбиток вихідної моделі, що потребує пояснення:

Особа або **агент** – індивідуум у рою;

Місцеположення або **позиція** – просторові N-мірні координати особини (шукане рішення задачі – місцеположення у заданій області);

Рій – сукупність особин;

Фітнес – ціле число, яке показує якість отриманого рішення;

pbest – положення в параметричному просторі певного агента з найкращою оцінкою;

gbest - положення в параметричному просторі цілого рою з найкращою оцінкою;

$V_{\max}$ – максимум дозволеної швидкості у заданому напрямку.

Технічний опис АБД стосовно антенних систем.

Агент. Усі агенти (елементи антенної системи) діють окремо під одним і тим же керівним принципом: найшвидше зміна положення до найкращого загального розташування, постійно перевіряючи значення його поточного місцезнаходження.

Позиція: N-вимірний простір є простором рішення для задачі оптимізації, в якій будь-який набір координат представляє рішення задачі – фізичне розташування елемента на площині, або наприклад, амплітуду та фазу елемента збудження у фазованій решітці.

Фітнес: Цільова -функція повинна приймати значення в просторі розв'язків, що представляє цінність для визначення цієї позиції. Чим вище щільність параметру, тим краще визначення його розташування. Прикладами характеристики яка оцінюється фітнесом може бути коефіцієнт посилення антени, її вага, пікова перехресна поляризація, або будь-яка якась зважена сума всіх цих факторів. Інакше кажучи, фітнес-функція забезпечує інтерфейс між фізичною задачею та алгоритмом оптимізації.

pbest: Це місце з найвищою фітнес-цінністю, виявлене особисто агентом. Кожен елемент має свій власний pbest, який порівнюється до певного значення придатності. Якщо поточне розташування має вище значення придатності, pbest замінюється з поточним розташуванням.

gbest: Це місце найвищою фітнес-цінністю справедливий для цілого рою. На весь рій є один gbest, до якого прагне бджола. На кожному точка на своєму шляху, кожна бджола порівнює придатність їх поточне розташування щодо gbest. Якщо будь-яка бджола знаходиться місце з розташуванням вищої придатності, gbest замінюється [11].

Математична формалізація АБР

Математичний вираз пошуку найоптимальнішого профілю антени реалізується через вираз вектору алгоритму бджолиного рою [11].

$$v_n = wv_{n-1} + c_1 rand()(pbest_n - x_n) + c_{12} rand()(gbest_n - x_n) \quad (1.1)$$

де v_n – швидкість переміщення особини в n-мірному просторі, x_n - координата особини в n-мірному просторі, rand – випадкове число в діапазоні [0, 1]; w – інерційний коефіцієнт, c_1 , c_2 - коефіцієнти, які враховують, чи надається пріоритет ностальгії (пошук здійснюється у відповідності до знань кожної окремої особини) або соціальному впливу (пошук керується сукупним знанням рою).

Розрахунки швидкості виконуються для кожної N-розмірності в N-мірній оптимізації. Спочатку генерується набір особин з первинного розподілу

$$x_0^i (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1.2)$$

разом із вагами для кожної особини $1/N$.

Нова швидкість це є простий добуток «старої» швидкості на масштабуючий коефіцієнт w , яка збільшується у напрямку положення $pbest$ та $gbest$ для кожної окремої розмірності. Коефіцієнти c_1 та c_2 – масштабуючі фактори, які визначають відносно положення $pbest$ та $gbest$. Якщо детально, то c_1 – фактор, що визначає як багато особин перебувають під впливом пам'яті про найкращу локацію; c_2 – фактор, що визначає вплив «колективної пам'яті» рою. Збільшуючи c_1 збільшуємо вагу інформації про рішення як рух кожної особини до свого найкращого $pbest$; збільшуючи c_2 отримує більший вплив інформації про очікуваний глобальний максимум [11].

Від вибору параметрів w , c_1 і c_2 , багато в чому залежить швидкість оптимізації. Для АБР відомі два набори зазначених параметрів (див. табл. 1.1), які на даний час вважаються найкращими для аналізу складних математичних функцій [12].

Таблиця 1.1 Запропоновані кількісні коефіцієнти АБД

	W	c_1	c_2
Набір параметрів Клерка [12]	0,729	1,494	1,494
Набір параметрів Трелеа [12]	0,6	1,7	1,7
Згідно [11]*	0,9-0,4	1,49	1,49

* розмір популяції менше 30

В наборі параметрів Трелеа у порівнянні із набором Клерка вже відомі оптимальні значення здійснюють більший «тиск» на поведінку алгоритму. АБР

із набором параметрів Трелеа ефективніше досліджує області знайдених оптимумів [12].

Крім того, оскільки коефіцієнти c_1 і c_2 можуть бути більше 1, то наближення до глобального оптимуму носить хвилеподібний характер. Завдяки цьому досить досконально досліджується область поблизу [12].

Функція `rand` генерує випадкове число в інтервалі 0...1. У більшості реалізацій алгоритмів використовується два незалежних випадкових числа, для того щоб стохастично варіювати між *pbest* та *gbest*. Введення в алгоритм елементу випадковості в оптимізатор має на меті змодельовати непередбачувану компоненту поведінки природного рою.

Параметр w - інерційний коефіцієнт або інерційна вага, що набуває вартості від 0,0 до 1,0. Він визначає наскільки довго особина залишатиметься вздовж початкового курсу без впливу *pbest* та *gbest*.

Особини які перебувають найдалі від *pbest* або *gbest* відчують найбільший потяг із відповідних місць, тому рухаються більш швидше ніж особини які перебувають поблизу центрів високої щільності *pbest* або *gbest*. особина продовжує отримувати швидкість в напрямку найбільш кращого параметру, поки вони не досягнуть максимуму. Можливі також «перельоти» особин через ці максимуми [11]

Якщо за виразом (1) отриманий рух особин, то наступний крок – підрахунок швидкості руху особини до наступної локації. Обчислення швидкості частинки є основним елементом повної оптимізації. Швидкість отримується (1.3) обираючи малого проміжку часу Δt і нової координати x_n для кожної N

$$x_n = x_{n-1} + \Delta t v_{n-1} \quad (1.3)$$

Всі процеси описані формулами (1.1) та (1.2) виконуються всіма особинами у рою з циклічним повторенням.

АБР у конструюванні антенних систем

Стосовно вибору антенних характеристик на початковому етапі обирається набір характеристики довільним чином. До цього набору як правило входять розмір, об'єм, вага, смуга частот, кількість робочих діапазонів частот, вартість, підтримка кількох поляризацій, адаптаційні можливості по діаграмі спрямованості і частоті. Наступний крок - вибір оптимальної комбінації характеристик, який алгоритм запам'ятовує як перший варіант вирішення задачі. При наступних пошуках алгоритм обирає найкращі комбінації при збереженні сталими двох характеристик які найвагоміші для оптимізації. При наступних ітераційних переборах оптимізаційний профіль все більше буде наближатися до найбільш придатного для заданих умов.

За допомогою АБР при правильному виборі параметрів [13],[14] вдалося досягти ширшу робочу смугу частот, досягти кращих характеристик антени і зменшити профіль антени.

За допомогою АБР було оптимізовано профіль Е антени [15] на рис.1.6.

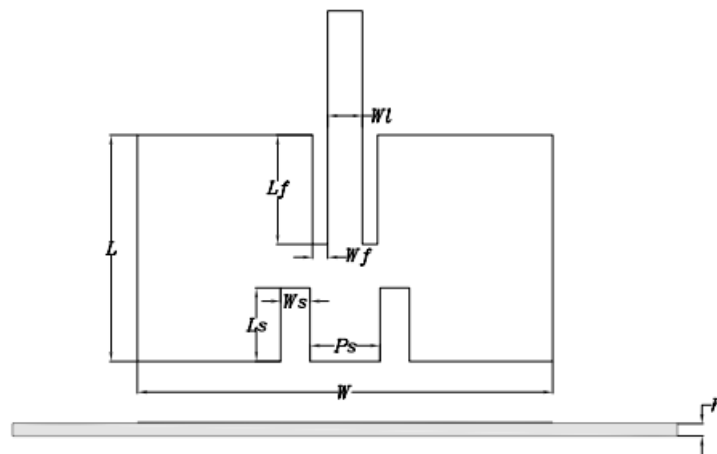


Рис.1.6 Геометрія профілю антени з формую літери Е [15]

Для оптимізації було обрано параметри L , W , W_s , L_s , P_s , W_f і L_f їхні мінімальні і максимальні розміри можна подивитися в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 Мінімальні і максимальні розміри для оптимізації [15]

	W	L	W_s	L_s	P_s	W_f	L_f
Мінімальні	29	30	0	9	2	1	0
Максимальні	69	45	18	19	34	4	18

Після проведеної оптимізації антена набула розмірів в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 Отримані результати після оптимізації PSO [15]

	W	L	W _s	L _s	P _s	W _f	L _f
Розміри після оптимізації	67	37.42	7.92	9.88	14.5	3.37	10.86

Після оптимізації АБР антена має максимальне значення коефіцієнта відбивання S_{11} менше -13.9 дБ в діапазоні від 2400 до 2484 МГц, а для діапазону від 2392 МГц до 2481 МГц виміряне значення коефіцієнта відбивання менше - 13.5 дБ.

Проведена оптимізація свідчить, що за рахунок використання алгоритму АБР можна отримувати менший профіль і якісні характеристики антени.

Генетичний алгоритм

Загальні принципи організації генетичного алгоритму

Генетичний алгоритм (ГА) є потужним методом оптимізації, корисним для конструювання антен, антенних решіток і радіолокаційних систем [16].

Концепція ГА (GA) [12],[17] базується на біологічних закономірностях, зокрема на положенні на теорії Дарвіна про природний відбір та еволюцію. Реалізуючись за схожим принципом, як АБР, просування розрахунків у бік глобального оптимуму забезпечується за рахунок використання процесу відбору, керованого за допомогою цільової функції.

Всі змінні величини із інформацією про пристрій, що оптимізується, квантуються, і далі кодуються у бінарному коді. Подібно тому як представляється спадкова інформація у хромосомі - у вигляді неперервної бінарної послідовності. Відновлення значення параметру з бінарної послідовності відбувається за формулою:

$$q = \left(\frac{q_{MAX} - q_{MIN}}{2^{Ng-1}} \right) \sum_{n=0}^{Ng-1} 2^n \cdot b_n + q_{MIN} \quad (1.4)$$

де q_{MIN} , q_{MAX} – мінімальне і максимальне значення параметру; Ng – кількість біт у гені; b_n – значення окремого біта у гені.

Таке декодування бінарної інформації дозволяє легко інтегрувати у алгоритм граничні умови і необхідну точність по кожному з параметрів.

Дослідження простору рішень відбувається завдяки комбінаторним перестановкам параметрів. У термінології ГА вони носять назву рекомбінації та мутації (...хромосом у популяції). Основними операторами генетичного алгоритму є селекція, кросовер та мутація [12],[17].

Оператор селекції здійснює відбір хромосом, які будуть продукувати «нащадків» (набір хромосом у наступній популяції).

Оператор кросоверу – це операція, при якій дві «батьківські» хромосоми продукують декілька нових хромосом шляхом обміну частинами хромосом між двома (або більше) хромосомами в популяції. Кросовер, як правило, є одноточковим або двоточковим. Кросовер не є безумовною операцією, а здійснюється із імовірністю яка, як правило, лежить в межах 0,6 – 0,9.

Мутація – стохастична зміна частини хромосом. Для бінарного ГА мутація полягає у випадковій зміні окремих біт хромосоми. Імовірність мутації p_{mut} фіксується на невеликому рівні, оскільки основними операторами генетичного алгоритму є селекція та кросовер, а мутація лише забезпечує додаткове дослідження простору можливих рішень.

Структурна схема генетичного алгоритму зображена на рис. 1.7.

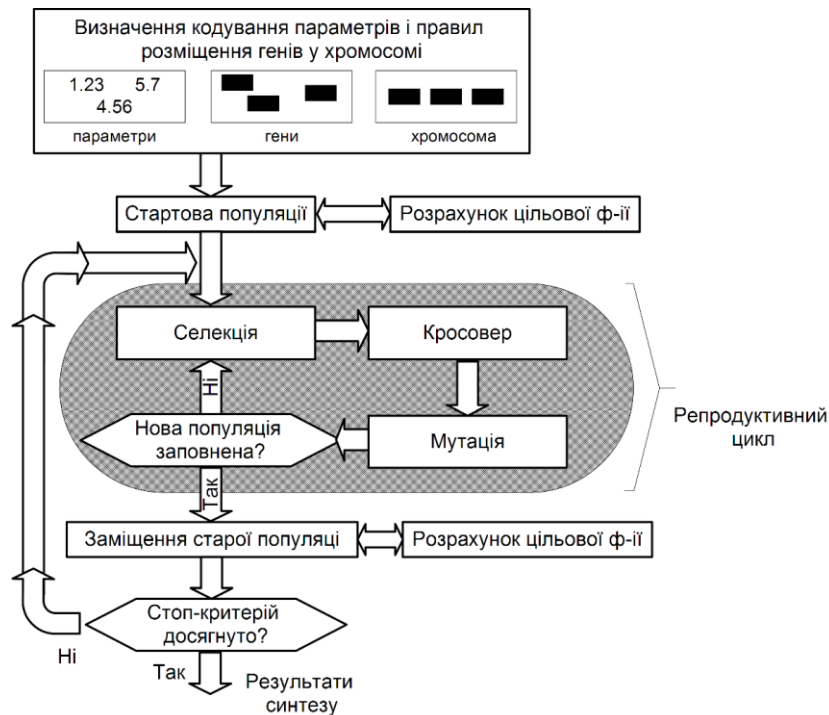


Рис. 1.7 Структурна схема роботи генетичного алгоритму [12]

Блок схема ГА організована за модульною схемою. Перший модуль відповідає за підготовку даних, які вводяться в ГА. У блок-схемі вони виділені прямокутником «Визначення кодування параметрів і правил розміщення генів у хромосомі». У цьому модулі вхідні параметри кодуються окремо у вибірках «гени» і «хромосоми». Гнучкість ГА дає можливість одночасно працювати із неперервними (за допомогою квантування) та дискретними змінними і ефективно оптимізувати функції із багатьма змінними [12]

Закодовані дані вводяться для розрахунку стартової популяції і першого наближення при розрахунку цільової функції.

Початкова популяція створюється випадковою генерацією бітових послідовностей хромосом [12]. Розмір популяції залишається сталою протягом всієї процедури оптимізації.

Цільова функція може комбінувати аналітичні функції та функції, що базуються на числових та експериментальних дослідженнях і не потребує при цьому знання похідних функції, що оптимізується [12]

Наступна частина блок-схеми ГА «Репродуктивний цикл». В нього входять модулі «селекція», «кросовер» і «мутація». Вхідні дані послідовно

проходять через зазначені модулі у такій послідовності: селекція → кросовер → мутація. Після проходження всіх цих модулів здійснюється перевірка за певним критерієм. У випадку виконання критерію - здійснюється перехід до блоку «Заміщення старої популяції», а якщо ні, то знову повторюється попередній репродуктивний цикл. Заміна старої популяції новою відбувається, як правило, не повністю, оскільки оператор кросоверу працює із імовірністю менше одиниці [12].

