

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ АНТЕН GPS ТА BLUETOOTH У
КВАЗІОПТИЧНОМУ ДІАПАЗОНІ
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання
групи МНПм – 23 – 1

Чавка О.О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 176 Мікро та наносистемна техніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма

«Мікро- та наноелектронні прилади та пристрої»
(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент О.Г. Пащенко
(посада, ініціали, прізвище)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

І.М. Бондаренко
(ініціали, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____

Кафедра _____ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 176 Мікро та наносистемна техніка _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____

Освітня програма «Мікро- та наноелектронні прилади та пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

здобувачеві _____ Чавка Олександр Олександрович _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження випромінювання антен GPS та Bluetooth у квантооптичному діапазоні _____

затверджена наказом по університету від 10.12.2024 р. № 1291 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 09.01.2025 р. _____

3. Вихідні дані до роботи: Пакет програм Ansys HFSS, антена GPS з частотою від 30 до 100 ГГц, антена Bluetooth частота від 30 до 40 ГГц. _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: _____

4.1 Теоретичні основи роботи антен GPS та Bluetooth; _____

4.2. Особливості моделювання антен у програмному середовищі HFSS; _____

4.3 Провести розрахунок антен GPS та Bluetooth у квантооптичному діапазоні за допомогою пакету програм Ansys HFSS; _____

4.4 Аналіз отриманих результатів моделювання. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів): слайд-презентація, схема антени Bluetooth, схема антени GPS

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	25.10.2024	
2	Аналітичний огляд джерел	29.10.2024	
3	Моделювання антен GPS	10.11.2024	
4	Моделювання антен Bluetooth	15.11.2024	
5	Аналіз отриманих результатів	17.11.2024	
6	Оформлення пояснювальної записки	25.12.2024	
7	Підготовка презентації	02.01.2025	
8	Рецензування, нормоконтроль		
9	Захист роботи	17.01.2025	

Дата видачі завдання _10_ ____ 12 ____ 2024 р.

Здобувач _____ О.О. Чавка
(підпис)

Керівник роботи _____ доцент каф. МЕЕПП О.Г. Пашенко
(підпис) (посада, ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра містить 34 сторінок, 12 рисунків, 1 таблиця, 14 джерел, 3 додатки.

ПАКЕТ ПРОГРАМ HFSS, АНТЕНИ GPS ТА BLUETOOTH, МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК АНТЕН У КВАЗІОПТИЧНОМУ ДІАПАЗОНІ.

Об'єкт дослідження – GPS та Bluetooth антени.

Мета роботи – моделювання антен GPS та Bluetooth у квазіоптичному діапазоні за допомогою програмного пакета HFSS.

Метод дослідження – проведення дедуктивно-аналітичного аналізу існуючих антен GPS та Bluetooth, а також алгоритмів їхньої роботи; виконання розрахунків характеристик антен та подальший аналіз отриманих результатів.

У роботі здійснено моделювання антен GPS і Bluetooth, виконано розрахунки в квазіоптичному діапазоні, отримано характеристики антен та проаналізовано результати.

Результати дослідження підтверджують актуальність розвитку цього напрямку та підкреслюють перспективність подальших досліджень у цій галузі.

ABSTRACT

The explanatory note to the bachelor's thesis contains 34 pages, 12 figures, 1 tables, 14 sources, 3 appendices.

HFSS SOFTWARE PACKAGE, GPS AND BLUETOOTH ANTENNAS,
MODELING AND CALCULATION OF ANTENNAS IN THE QUASI-OPTICAL
RANGE.

Object of research – GPS and Bluetooth antennas

The point of the work is to model GPS and Bluetooth antennas in the quasi-optical range using the HFSS software package.

The research method involves conducting a deductive-analytical analysis of existing GPS and Bluetooth antennas and their operating algorithms; performing antenna characteristic calculations and subsequent analysis of the obtained results.

The work involves modeling GPS and Bluetooth antennas, performing calculations in the quasi-optical range, obtaining antenna characteristics, and analyzing the results.

The results of the research confirm the relevance of the development of this direction and highlight the prospects for further research in this field.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ GPS І BLUETOOTH	9
1.1 Опис принципу роботи GPS	9
1.2 Застосування GPS в різних галузях	10
1.3 Опис принципу роботи Bluetooth	11
1.4 Етапи функціонування Bluetooth	12
2 ОПИС ПРОГРАМИ HFSS	14
2.1 Основні характеристики програми HFSS	14
2.2 Можливості та інструменти HFSS для проектування антен	15
2.3 Переваги використання HFSS при розрахунку антен GPS та Bluetooth	16
2.4 Особливості використання пакета HFSS	17
3 РОЗРАХУНОК АНТЕНИ GPS	21
3.1 Проектування антен у HFSS	21
3.2 Результати моделювання.....	22
3.3 Аналіз результатів	24
4 РОЗРАХУНОК АНТЕННИХ СИСТЕМ BLUETOOTH	25
4.1 Проектування антени Bluetooth у HFSS.....	26
4.2 Аналіз результатів моделювання	27
ВИСНОВКИ	32
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	33
ДОДАТОК А	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК Б.....	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК В	Ошибка! Закладка не определена.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І
ТЕРМІНІВ

CAD – Computer-Aided Design (Система автоматизованого проектування).

dB – Decibel (Децибел, одиниця вимірювання).

FDTD – Finite Difference Time Domain (Метод скінченних різниць у часовій області).

FEM – Finite Element Method (Метод скінченних елементів).

GHz – Gigahertz (Гігагерц, одиниця частоти).

GPS – Global Positioning System (Глобальна система позиціонування).

HFSS – High-Frequency Structural Simulator (Пакет програмного забезпечення для моделювання високочастотних структур).

IoT – Internet of Things (Інтернет речей).

PML – Perfectly Matched Layer (Ідеально узгоджений шар).

S₁₁ – Reflection Coefficient (Коефіцієнт відбиття).

S-параметри – Scattering Parameters (Параметри розсіювання).

3D – Three-Dimensional (Тривимірний).

VSWR – Voltage Standing Wave Ratio (Коефіцієнт стоячої хвилі по напрузі).

ВСТУП

З розвитком технологій бездротового зв'язку та навігації антени GPS і Bluetooth стали невід'ємною частиною сучасних систем