Оптимізація здійснюється через послідовний вибір цільової функції до досягнення заданого значення кривої (best fitness). Приклад результату виконання ГА для найкращого вибору цільової функції показаний на рис. 1.8. в якій представлена крива для даної антенної системи [16].

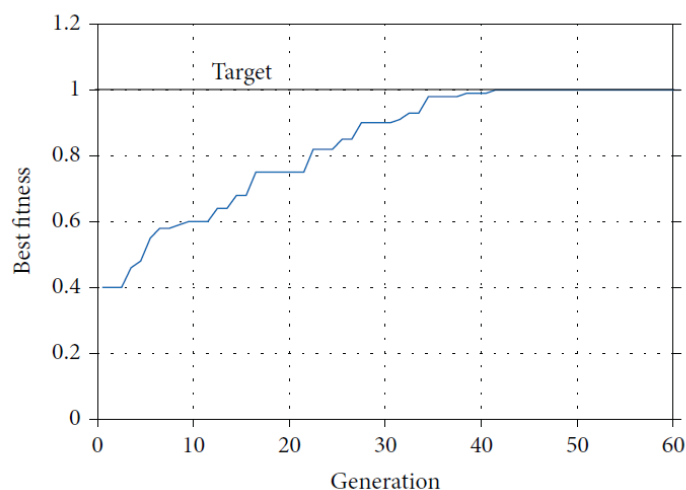


Рис. 1.8 Приклад розрахунку цільової функції [16]

У разі заміщення старої популяції здійснюється перерахунок цільової функції. При досягненні відповідного значення стоп-критерію відбувається припинення ітераційних обчислень і формуються результати синтезу. У якості стоп-критерію для зупинки алгоритму використовується досягнення цільовою функцією необхідного значення (або оптимуму, значення якого відомо перед синтезом, або значення цільової функції, яке задовольняє умовам синтезу) та досягнення максимально дозволеної кількості ітерацій. Крім того, доцільно постійно перевіряти алгоритм на стагнацію, аналізуючи зміну найкращого

значення цільової функції по епохам. Альтернативним і більш якісним є контроль стагнації ГА по генотипу. У випадку, коли генотип різних хромосом практично ідентичний (співставлення генотипів робиться шляхом обчислення відстані Хеммінга), поява хромосоми із кращим значенням цільової функції є малоюмовірною і алгоритм доцільно зупиняти [12].

Якщо стоп критерій не виконується, то відбувається перехід на початок репродуктивного циклу і обчислення в репродуктивному циклі повторюється заново.

Використання ГА для конструювання мікросмужкової антен

Для оптимізації цієї антени автор використав ГА. Область патчу розділюють на $n \times m$ клітинок. Провідність або непровідність кожної клітини визначається за допомогою двійкового кодування. Якщо клітина є провідною, то відповідному гену присвоюється 1, а якщо комірка є непровідною, їй присвоюється 0. Процедuru оптимізації можна описати такими кроками:

$$\text{cost} = \begin{cases} |S_{11}(f_i)| \exp\left(-20 \left| \frac{f_{res} - f_d}{f_d} \right| \right), & \text{for } f_d - \epsilon < f_i < f_d + \epsilon \\ \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{11}(i) \right|, & \end{cases} \quad (1.5)$$

1. Створити початкову популяцію, згенерувавши випадковий рядок двійкових чисел.

2. Створити модель відповідно до генів особин у популяції, встановити умови вирішення та розрахувати модель в CST. Потім автоматично повернути розраховані параметри S_{11} до основної функції (Matlab). Повернений параметр S_{11} буде викликано цільовою-функцією (Matlab).

3. Оцінити функцію придатності. Якщо критерії зупинки задовольняються, зупиніться, якщо ні перейдіть до наступного кроку.

4. Створити наступне покоління, застосувавши оператор генетичного алгоритму. Використавши операцію селекція, кросовер, або мутація.

5. Повернутися до кроку 2.

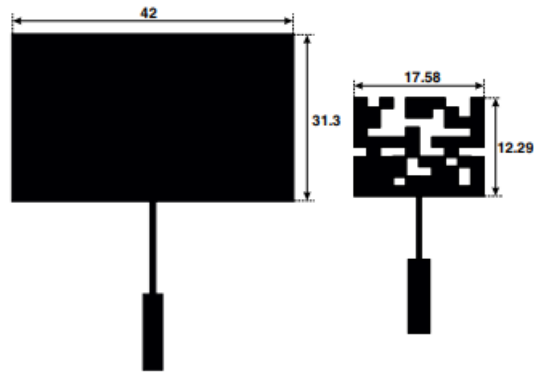


Рис.1.9 Зліва антена до оптимізації, а справа після оптимізації [18]

Алгоритм GA адаптовано в середовище CST за допомогою Matlab. Стартова антена розділена у клітинах 10×10 , початкова популяція з 20 особин генерується за допомогою випадкового рядка двійкових чисел. Метод випадкового одноточкового кросинговеру використовується зі 100% ймовірністю кросинговеру. Для операція мутації, щонайбільше п'ять бітів випадковим чином вибираються для кожної особи. Конвергенція є отримано після 14 покоління.

На рис.1.9 ми можемо бачити як вдалося оптимізувати антену. Розмір патча вдалося зменшити на 82%.

Мурашиний алгоритм

МА (з перекладу на англ. AOC) [12] алгоритм отримав таку назву через поведінку мурах, а саме мурашки залишають феромонні сліди на своєму шляху, а наступні мурашки будуть використовувати ці сліди для обрання наступного кроку. Феромони виконують роль певного виду комунікації між мурашками, а саме допомагають їм знаходити найкращий шляхи до цільової точки. Сам алгоритм можна описати такими кроками:

- 1) Встановлення феромонів на своєму шляху;
- 2) Рух мурашок з урахуванням встановлених феромонів;
- 3) Оновлення феромонів, а саме покращення попередніх;
- 4) Завершення алгоритму, або перехід на наступну операцію.

АОС також знайшов місце в оптимізації мікросмужкової антен на рис. 1.10 ми бачимо як під час оптимізації змінюються розміри і характеристики антени [19]. На 1 ітерації $S_{11} = -9$ дБ, на 20 ітерації $S_{11} = -16$ дБ і на 50 ітерації S_{11} досягається -25 дБ. За допомогою алгоритму АОС вдалося покращити коефіцієнт відбиття майже в 3 рази.

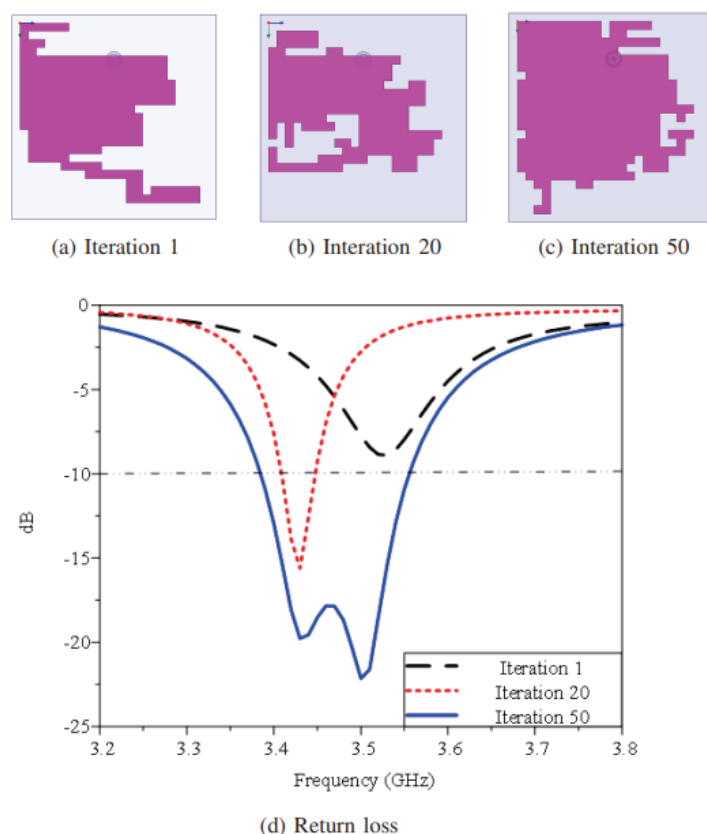


Рис. 1.10: Порівняння антени в ітераціях 1, 20 та 50.

З рис. 1.10 можна зробити висновок, що такий алгоритм можна використовувати для оптимізації антен.

Таблиця 1.4 Порівняльна характеристика двох алгоритмів оптимізації

Характеристика	АБР	ГА
Простота	+	-
Керування збіжністю через операнди	Високий (через інерцію)	Нижчий (через кросовер і мутацію)
Оптимізація профільованих мікросмужкових антен	•	
Паралельні обчислення		•

Чутливість до збільшення динамічного діапазону параметрів синтезу	-	+
Зростання кількості профілю	1 у.о. середньої якості	1,5 у.о. середньої якості
Розмір популяції [Василенко, 2015]	Не менше 30	Не менше 200
Швидкість синтезу [Василенко, 2015]	Комбінація відбиваючих граничних умов та набору параметрів Трелеа	Використання лише 50% найкращих хромосом
Комп'ютерний час [Василенко, 2015]	1 у.о.	3-4 у.о.

1.3 Висновки за розділом

На основі аналізу літератури встановлено що профілювання дозволяє збільшити робочий діапазон частот. Профіль пропонується оптимізувати за допомогою АБР. З огляду видно що АБР дозволяє досягти більш оптимальних співвідношень між якістю оптимізацією і часом оптимізації.

Оглянувши два алгоритма АБР і ГА табл. 1.4 було вибрано АБР так як він більше підходить для оптимізації мікросмужкової антени, а саме оптимізації точок з кроком з мінімального і максимального значення. ГА більше підходить для вирізання комірок на профілю.

2 Налаштування антени і АБР (PSO)

2.1 Обґрунтування вибору матеріалу для конструювання антени

Вибір матеріалу для конструюванні антени залежить від характеристик матеріалу та заданих характеристик антени.

Антену була побудована на підкладці Rogers RO 4350B [20] цей матеріал сумісний з технологією FR4, легкість до виробництва плат, має невелику діелектричну проникність і за рахунок цього на високих частотах має менше втрат. Серед певних недоліків можна зазначити більші матеріальні втрати, але для вбудованих радарів це не є суттєво важливим, оскільки він має перевагу в інших характеристиках, що перекриває його недоліки. Вибір товщини для підкладки 4350B зазвичай коливається від 0.1 до 0.3 мм. Ми обрали мінімальну і середню товщину.

Вибір товщини підкладки обумовлювався характеристиками матеріалу. Для товщини 0.167 мм діелектрична проникність 3.71 тангенс втрат 0.037 ширина мікросмужкової лінії 0.3751 мм. Для товщини 0,1 мм діелектрична проникність 3.71 тангенс втрат 0.037 ширина мікросмужкової лінії 0.2121 мм.

Зокрема, у табл. 2.1 наведені [5] найпопулярніші діелектричні підкладки на яких виготовляють антени (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 Популярні діелектричні підкладки

	Підкладка	Товщина, мм	Діелектрична проникність	Коефіцієнт втрат
1	Duroid 5880	0.127	2.20	0.0009
2	RO 3003	1.575	3.00	0.0010
3	RO 3010	3.175	10.2	0.0022
4	RO 4350	0.168-0,508	3.48	0.0037
5	HK 04J	0.025	3.50	0.005
6	IS 410	0.05-3.2	5.40	0.035

7	DiClad 870	0.091	2.33	0.0013
8	Polyguide	0.102	2.32	0.0005
9	NH 9320	3.175	3.20	0.0024
10	RF-60A	0.102	6.15	0.0038

2.2 Опис конструкції антени з чітким визначенням параметрів для оптимізації

Для того щоб зменшити кількість параметрів ми робимо патч симетричним і визначаємо кут в 45° . Точка a_1 і a_2 відповідають за узгодження антени. Точки a_2 , a_3 , a_4 , a_5 і a_6 розміри цих параметрів задаються від мінімального значення, до максимально можливого, щоб ця антена рис. 2.1 могла вписатися в антенну решітку з розміром $\lambda/2$.

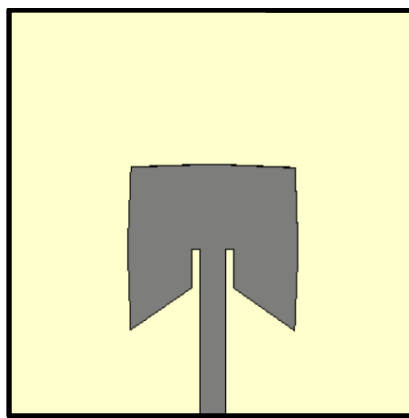


Рис. 2.1 Максимальні розміри антени

Максимальні розміри антени рис. не мають бути більшими половини від довжини хвилі $\frac{\lambda}{2}$, і для частотних параметрів маємо:

$$F_c = (F_{\min} + F_{\max}) / 2 = (57 + 64) / 2 = 60.5 \text{ ГГц} \quad (2.1)$$

де F_c , $F_{\min}$, $F_{\max}$ – відповідно середня, мінімальна та максимальна частота обраної антени.

Оскільки $\lambda = \frac{c}{F_c} = \frac{3 \cdot 10^8}{60.5 \cdot 10^9} \approx 5 \text{ мм}$, то $\frac{\lambda}{2} = 2,5 \text{ мм}$.

Розміри мікросмушкової лінії можна також розрахувати в програмі *Online Microwave Impedance Calculator*

$$W_{\text{line}} = 0.37510 \text{ мм та } L_{\text{line}} = \lambda/2 = 2.5 \text{ мм.}$$

Звідси максимальні розміри a_4 і a_6 приблизно 1.25 мм, а розміри a_3 , a_5 і a_6 їх можна розрахувати за теоремою Піфагора, що приблизно становить 1.7 мм (табл. 2.2, рис. 2.2).

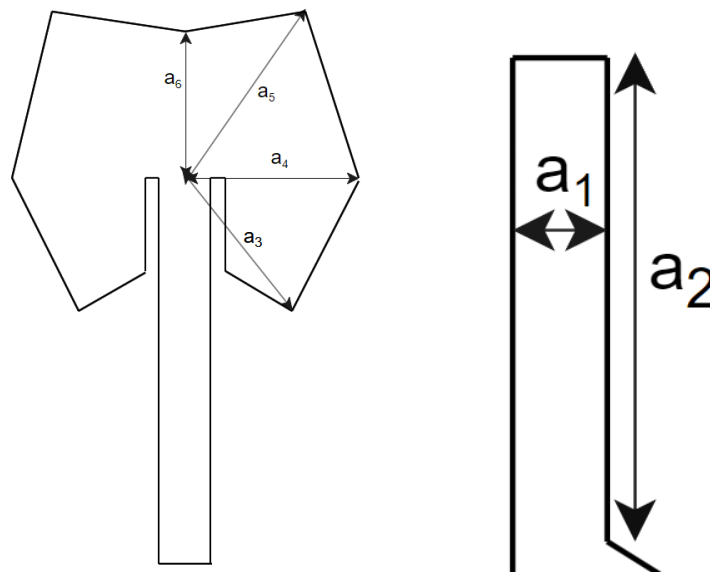


Рис. 2.2 Креслення профілю антени та його геометричні параметри

Таблиця 2.2 Розміри антени з кроком оптимізації 45°

Параметри антени	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
Min	0.195	0.1	0.5	0.50	0.5	0.50
Max	0.300	0.7	1.7	1.25	1.7	1.25

2.3 Опис алгоритму PSO – вибір основних його параметрів

Опис алгоритму АБР

Структурна схема алгоритму бджолиного рою представлена на рис. 2.3 [12]. У схемі виділяється декілька блоків. Блок граничних і початкових умов (блок I), цільова функція (блок II), блок синтезу (блок III).

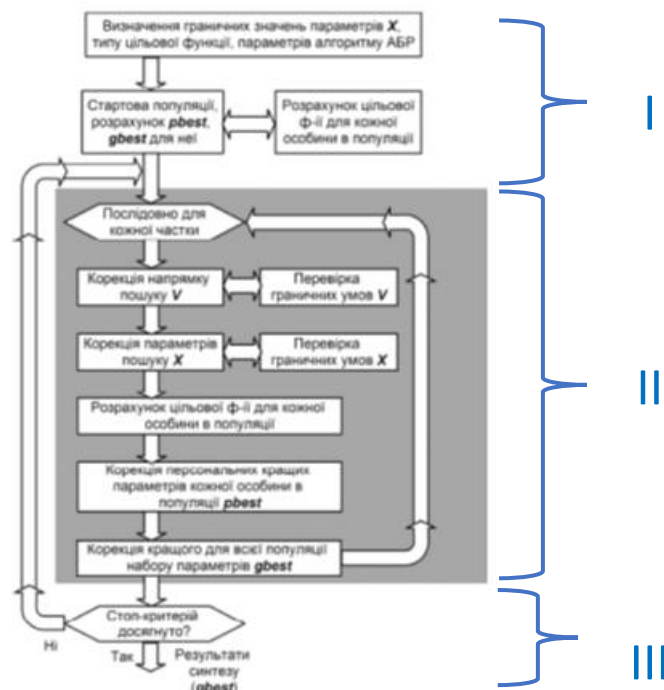


Рис. 2.3 Структурна схема роботи АБР [12]

У блоці I визначається простір рішень: вибір необхідних параметрів, які мають бути оптимізовані, надається їм розумний діапазон, в якому буде здійснюватися пошук оптимального рішення, вибирається тип цільової функції. Визначається мінімальне та максимальне значення для кожного виміру у n -вимірній оптимізації. Окремо здійснюється розрахунок цільової функції для кожної особини в популяції. Перед початком пошуку оптимальної позиції в просторі рішенні, кожна частинка повинна розпочати свій власний пошук у своєму власному випадковому місці зі швидкістю, яка є випадковою як за напрямом, так і величиною. Оскільки його початкове положення є єдиним місцем розташування з якою стикається кожна особина на початку прогону, ця позиція стає відповідним $pbest$ кожної частинки. Перший $gbest$ потім вибирається серед цих початкових позицій [11]. Ці дані лягають в основу обчислення стартової чисельності популяції, розрахунок $pbest$ і $gbest$ для неї.

Всі ці параметри передаються в блок ітераційних обчислень АБР (блок II). Стартова популяція і стартові значення швидкості пошуку створюється, як правило, випадковим чином. В ітераційному блоці послідовно здійснюється корегування напрямку пошуку по координаті V і X з одночасною перевіркою граничних умов по координатам і розрахунок популяційних і особистих величин $pbest$ і $gbest$.

На цій стадії визначається фітнес-функція. Цей важливий крок забезпечує зв'язок між алгоритмом оптимізації та фізичними параметрами моделі. Дуже важливо підібрати фітнес-функцію, яка б одним простим числом представляла якість розв'язку [11].

Останній вузол розрахунку, у блоці II, оцінює придатність особини, порівнюючу $gbest$ та $pbest$. Тут функція відповідності використовує координати частинки у просторі рішення повертає значення придатності буде призначено для поточного розташування. Якщо це значення є більше, ніж значення у відповідному $pbest$ для цього частинка або глобальний $gbest$, тоді відповідний місцезнаходження замінено на поточне місцезнаходження.

Зупинка ітераційних величин здійснюється по досягненню до стоп критерію (блок III). Одним із варіантів стоп критерія є наближення до нуля значення різниці між $pbest$ популяційною і $pbest$ особистісною кожної бджоли. Іншим варіантом критерія є коли максимальне значення швидкості пошуку v_n для запобігання частого виходу частки за межі області дослідження обмежується для кожної змінної розміром її динамічного діапазону [12].

Вибір основних параметрів АБР

Для того, щоб покращити характеристики будемо оптимізувати профіль антени. Самий профіль буде включати 6 параметрів, а саме параметри a_1 і a_2 , які відповідають за узгодження (невелика щілина між мікросмушковою лінією і самим патчем). До наступних параметри були обрані розрахунком з кроком 45° . Звідки за формулою впливає $180/45 = 4$. Назвемо ці параметри a_3 , a_4 , a_5 і a_6 . Ліва і права сторона антени будуть симетричні для економії часу оптимізації.

Також були налаштовані параметри які відповідають за налаштування PSO. Вхідні параметри розрахункової моделі PSO були обрані з огляду на наявність публікацій з цього приводу, в яких розмір популяцій задається в 30 особин. Проте наші попередні розрахунки вказують, що заданий розмір популяції є недостатньо узгоджений, тому пропонується наступні величини:

- 1) Рій частинок в 15, 30 та 50 особин.
- 2) Максимальна кількість ітерацій 50 епох (в літературі зазвичай зустрічається 40 епох)
- 3) параметри Трелеа - (матлаб).

2.4 Опис і обґрунтування вибору цільової функції

Обґрунтування вибору цільової функції

В якості дослідницької характеристики цільової функція АБР обраний S_{11} , який добре підходить для того щоб працювати з заданим діапазоном частот для розширення смуги пропускання. Вибрана цільова добре опрацьовує коефіцієнти S_{11} в широкій смузі частоту, тому було її вибрано. Для розширення смуги пропускання доцільно використання значення S_{11} не більше -16 дБ, тому що це величиною є оптимальною.

Опис цільової функції

Для всіх отриманих значень S_{11} від діапазоні частот від 57 до 64 ГГц знаходимо максимальне значення S_{11} з цієї вибірки (ф. 2.2 - 2.3) і його оптимізуємо в розмірності дБ (ф. 2.4), і якщо отримане значення $S_{11\text{db}}$ буде більше -16 дБ, то у цьому випадку будемо пеналізувати цільову функцію (ф. 2.5). У випадку, якщо $S_{11\text{db}}$ буде менше -16 дБ, тоді до параметра *cost_temp* нічого не додаємо, і на початку запуску циклу *cost_temp* дорівнює нулю.

$$S_{11}=S_{11_all}(\text{find}(\text{freq}>57 \ \& \ \text{freq}<64)), \quad (2.2)$$

$$S_{11_max}=\max(S_{11}), \quad (2.3)$$

$$S_{11db}=20*\log_{10}(s_{11_max}); \quad (2.4)$$

$$\text{Якщо } S_{11db}>-16 \text{ тоді } cost_temp = cost_temp+abs(S_{11db}+16)^2. \quad (2.5)$$

Прийнятний результатом вибору цільової функції буде значення $S_{11}\leq -16$ дБ, так як це забезпечує досягнення широкої смуги частот.

2.5 Висновки за розділом

В цьому розділі було зроблено вибір ключових параметрів для оптимізації антени, а саме вибір матеріалу на якому буде виготовлена антена. Опис антени і вибір її параметрів для оптимізації. Опис і вибір цільової функції АБР, а також його опис.

3 Оптимізація антени

3.1 Оптимізація антени з кроком 45° на підкладинці 0.1 мм

Для проведення оптимізації мікросмужкової антени був обраний алгоритм бджолиного рою (PSO), який забезпечує ефективний розрахунок азимутально-розподілених точок патчу з кроком 45° . Здійснено по 5 запусків алгоритму оптимізації для 2 типів підкладок (0,167 мм та 0,100 мм) окремо для 3-х обсягів популяцій (15, 30 та 50 особин). Загальна кількість прогонів алгоритму популяції склала 30.

Розрахункові характеристики S_{11} мікросмужкової антени з підкладинкою 0,1 мм отримані для різної кількості особин в популяції (рис. 3.1 – 3.6).

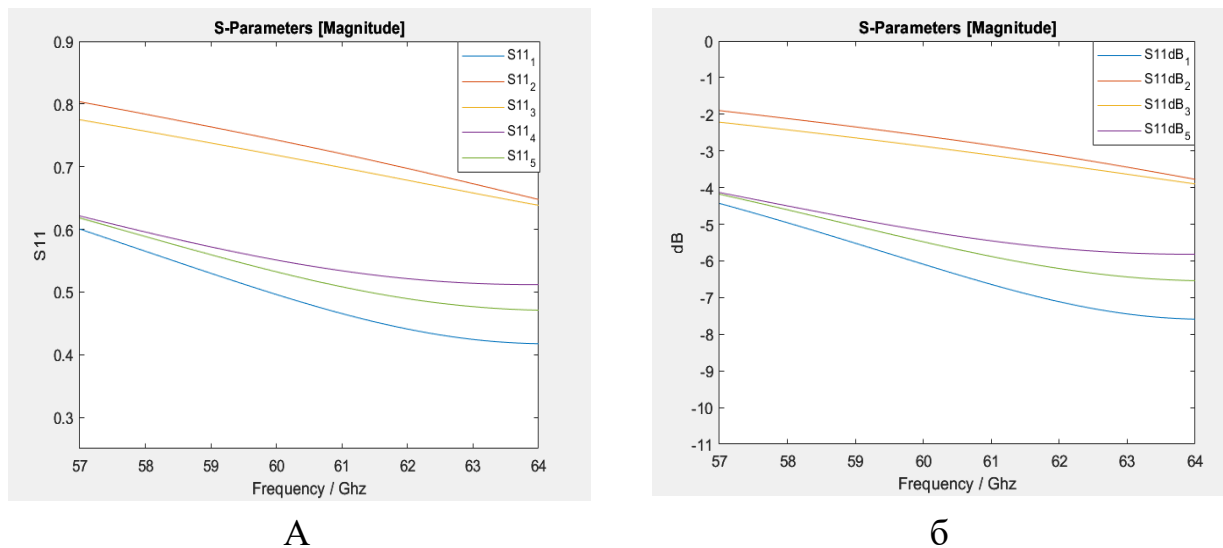


Рисунок 3.1 Частотна характеристика S_{11} мікросмужкової антени з підкладинкою 0,1 мм для популяції 15 особин у а) безрозмірних одиницях та б) децибелах

Геометрія антени з підкладинкою 0,1 мм з популяцією 15 особин та з розрахунку $S_{11(1)}$ показано на рис. 3.2.

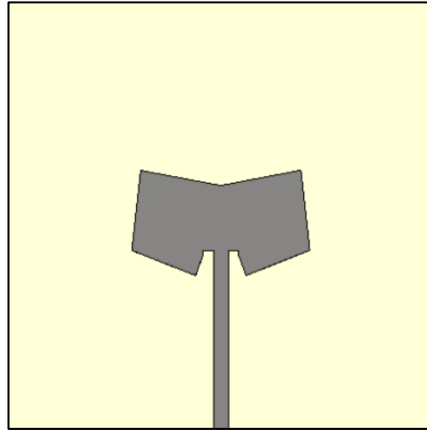
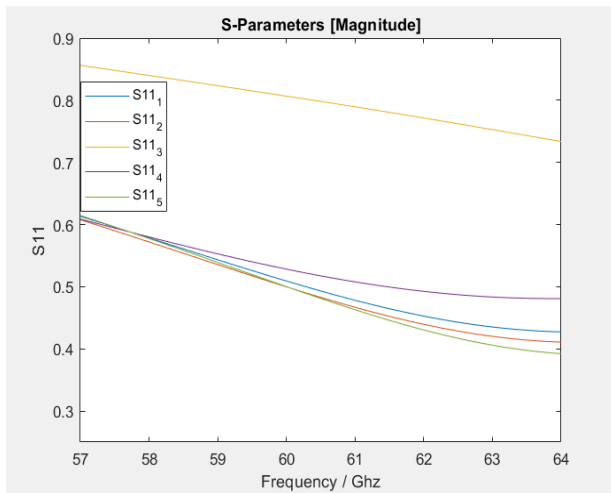


Рисунок 3.2 Геометрія антени з підкладкою 0,1 мм з популяцією 15 особин та з розрахунку $S_{11(1)}$

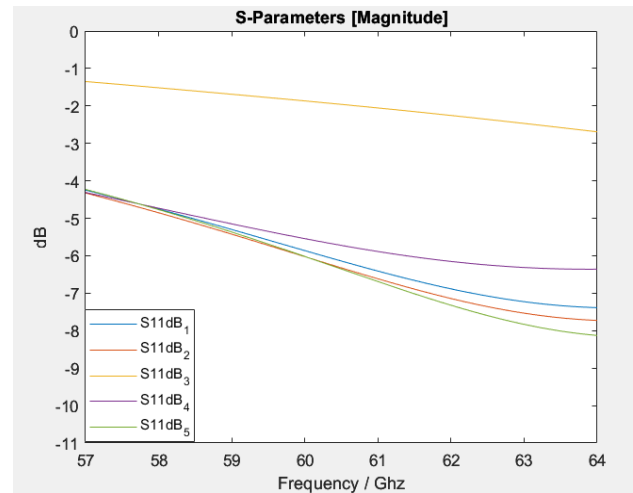
Аналіз частотних характеристик S_{11} для популяції 15 особин дозволяє стверджувати про наявність двох груп залежностей. Перша група представлена двома кривими, що відповідають $S_{11(2)}$ і $S_{11(3)}$ номеру запуску алгоритму оптимізації, тоді як до другої групи відносяться криві $S_{11(1)}$, $S_{11(4)}$ і $S_{11(5)}$. Величина S_{11} кривих першої групи приблизно на 25% вища за значення другої групи, із збільшенням частоти ця різниця з незначно зменшується.

Криві $S_{11(2)}$ і $S_{11(3)}$ мають обернено лінійну залежність S_{11} від частоти, знижуючись від 0,82 і 0,77 до приблизно 0,66, причому мають тенденцію до збіжності між собою. Величина $cost_temp$ для цих кривих є більшою за відповідне значення кривих другої групи, причому найбільше значення $cost_temp$ формується в області нижчих частот.

Із 5-ти запусків алгоритму оптимізації мікросмужкової антени з підкладкою 0,1 мм та кількістю особин в 15, було обрано для подальших розрахунків криву $S_{11(1)}$ з значенням в 0,60.



А



Б

Рисунок 3.3 Частотна характеристика S_{11} мікросмушкової антени з підкладинкою 0,1 мм для популяції 30 особин у а) безрозмірних одиницях та б) децибелах

Геометрія антени з підкладинкою 0,1 мм з популяцією 30 особин та з розрахунку $S_{11(1)}$ представлена на рис. 3.4.

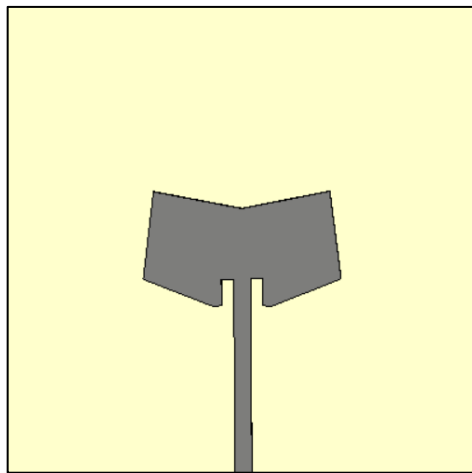


Рисунок 3.4 Геометрія антени з підкладинкою 0,1 мм з популяцією 30 особин та з розрахунку $S_{11(1)}$

Аналіз частотних характеристик S_{11} для популяції 30 особин дозволяє стверджувати про наявність двох груп залежностей (рис. 3.3). Перша група

представлена однією кривою- $S_{11(3)}$. До другої групи відноситься всі інші криві, що відповідають запуску алгоритму. Розходження кривих другої групи відбувається в області високих частот. Криві другої групи відображають більш ефективні траєкторії обчислення під час роботи алгоритму оптимізації, оскільки значення S_{11} є меншим за кривої $S_{11(3)}$.

Із 5-ти запусків алгоритму оптимізації мікросмужкової антени з підкладкою 0,1 мм та кількістю особин в 30, найкращим запуском є крива $S_{11(5)}$ із значенням 0,61.

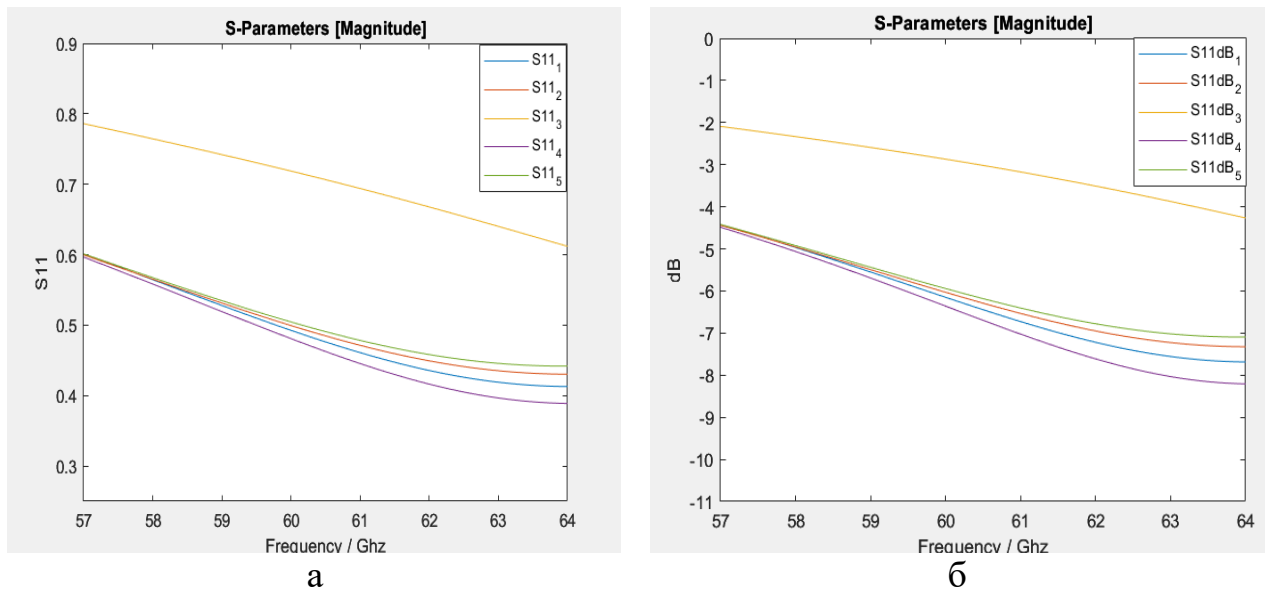


Рисунок 3.5 Частотна характеристика S_{11} мікросмужкової антени з підкладкою 0,1 мм для популяції 50 особин у а) безрозмірних одиницях та б) децибелах

Геометрія антени з підкладкою 0,1 мм з популяцією 50 особин та з розрахунку $S_{11(4)}$ представлена на рис. 3.6.

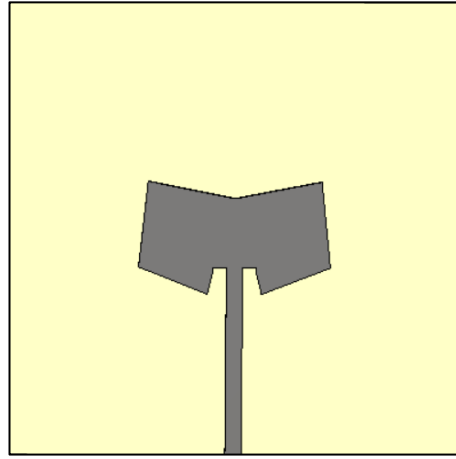


Рисунок 3.6 Геометрія антени з підкладкою 0,1 мм з популяцією 50 особин та з розрахунку $S_{11(4)}$

Аналіз частотних характеристик S_{11} для популяції 50 особин багато в чому виявляють риси схожі для вибірки у 30 особин (рис. 3.5). Тут теж відзначаємо наявність двох рівновеликих груп запусків, що дозволяє стверджувати про наявність двох груп залежностей. Перша група представлена однією кривою $S_{11(3)}$. До другої групи відноситься всі інші криві, що відповідають запуску алгоритму. Розходження кривих другої групи відбувається в області високих частот. Криві другої групи відображають більш ефективні напрями роботи алгоритму оптимізації, оскільки значення S_{11} є меншими за кривої $S_{11(3)}$.

Із 5-ти запусків алгоритму оптимізації мікросмужкової антени з підкладкою 0,1 мм та кількістю особин в 50, найкращим є запуском є крива $S_{11(4)}$ із значенням в 0,60.

Результати статистичної обробки результатів оптимізації мікросмужкової антени з підкладкою 0,1 мм зібрані в табл. 3.1 - 3.6.

В таблиці 3.1 наведені результати оптимізації коефіцієнта відбиття оптимізованої антени, де S_{11} (найгірше рішення) є найбільшим значенням із масиву отриманих S_{11} , Відповідно S_{11} (середнє рішення) є середнім арифметичним всіх отриманих коефіцієнтів S_{11} .

Таблиця 3.1 Розрахункові параметри S_{11} мікросмушкової антени з підкладинкою 0,1 мм (N - номер запуску алгоритму оптимізації; V - кількість особин у популяції)

N	S ₁₁ (найгірше рішення)			S ₁₁ (середнє рішення)		
	V	15	30	50	15	30
1	0.60	0.61	0.60	0.48	0.50	0.48
2	0.80	0.60	0.59	0.72	0.49	0.49
3	0.77	0.85	0.78	0.70	0.79	0.70
4	0.62	0.60	0.59	0.55	0.52	0.47
5	0.61	0.61	0.60	0.52	0.48	0.50

У таблиці 3.2 показані результати оптимізації, де tr - кількість виконаних ітерацій АБР; також показано тривалість оптимізації у хвилинах.

Таблиця 3.2 Розрахункові параметри tr та часу оптимізації мікросмушкової антени з підкладинкою 0,1 мм (N - номер запуску алгоритму оптимізації; V - кількість особин у популяції)

N	tr			Час (хв)		
V	15	30	50	15	30	50
1	50	28	43	750	840	2150
2	50	50	37	750	1500	1850
3	38	24	50	570	720	2500
4	50	50	50	750	1500	2500
5	50	50	50	750	1500	2500

У табл. 3.3 наведені результати оптимізації коефіцієнта відбиття оптимізованої антени, де cost_temp (найгірше рішення) – найбільша величина з масиву отриманих значень cost_temp; cost_temp (середнє рішення) - середньо арифметичне всіх значень параметру cost_temp.

Таблиця 3.3 Розрахункові параметри cost_temp мікросмужкової антени з підкладинкою 0,1 мм (N - номер запуску алгоритму оптимізації; V - кількість особин у популяції)

N	cost_temp (найгірше рішення)			cost_temp (середнє рішення)		
V	15	30	50	15	30	50
1	204.51	206.12	225.76	151.80	156.12	149.81
2	238.64	209.15	214.03	204.14	148.66	146.82
3	223.48	241.54	223.62	196.34	218.33	198.28
4	221.21	217.90	226.59	170.57	151.05	147.83
5	241.06	220.33	222.19	153.30	169.70	155.75

Пропонується по категорії «найгірше рішення» щодо визначення S_{11} обрати величину 0,60 як значення S_{11} , яке найчастіше зустрічається; а за категорією «середнє рішення» – 0,48. Більшість запусків алгоритму оптимізації досягало кількості ітерацій 50 епох.

В таблицях 3.4-3.6 показані результати оптимізації розмірів антени для 15, 30 і 50 особин у популяції.

Таблиця 3.4 Розрахункові параметри a_i (мм) мікросмужкової антени з підкладинкою 0,1 мм для 15 особин у популяції

N	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
1	0.25	0.10	0.50	1.24	1.58	0.90
2	0.28	0.21	0.58	0.82	1.25	1.04
3	0.19	0.40	0.50	1,00	1.38	0.96
4	0.21	0.26	0.50	1.25	1.57	0.90
5	0.22	0.35	0.50	1.25	1.56	0.89

Таблиця 3.5 Розрахункові параметри a_i (мм) мікросмужкової антени з підкладинкою 0,1 мм для 30 особин у популяції

N	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
1	0.26	0.40	0.50	1.25	1.57	0.89
2	0.26	0.31	0.50	1.25	1.57	0.90
3	0.27	0.43	1.70	1.24	1.70	0.53
4	0.22	0.17	0.50	1.25	1.58	0.91
5	0.27	0.34	0.50	1.25	1.57	0.89

Таблиця 3.6 Розрахункові параметри a_i (мм) мікросмужкової антени з підкладинкою 0,1 мм для 50 особин у популяції

N	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
1	0.28	0.36	0.50	1.25	1.59	0.89
2	0.25	0.10	0.50	1.25	1.59	0.90
3	0.27	0.10	0.50	0.97	1.39	1.01
4	0.28	0.10	0.50	1.25	1.59	0.90
5	0.25	0.16	0.50	1.25	1.60	0.9

Найкращий результат цільової функції забезпечувався популяцією із 50 особин. Також приведено геометричні розміри порівнювальних антен (рис. 3.8) на початку оптимізації і після оптимізації АБР.

На рис.3.7 бачимо як за допомогою оптимізації зменшилися розміри профілю мікросмужкової антени з підкладинкою 0,1 мм.

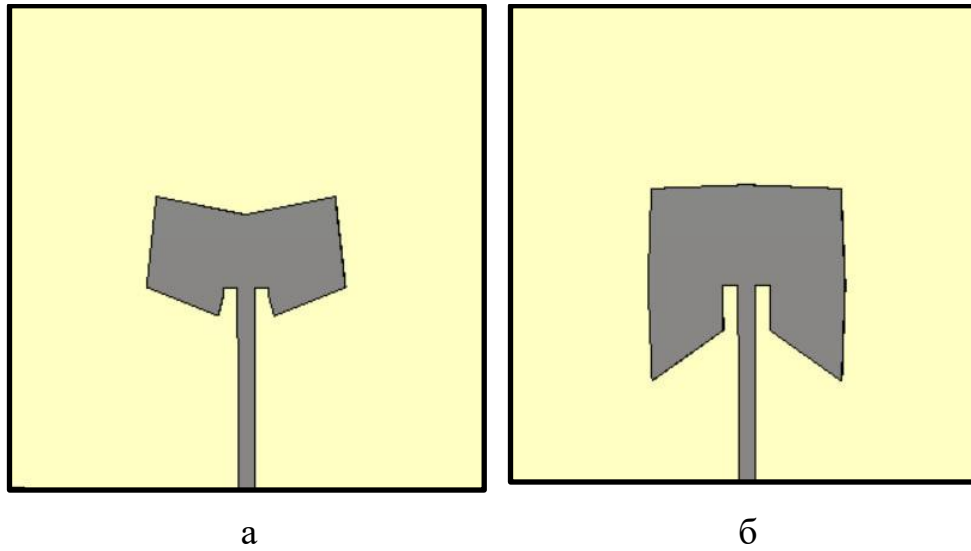


Рисунок 3.7 Мікросмужкова антена з підкладинкою 0,1 мм:
після оптимізації (а), до оптимізації (б)

На рис.3.8 ми бачимо найкращий результат оптимізації в дБ з підкладинкою 0,1 мм із роєм частинок у 50 популяцій.

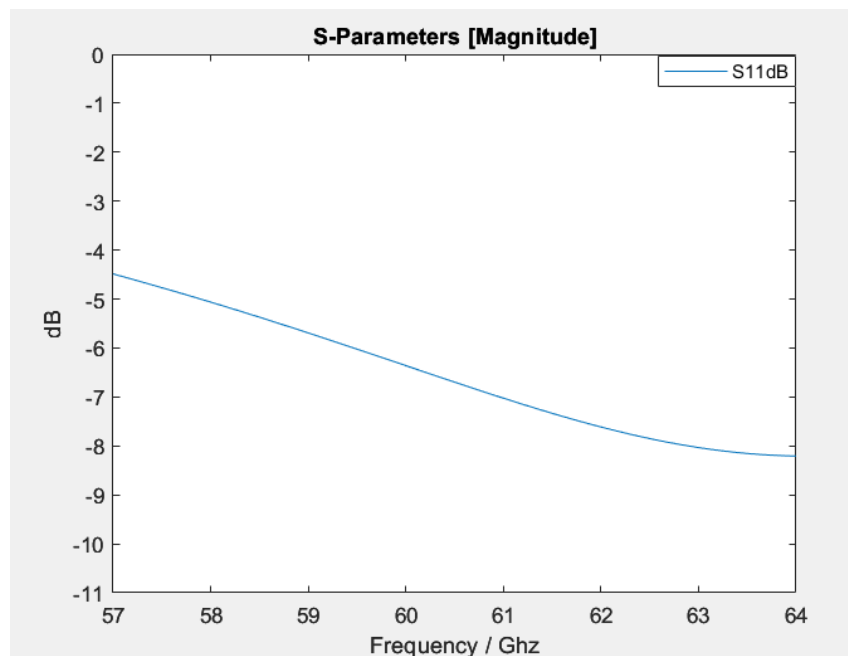


Рисунок 3.8 Найкращий графік S_{11} з підкладинкою 0,1 мм

Для оптимізованої мікросмушкової антени були розраховані діаграми спрямованості на початковій частоті 57 ГГц, на середній частоті 60.5 ГГц і на кінцевій частоті 64 ГГц. На рис. 3.9 приведені діаграми спрямованості на частоті 57 ГГц в тривимірному просторі, Е і Н полях. З рисунку 3.9 а видно, що головний пелюсток антени направлений прямо вздовж осі z, що говорить про нормальне узгодження антени. У Е полі діаграма спрямованості є несиметричною, зміщено максимумом ліворуч від осі z приблизно на 10° ; у Н полі діаграма спрямованості симетрична за площиною по осі x, що є непоганим результатом.

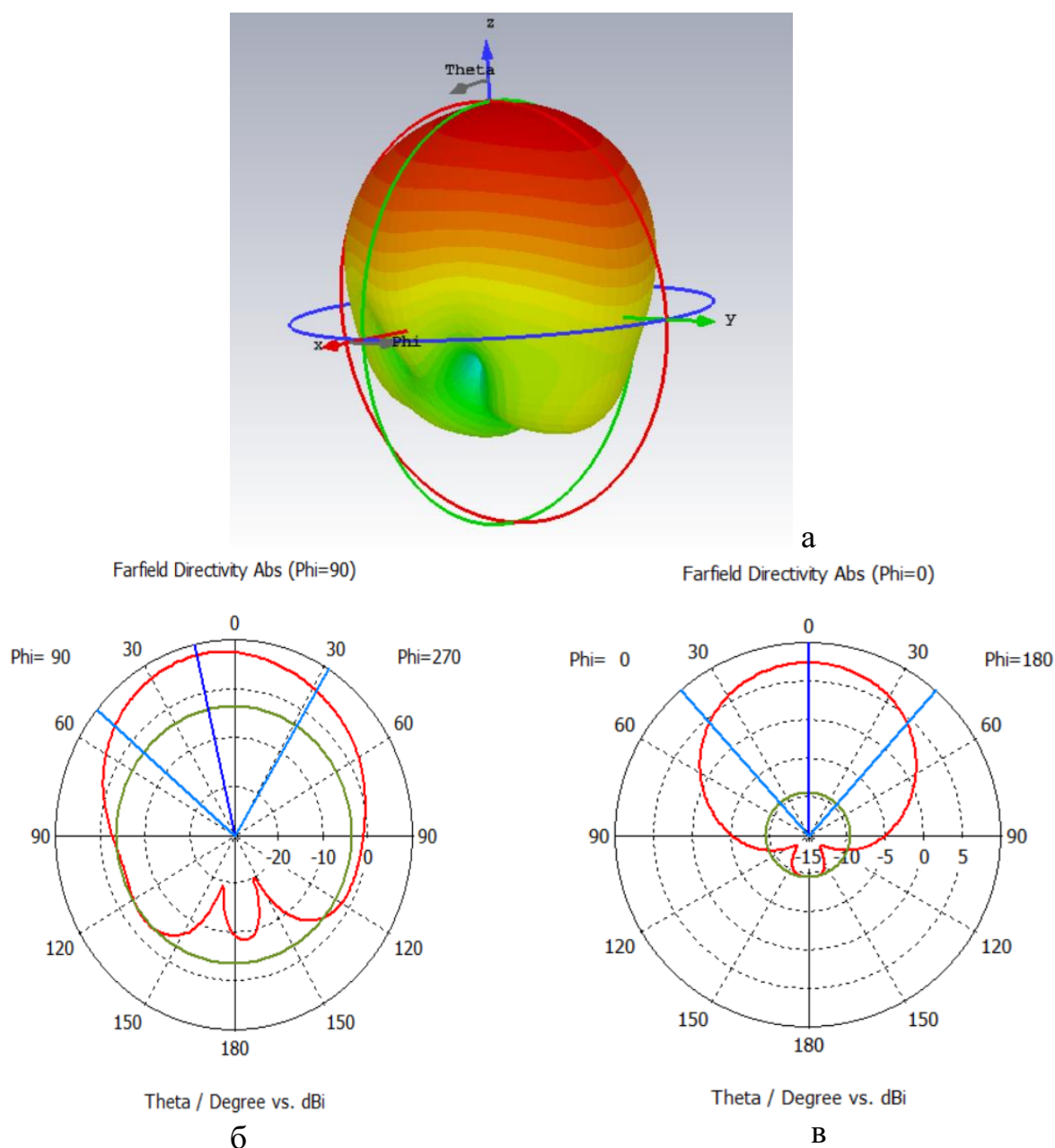
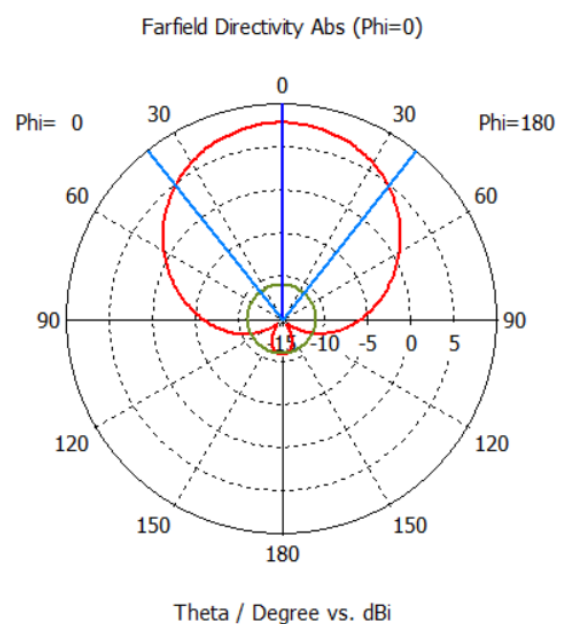
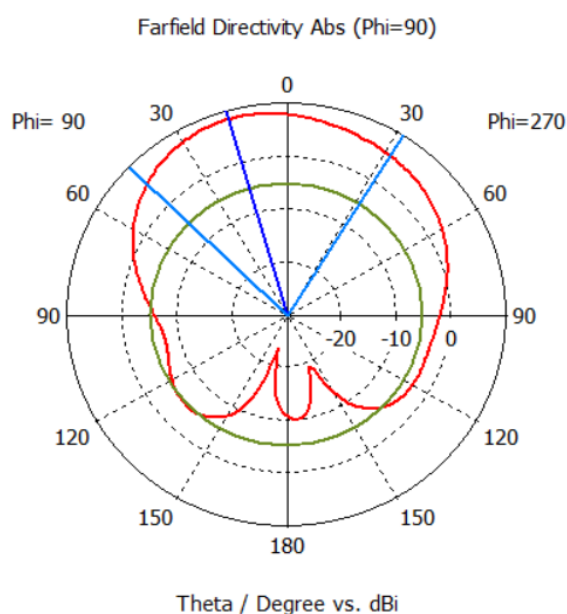
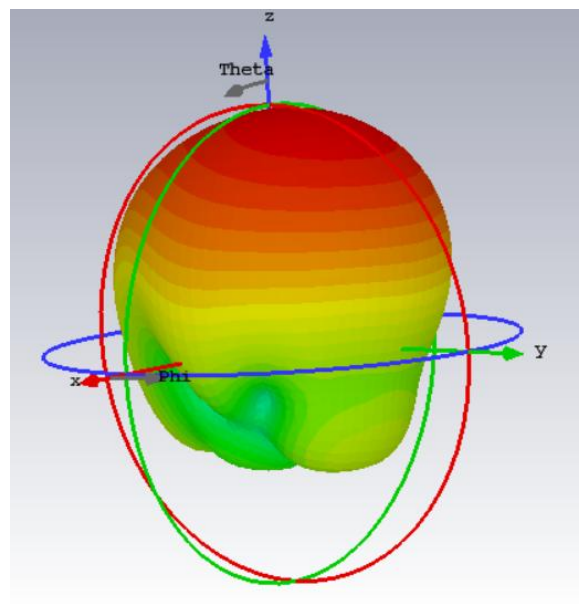


Рис. 3.9 Діаграма спрямованості мікросмушкової антени на 57 ГГц:

а) у тривимірному просторі; б) в Е-площині; в) в Н-площині

На рис. 3.10 приведені діаграми спрямованості на середній частоті 60.5 ГГц в тривимірному просторі, Е і Н полях. Багато в чому рисунок діаграм спрямованості на частоті 60,5 ГГц подібний до рисунку на частоті 57 ГГц. Але є відмінності: 1) в полі Е діаграма спрямованості більш сплюснена з максимумом по осі $\varphi=15^\circ$; 2) сама діаграма спрямованості в полі Е має гіршу симетрію; 3) задній пелюсток в полі Н більш вузький. Симетрія і полі Н зберігається по осі x .

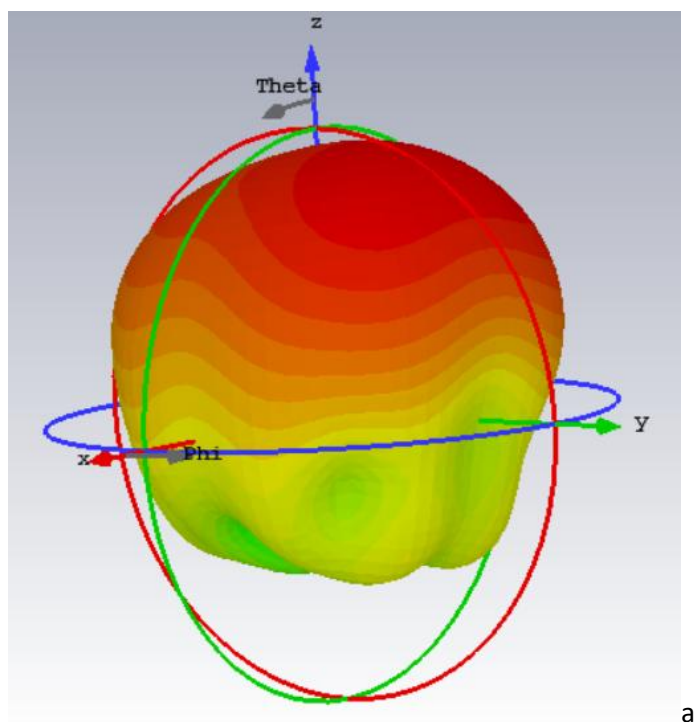


б

в

Рис.3.10 Діаграма спрямованості мікросмушкової антени на 60.5 ГГц: а) у тривимірному просторі; б) в Е-площині; в) в Н-площині

На рис. 3.11 приведені діаграми спрямованості на середній частоті 64 ГГц в тривимірному просторі, Е і Н полях. Багато в чому рисунок діаграм спрямованості на частоті 64 ГГц подібний до рисунку на нижчих частотах. Але теж є відмінності: 1) в полі Е діаграма спрямованості більш сплющена з максимумом по осі $\varphi=30^\circ$ та деформований задній пелюсток; 2) сама діаграма спрямованості в полі Е має гіршу симетрію, у порівнянні з попередніми двома варіантами; 3) задній пелюсток в полі Н більш ширший у порівнянні з двома варіантами. Симетрія і полі Н зберігається по осі x .



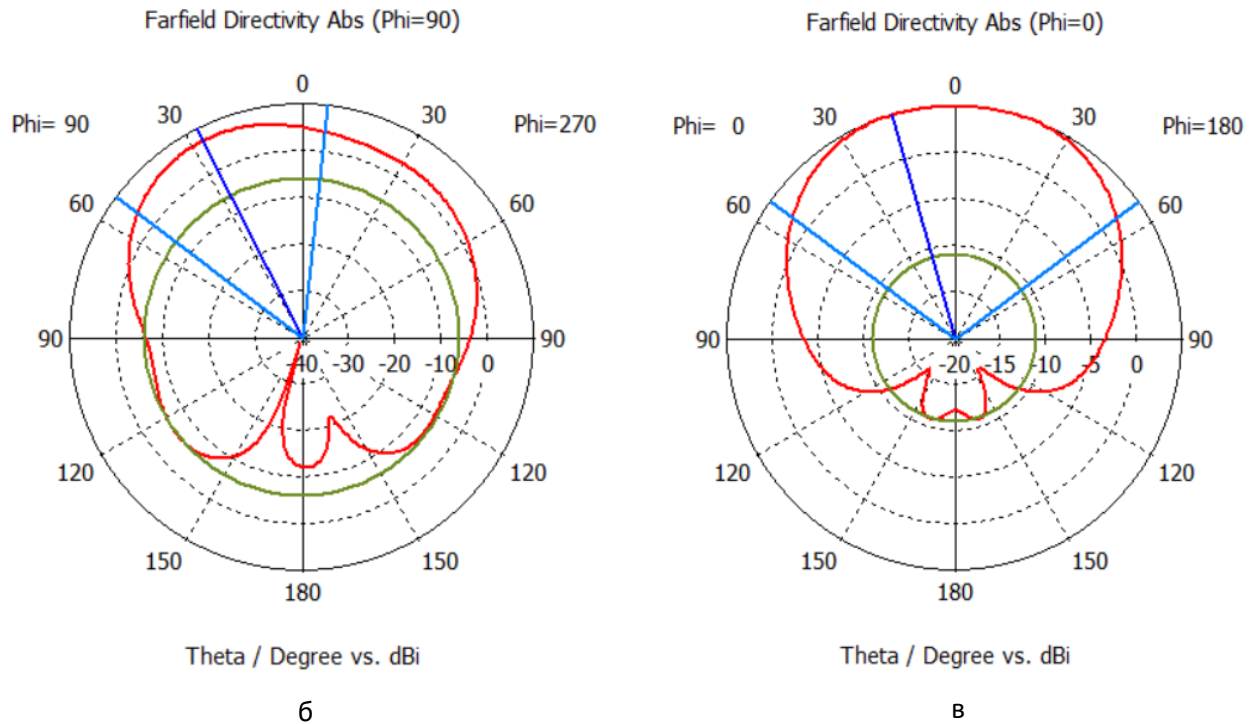
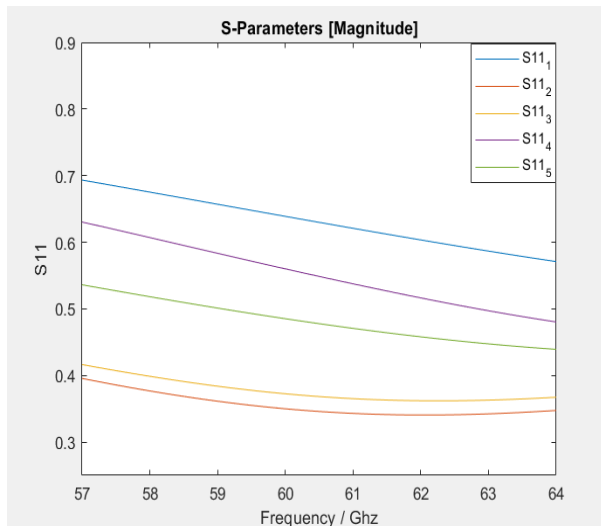


Рис .3.11 Діаграма спрямованості мікросмужкової антени на 64 ГГц: а) у тривимірному просторі; б) в Е-площині; в) в Н-площині

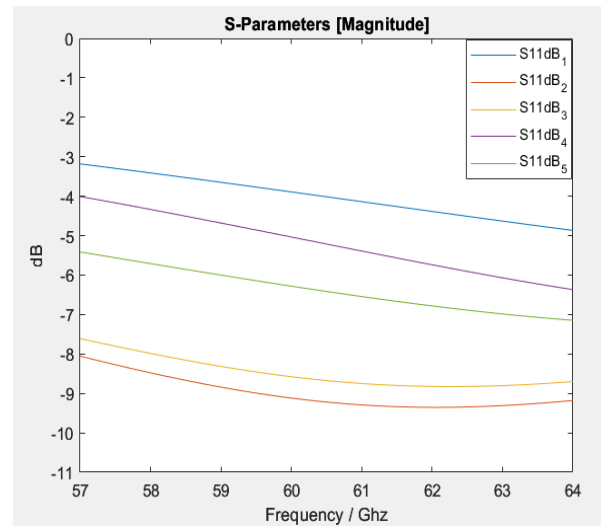
Найкращу, але не досконалу симетрію в полі Е має діаграма спрямованості на частоті 57 Гц. Найменший задній пелюсток діаграми спрямованості в полі Н відмічені для частоти 60,5 ГГц. На всіх частотах діаграма спрямованості в полі Н має симетрію по осі x . Для синтезу таких антен доцільно використовувати розмір популяції 50 особин.

3.2 Оптимізація антени з кроком 45° на підкладинці 0.167 мм

Аналогічно процедурі оптимізації для антени з підкладкою 0,1 мм була проведена відповідні обчислення для антени з підкладкою 0,167 мм. Результати обчислення наведені на рис. 3.12-3.17 у таблиці 3.7 та 3.8.



а



б

Рисунок 3.12 Частотна характеристика S_{11} мікросмужкової антени з підкладинкою 0,167 мм для популяції 15 особин у а) безрозмірних одиницях та б) децибелах

Геометрія антени з підкладинкою 0,167 мм з популяцією 15 особин та з розрахунку $S_{11(2)}$ представлена на рис. 3.13.

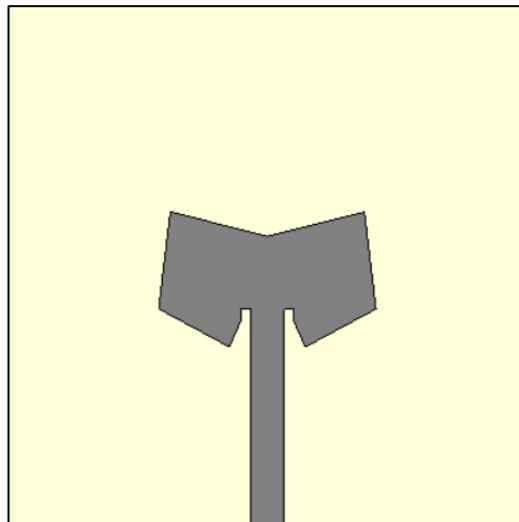


Рисунок 3.13 Геометрія антени з підкладинкою 0,167 мм з популяцією 15 особин та з розрахунку $S_{11(2)}$

Аналіз частотних характеристик S_{11} для популяції 15 особин (мікросмужкова антена з підкладкою 0,167 мм) дозволяє стверджувати про наявність двох груп залежностей (рис. 3.12). Перша група представлена трьома кривими, що відповідають $S_{11(1)}$, $S_{11(4)}$, $S_{11(5)}$ номеру запуску алгоритму оптимізації, тоді як до другої групи відноситься $S_{11(2)}$ і $S_{11(3)}$ номери. Криві першої групи мають лінійні форму, тоді як другої групи – параболічну, що свідчить про досягнення ітераційного розрахунку з мінімальними значеннями S_{11} .

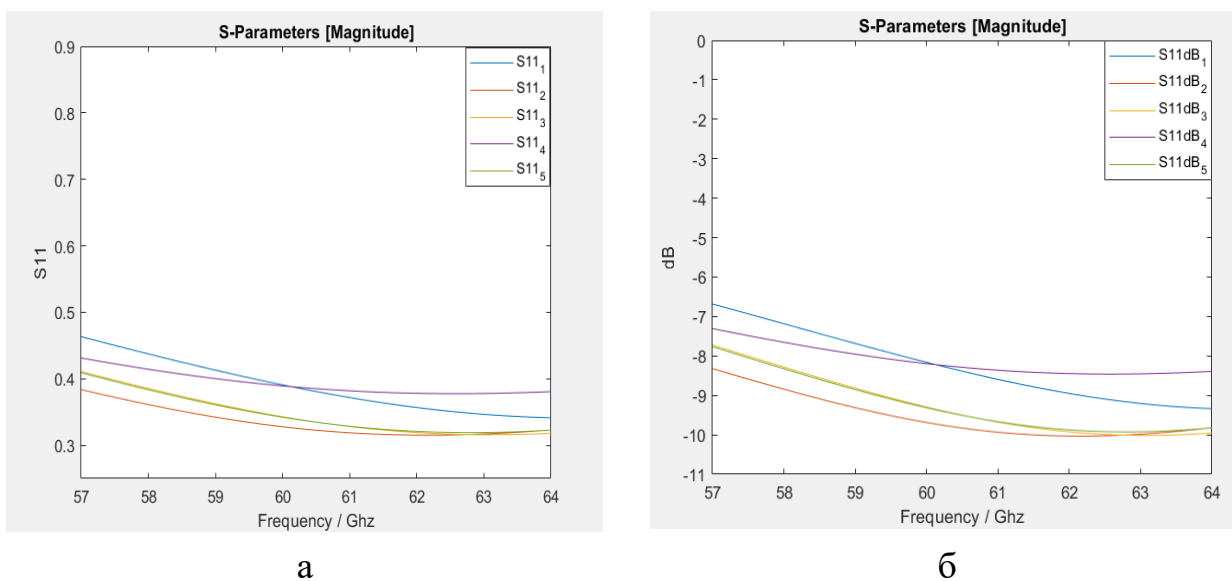


Рисунок 3.14 Частотна характеристика S_{11} мікросмужкової антени з підкладкою 0,167 мм для популяції 30 особин у а) безрозмірних одиницях та б) децибелах

Геометрія антени з підкладкою 0,167 мм з популяцією 30 особин та з розрахунку $S_{11(2)}$ представлена на рис. 3.15.

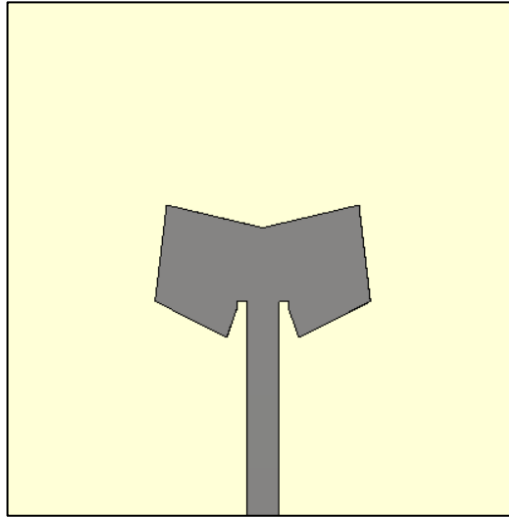
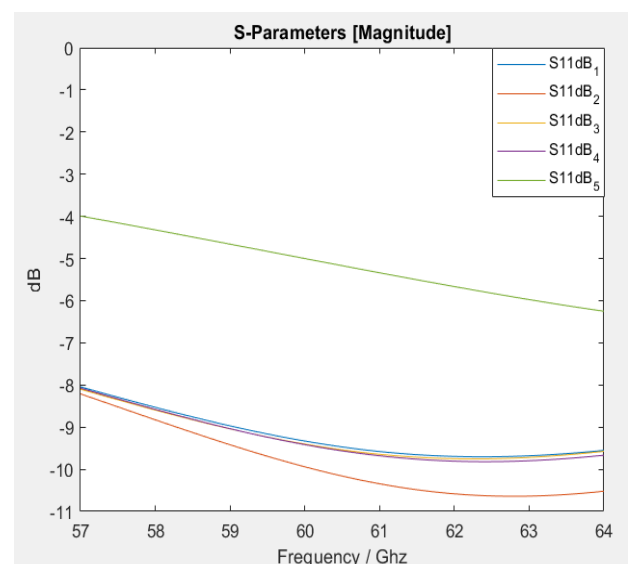
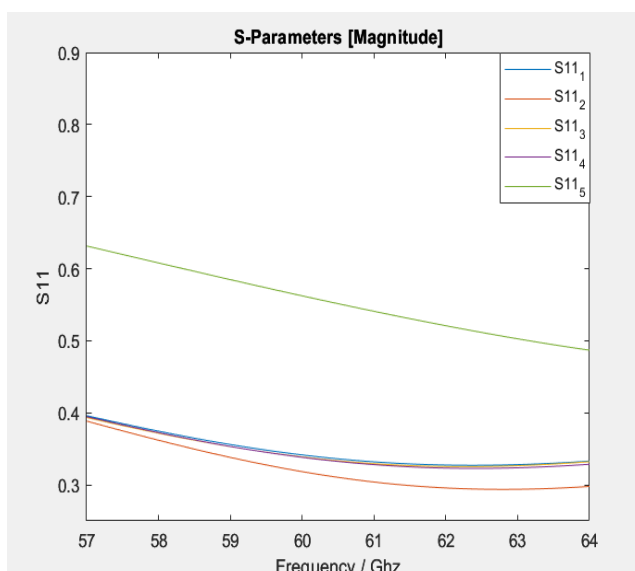


Рисунок 3.15 Геометрія антени з підкладкою 0,167 мм з популяцією 30 особин та з розрахунку $S_{11(2)}$

Аналіз частотних характеристик S_{11} для популяції 30 особин мікросмужкової антени з підкладкою 0,167 мм має відмінність в кривих, які полягають в тому, що різні запуски відрізняються за кількістю ітерацій. Але чим більша кількість ітерацій, тим краще досягається оптимальніше значення S_{11} . Група $S_{11(5)}$, $S_{11(3)}$ і $S_{11(2)}$ мають зближені траєкторії розрахунку алгоритму.

Із 5-ти запусків алгоритму оптимізації мікросмужкової антени з підкладкою 0,167 мм та кількістю особин в 30, найкращим є $S_{11(2)}$ із значенням S_{11} в 0,39.



а

б

Рисунок 3.16 Частотна характеристика S_{11} мікросмушкової антени з підкладкою 0,167 мм для популяції 50 особин у а) безрозмірних одиницях та б) децибелах

Геометрія антени з підкладкою 0,167 мм з популяцією 50 особин та з розрахунку $S_{11(2)}$ представлена на рис. 3.17.

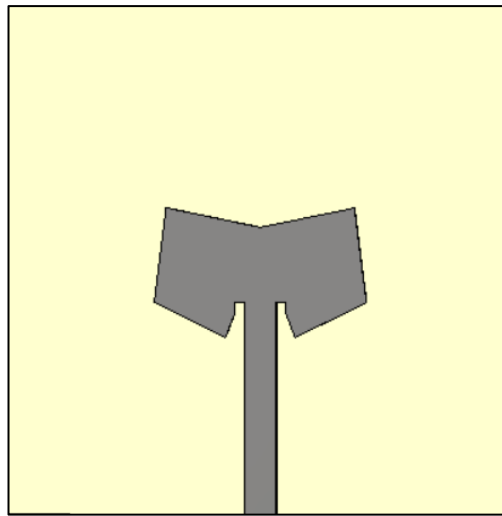


Рисунок 3.17 Геометрія антени з підкладкою 0,167 мм з популяцією 50 особин та з розрахунку $S_{11(2)}$

Із 5-ти запусків алгоритму оптимізації мікросмушкової антени з підкладкою 0,167 мм та кількістю особин в 50 сформовано дві неоднакові групи, яка належить найчисельнішій групі (4 запуски), які мають відносно гарну збіжність між собою. Найкращим запуском є крива $S_{11(2)}$.

В таблиці 3.7 наведені результати оптимізації коефіцієнта відбиття оптимізованої антени, де S_{11} (найгірше рішення) є найбільшою величиною S_{11} з усього масиву отриманих даних. S_{11} (середнє рішення) - середнє арифметичне з усього масиву отриманих S_{11} .

Таблиця 3.7 Розрахункові параметри S_{11} мікросмушкової антени з підкладинкою 0,167 мм (N - номер запуску алгоритму оптимізації; V - кількість особин у популяції)

N	S ₁₁ (найгірше рішення)			S ₁₁ (середнє рішення)		
	V	15	30	50	15	30
1	0.69	0.46	0.39	0.63	0.38	0.34
2	0.39	0.38	0.38	0.35	0.33	0.32
3	0.41	0.41	0.39	0.37	0.34	0.34
4	0.63	0.43	0.39	0.55	0.39	0.34
5	0.53	0.40	0.63	0.48	0.34	0.55

В таблиці 3.8 показані результати оптимізації, де tr - кількість виконаних ітерацій АБР; також показано тривалість оптимізації в хвилинах.

Таблиця 3.8 Розрахункові параметри tr та часу оптимізації мікросмушкової антени з підкладинкою 0,167 мм (N - номер запуску алгоритму оптимізації; V - кількість особин у популяції)

N	tr			Час (хв)		
V	15	30	50	15	30	50
1	50	50	50	750	1500	2500
2	50	50	50	750	1500	2500
3	50	50	50	750	1500	2500
4	50	20	50	750	600	2500
5	50	50	50	750	1500	2500

В таблиці 3.9 наведені результати оптимізації коефіцієнта відбиття оптимізованої антени, де cost_temp (найгірше рішення) – найбільша величина з усього масиву отриманих cost_temp. Параметр cost_temp (середнє рішення) - середнє арифметичне масиву отриманих cost_temp.

Таблиця 3.9 Розрахункові параметри $cost_temp$ мікросмужкової антени з підкладинкою 0,167 мм (N - номер запуску алгоритму оптимізації; V - кількість особин у популяції)

N	cost_temp (найгірше рішення)			cost_temp (середнє рішення)			
	V	15	30	50	15	30	50
1		187.66	166.64	177.08	168.82	97.17	75.32
2		195.86	206.27	193.47	93.08	86.71	85.79
3		172.73	192.56	175.60	94.10	98.01	73.03
4		201.76	149.27	187.18	156.97	95.81	77.19
5		178.92	202.58	184.89	134.32	83.26	150.25

В таблицях 3.10-3.12 показані результати оптимізації розмірів антени для 15, 30 і 50 особин у популяції.

Таблиця 3.10 Розрахункові параметри a_i (мм) мікросмужкової антени з підкладинкою 0,167 мм для 15 особин у популяції

N	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
1	0.20	0.59	1.7	1.24	1.59	0.76
2	0.29	0.15	0.61	1.24	1.57	0.83
3	0.26	0.54	0.50	1.24	1.54	0.97
4	0.22	0.69	1.70	1.25	1.69	1.13
5	0.21	0.49	0.81	1.25	1.32	0.69

Таблиця 3.11 Розрахункові параметри a_i (мм) мікросмужкової антени з підкладинкою 0,167 мм для 30 особин у популяції

N	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
1	0.23	0.19	0.75	1.25	1.47	0.65
2	0.30	0.10	0.59	1.25	1.57	0.85
3	0.29	0.55	0.50	1.24	1.54	0.92
4	0.25	0.13	0.61	1.25	1.53	0.87

5	0.29	0.68	0.50	1.24	1.53	0.88
---	------	------	------	------	------	------

Таблиця 3.12 Розрахункові параметри a_i (мм) мікросмушкової антени з підкладинкою 0,167 мм для 50 особин у популяції

N	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
1	0.30	0.34	0.54	1.25	1.56	0.92
2	0.30	0.15	0.58	1.25	1.56	0.88
3	0.30	0.52	0.51	1.24	1.56	0.92
4	0.30	0.27	0.55	1.24	1.56	0.91
5	0.23	0.67	1.70	1.25	1.70	1.15

Мікросмушкова антена з підкладинкою 0,167 мм до і після оптимізації представлено на рис. 3.18.

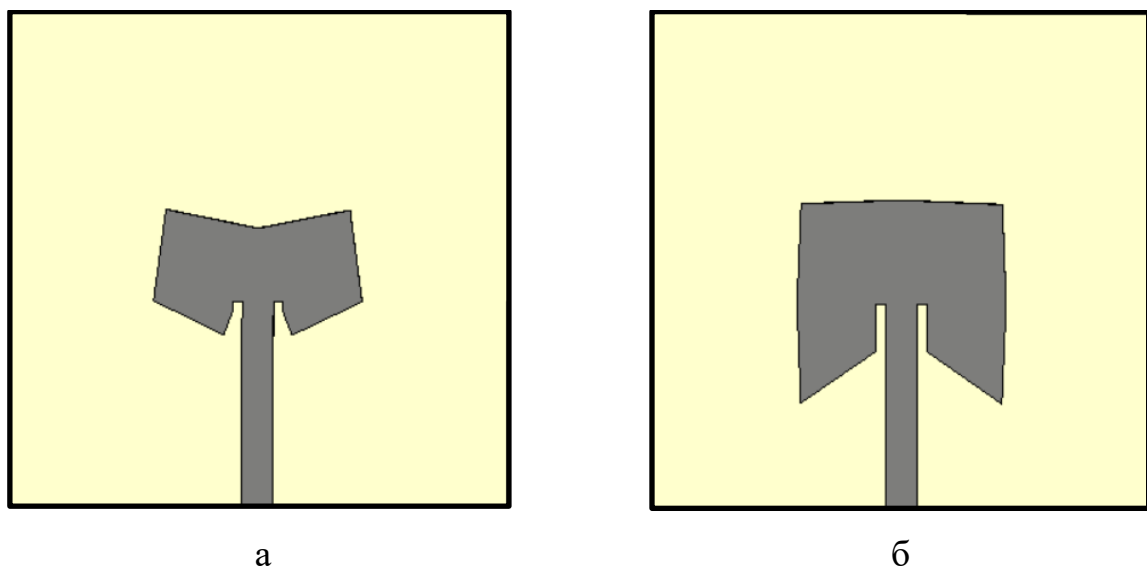


Рисунок 3.18 Мікросмушкова антена з підкладинкою 0,167 мм : після оптимізації (а), до оптимізації (б)

На рис.3.18 можна бачити як за допомогою оптимізації зменшилися розміри профілю мікросмушкової антени з підкладинкою 0,167 мм, зокрема зменшення площі профілю тощо.

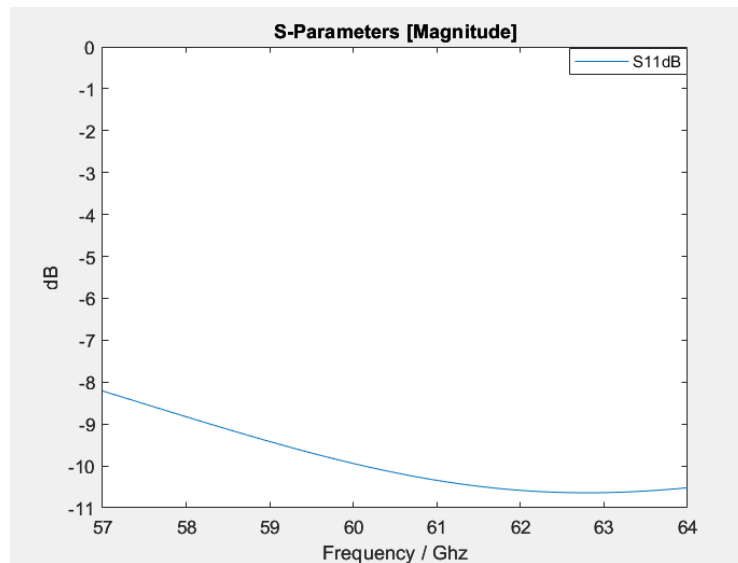


Рисунок 3.19 Найкращий графік S_{11} з підкладинкою 0,167 мм

На рис. 3.19 ми бачимо найкращий результат оптимізації в дБ з підкладинкою 0,167 мм із роєм частинок 50 популяцій.

Для оптимізованої мікросмужкової антени були розраховані діаграми спрямованості на початковій частоті 57 ГГц, на середній частоті 60.5 ГГц і на кінцевій частоті 64 ГГц. На рис. 3.20 приведені діаграми спрямованості на частоті 57 ГГц в тривимірному просторі, Е і Н полях. З рисунку видно, що головний пелюсток направлений прямо по осі z, що говорить про нормальне узгодження антени. У Е полі головний пелюсток антени є несиметричним, з розвиненою задньою трилопатевою пелюсткою. Максимум передньої пелюстки розташований вздовж осі $\varphi=15^\circ$. Діаграма спрямованості в полі Н полі повністю симетрична, по осі x. Не має задньої пелюстки.

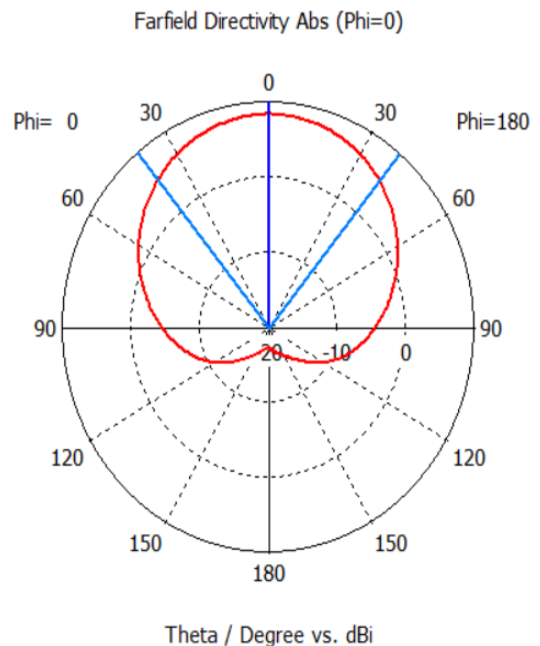
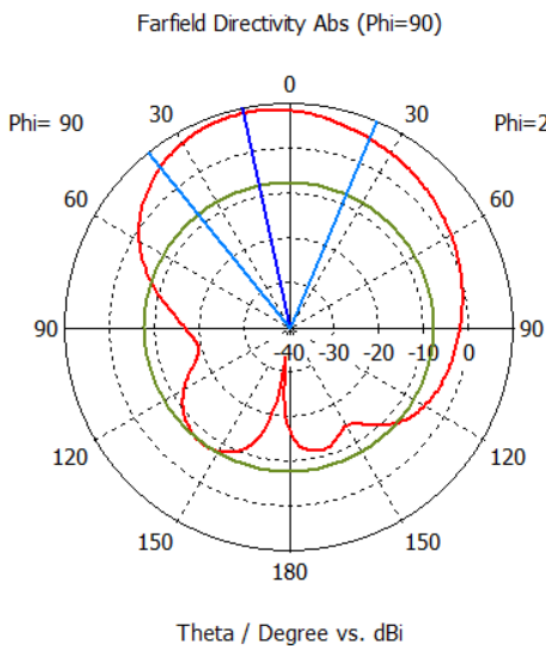
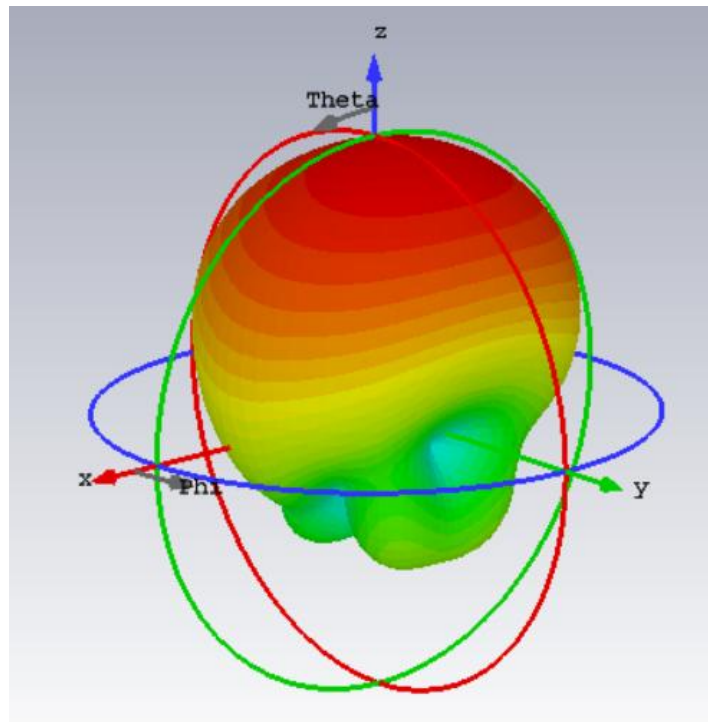


Рис. 3.20 Діаграма спрямованості мікросмужкової антени на 57 ГГц: а) у тривимірному просторі; б) в Е-площині; в) в Н-площині

На рис. 3.21 приведені діаграми спрямованості на середній частоті 60.5 ГГц в тривимірному просторі, Е і Н полях. З рисунку 3.21 видно відмінності від конфігурації діаграми спрямованості на частоті 57 ГГц. По-перше, в площині Е зміщення осі максимуму до осі $\varphi=30^\circ$, редукування задньої пелючтик в

дволапатеу. Симетрія відсутня. В полі Н симетрія зберігається по осі x , але формується невелика дволапатева задня пелюстка.

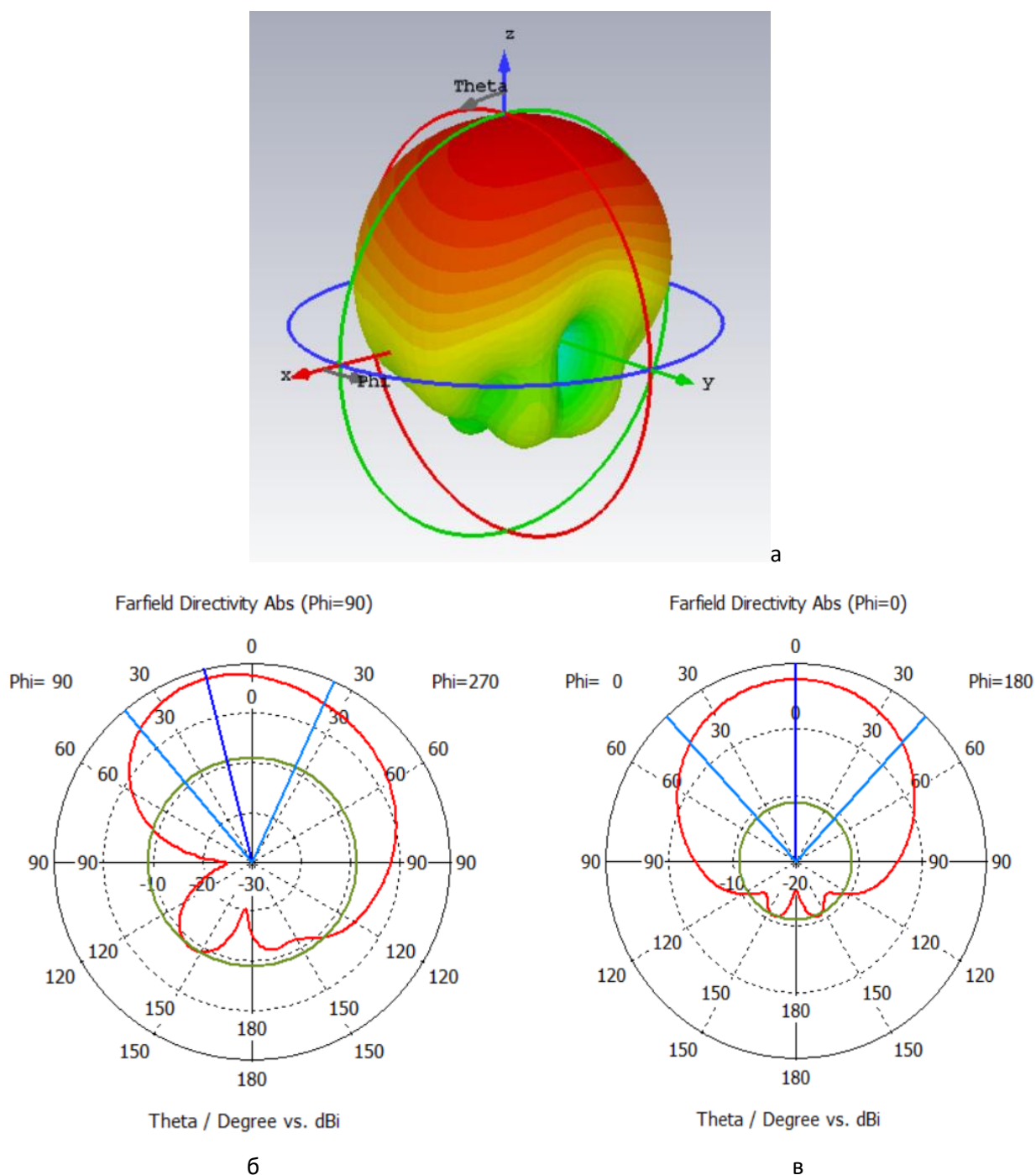


Рис. 3.21 Діаграма спрямованості мікросмужкової антени на 60.5 ГГц: а) у тривимірному просторі; б) в Е-площині; в) в Н-площині

На рис. 3.22 приведені діаграми спрямованості на середній частоті 64 ГГц в тривимірному просторі, Е і Н полях. Вони мають відмінності від діаграм

перших двох частот. Для поля Е, відсутня симетрія у будь-якому перерізі. Максимум передньої пелюстки орієнтований вздовж осі $\varphi=15^\circ$. Задня пелюстка розвинена, має складну конфігурацію. В полі Н зберігається симетрія вздовж осі x . Як і в передній, так і в задній пелюстці пристуні два максимуми. Перші рознесені симетрично на 60° , а задні на 40° . Для задньої напівсфери сформований мінімум на 180° .

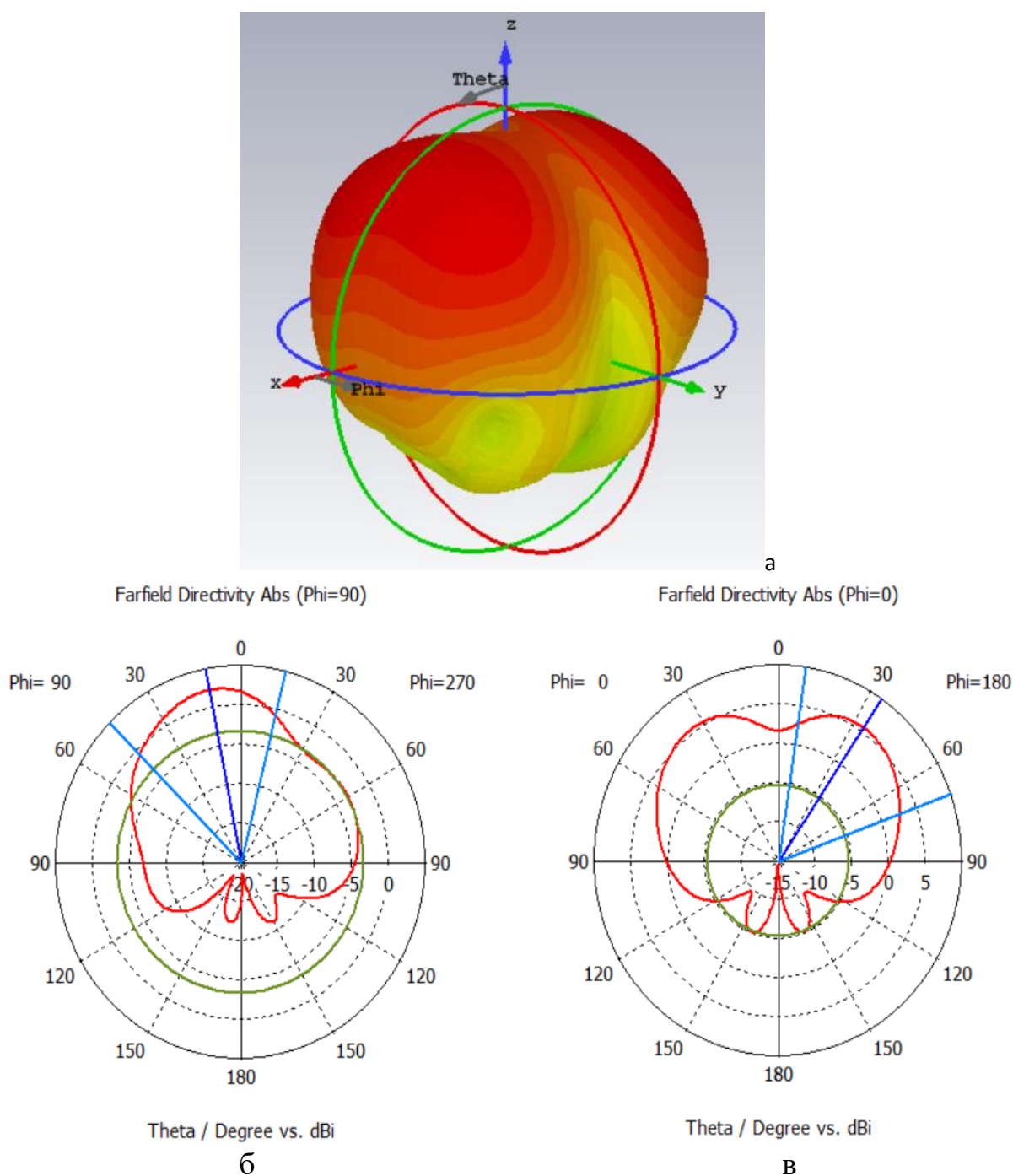


Рис. 3.22 Діаграма спрямованості мікросмужкової антени на 64 ГГц: а) у тривимірному просторі; б) в Е-площині; в) в Н-площині

Для всіх частот, в полі Е, сформовані несиметричні діаграми спрямованості; в полі Н симетричні. Із збільшення частоти, в площині Н виникає мінімум у передній і задній пелюстці по осі х, одночасно із деформацією еліпсу. Для синтезу таких антен необхідно використовувати розмір популяції 30 особин.

3.3 Висновки за розділом 3

За результатами проведених досліджень встановлено, що профільована мікросмужкова антена для діапазону частот 57-64 ГГц при її синтезі алгоритмом бджолиного рою на підкладинці товщиною 0.1 мм досягає найкращого значення коефіцієнта відбиття 0,6 при використанні 15 кількості особин у рої, 0,6 відповідно при 30 та 0,59 для 50. При використанні товщини підкладинки 0.167 мм: 0,39 при використанні 15 кількості особин у рої, 0,38 при 30 та 50 особин.

Проте, враховуючи втрати часу на роботу алгоритму оптимізації, можна стверджувати, що більш прийнятним для практичного використання є вибір розміру популяції в 30 особин, що надаватиме перевагу в 40% часу.

4. Розробка стартап проекту

4.1 Вступ

Сьогодні знаходить застосування широкий спектр радарів, в яких використовуються антенні решітки різного дизайну і призначення. Найпоширеніші з них є військові і морські радари, антени супутникових телекомунікаційних систем та ін. Елементи антен, що працюють в діапазоні частот 57-64 ГГц, характеризуються міліметровими розмірами. Ідея проекту полягає у розробці дизайну антени, яка є елементом антенної решітки, що має малий розмір, низьке енергоспоживання, доступність її елементів для виготовлення і монтажу (відносно низьку вартість), нескладну технологію виготовлення. Ці перелічені особливості будуть вирізняти антену даної розробки серед її аналогів. Оскільки на ринку не присутні вітчизняні антени із заданими характеристиками дану розробку можна вважати актуальною і потенційно привабливою для конструкторів і виробників радарних систем різного призначення.

Можливі напрямки застосування розробки: радари міліметрового діапазону цивільного і військового призначення. На ринку присутня невелика кількість операторів які використовують даний вид продукції (табл 4.1).

Таблиця 1.1 Попередня характеристика потенційного ринку мікросмужкової антени міліметрового діапазону

№ n/n	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	2
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	1000 грн
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	<u>Зростає</u>
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Ціна/якість
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	широка смуга частот; низька вартість виготовлення антени (доступність матеріалів для виготовлення і процес виготовлення малозатратний і технологічний); гнучкість при комбінації антен

		при виготовленні антенних решіток
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	10-14%

4.2 Стислий технічний опис розробки

Антенa становить собою квадратну багатошарову пластину розміром 6×6 мм виготовлену із матеріалу R04352b; нижня частина металічна - підложка («земля»), верхня частина - оптимізований патч (власне антенa), який живиться мікросмужковою лінією з вхідним опором 50 Ом (рис. 1).

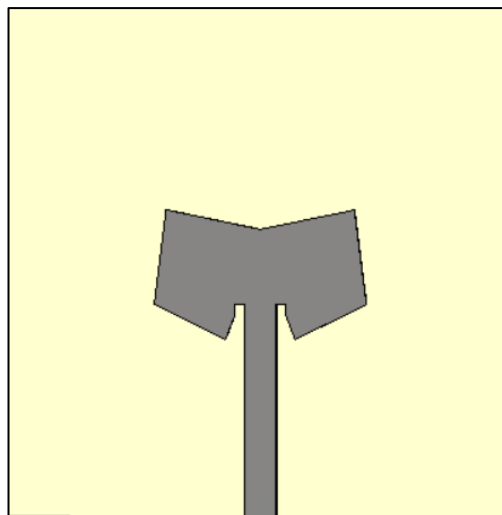


Рис. 4.1 Антенa (вигляд зверху, профіль антени (сірий фон) на підкладинці (жовтий фон))

Антенa забезпечує коефіцієнт відбиття -8,2 дБ, має широку робочу смугу частот 7 ГГц.

4.3 Вигоди впровадження розробки

Основні вигоди, які може отримати споживач даної розробки:

- робота антени в широкій смузі частот;

- низька вартість виготовлення антени (доступність матеріалів для виготовлення і процес виготовлення малозатратний і технологічний);
- гнучкість при комбінації антен при виготовленні антенних решіток.

4.4 Очікувана технологія виготовлення: рівень складності, матеріалозатратність

Рівень складності виготовлення даного проекту середній, оскільки технологічний процес повинен дотримуватися допусків при обробці поверхонь профілю на рівні $\pm 0,05$ мм. Доступність матеріалів для виготовлення продукції є задовільною, так як велика кількість компаній пропонують матеріали із заданими характеристиками.

4.5 Здатність до поліпшення і удосконалення

В майбутньому розробки даного стартап проекту можуть бути спроби до покращення характеристик. Перед усім це стосується можливістю поглибити оптимізацію антени, що дасть змогу поліпшити коефіцієнт відбиття, мініатюризація тощо.

4.6 Очікувані споживачі розробки

Ринок радарів з частотою 60 ГГц перебуває на стадії початкового росту. Збільшення попиту на супутниковий зв'язок, якісне і кількісне розширення радарів на морських судах, в останній час бурхливий попит військових радарів обумовлюватиме зростання збільшення кількості пропозиції. Очевидно, що компанії які розробляють радарні системи будуть пропонувати широкий спектр технічних розробок, у тому числі і мікросмужкові антени. В таблиці 4.2 наведена характеристика потенційних клієнтів мого стартап-проекту, а в таблиці 4.3 потенційні споживачі.

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
	Розвиток радарних систем і систем зв'язку	Люди які хочуть отримати кращі радари і системи зв'язку	Клієнт має бути впевнений у якості продукту. Має розуміти для чого це йому потрібно і як це використати.	Продукт має бути не дорогим і зручним для використання.

Таблиця 4.3 Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
	Військова	Радари є затребуваним для ППО	Підтримка від держави
	Морська	В морі є потреба розрізняти шлях (кожен корабель має радар)	Підтримка від держави
	5G зв'язок	Покращення інтернету і зв'язку	Збільшення продажів
	Антенні системи	Розробка більш кращих систем	Співпраця з другими компаніями

4.7 Ймовірні ризики і загрози при впровадженні стартап проекту

При реалізації стартапу можливі ризики і загрози різного походження, Ключовими із них є погана обізнаність потенційних споживачів з характеристиками і можливостями даної розробки, що потребує окрім технологічних витрат на просування розробки, також інформаційного забезпечення (створення сайту провайдера, підтримка сторінок в соціальних мережах, реклама в спеціалізованих медіа, у тому числі і в інтернеті). Короткий перелік загроз розвитку стартапу наведений в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Не знання товару споживачем	Новий продукт на ринку може просто не потрапляти на очі цільовій аудиторії	Поширення інформації про те що дана сфера має розвиватися і співпраця з державою
2	Боротьба з конкурентами на ринку	Конкурент може витіснити нас з ринку, якщо зроблять кращий продукт	Здешевити собівартість продукту
3	Форс-мажор	Обмеження ліцензування даного виду робіт від уряду і Укрчастотнагляду	Витрати на отримання ліцензії і дозволів
4		Військові дії (припинення імпорту критичних матеріалів)	Пошук замінників матеріалів які використовуються для виготовлення продукції

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі було проведено моделювання антени і оптимізація профілю алгоритмом АБР. За допомогою оптимізації вдалося досягти широку робочу смугу в 7 ГГц. Оптимізація була проведена на двох різних підкладинках. Після дослідження встановлено, що на підкладинці 0.167 мм коефіцієнт відбиття становить -8.21 дБ, а підкладинці 0.1 мм -4.48 дБ. В роботі було досліджено, що оптимізація із роєм у кількості 30 особин, не набагато гірша за рій з популяцією у 50 особин. Тому для оптимізації краще обирати підкладинку 0.167 мм і розмір популяції у 30 особин. Хоч і при розмірі популяції в 30 особин результат оптимізації трохи гірший, зате за часом обчислення алгоритму набагато швидше.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Musa Hussain, Syed Muhammad Rizvi, Anees Abbas, Asad Nadeem, Imtiaz Alam and Ahsan Iftikhar, “A Wideband Antenna for V-Band Applications in 5G Communications,” IEEE International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technologies (IBCAST), January 2021. <https://doi.org/10.1109/IBCAST51254.2021.9393018>.
2. Mohsin Iqbal, Syed Muhammad Rizvi Jarchavi, Mohammad Alibakhshikenari and Mariana Dalarsson, “Stair Geometry Inspired Ultra-Wideband Antenna with Simple Feeding Mechanism and Loaded by Circular-Slot for 5G Applications Over the V- and E-Bands,” IEEE International Workshop on Antenna Technology (iWAT), May 2022. <https://doi.org/10.1109/iWAT54881.2022.9810907>.
3. Sam Morrar, Hughes Network Systems, LLC, Germantown, Md, “Using E-band for Wideband Satcom: Opportunities and Challenges,” *Microwave Journal*, August 2021.
4. Gayatri Chittimoju and Usha Devi, “A Comprehensive Review on Millimeter Waves Applications and Antennas,” Journal of Physics Conference Series 1804(1):012205, February 2021. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1804/1/012205>.
5. Balanis C. A. - Antenna Theory - Analysis and Design, 4th Edition – 2016, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey Published simultaneously in Canada.
6. Shiban Kishen Koul and Zamir Wani, “Novel Millimetre Wave Antennas for MIMO and 5G Applications,” Lecture Notes in Electrical Engineering (LNEE, volume 819), 2021.
7. Eran Fishlert, Alex Haimovicht, Rick Blumt, Dmitry Chizhik, Len Cimini and Reinaldo Valeneuela, “MIMO RADAR: AN IDEA WHOSE TIME HAS COME,” Proceedings of the 2004 IEEE Radar Conference (IEEE Cat. No.04CH37509).

8. Dhananjay Singh, Surya Deo Choudhary and B. Mohapatra, "Design of microstrip patch antenna for Ka-band (26.5–40 GHz) Applications," *materialstoday proceedings* Volume 45, Part 2, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.805>.

9. Clement J. Vourch and Timothy D. Drysdale, "Directivity Enhancement of V-band "Bull's Eye" Antenna with Dielectric Superstrate," *IEEE Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, 2014. <http://dx.doi.org/10.1109/LAPC.2014.6996375>.

10. J. Kennedy R. Eberhart, "Particle swarm optimization," *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, November 1995 <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>.

11. Jacob Robinson and Yahya Rahmat-Samii, "Particle Swarm Optimization in Electromagnetics," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, February 2004 <http://dx.doi.org/10.1109/TAP.2004.823969>.

12. Василенко Д. О. Сучасні методи аналізу, синтезу і оптимізації пристроїв надвисоких частот та антен. Навчально-методичні матеріали (ТОР) 2015.

13. S. K. Behera and Y. K. Choukiker, "Design and Optimization of Dual Band Microstrip Antenna Using Particle Swarm Optimization Technique," *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves* volume 31, pages1346–1354 (2010). <http://dx.doi.org/10.1007/s10762-010-9722-0>.

14. Chirag Arora and Shyam S. Pattnaik, "Particle swarm optimization based metamaterial inspired circularly polarized patch antenna for S band applications," *Evolutionary Intelligence* volume 14, pages 801–810 (2021). <https://link.springer.com/article/10.1007/s12065-020-00455-z>.

15. X. F. Liu a, Y. B. Chen b, Y. C. Jiao c & F. S. Zhang d Modified Particle Swarm Optimization for Patch Antenna Design Based on IE3D," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, October 2014 <http://www.tandfonline.com/loi/tewa20>.

16. J. M. Jeevani W. Jayasinghe, Jaume Anguera, Disala N. Uduwawala and Aurora Andújar, “Nonuniform Overlapping Method in Designing Microstrip Patch Antennas Using Genetic Algorithm Optimization,” Research Article | Open Access Volume 2015. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/805820>.

17. Василенко Д. О. Природні алгоритми оптимізації в задачах синтезу вбудованих антен ІОТ пристроїв (Огляд), 2022. <https://doi.org/10.20535/S0021347022030013>.

18. Mohammed Lamsalli, Abdelouahab El Hamichi, Mohamed Boussouis, Naima A. Touhami and Taj-eddin Elhamadi, “Genetic Algorithm Optimization for Microstrip Patch Antenna Miniaturization,” Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 60, 113-120, 2016. <http://dx.doi.org/10.2528/PIERL16041907>.

19. Lam Vu Tung, Linh Ho Manh, Chien Dao Ngoc, Michele Beccaria and Paola Pirinoli, “Automated Design of Microstrip Patch Antenna Using Ant Colony Optimization,” International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), 2019. <https://doi.org/10.1109/ICEAA.2019.8879031>.

20. Rogers Corporation. Online Microwave Impedance Calculator Отримано з сайту <https://www.rogerscorp.com>.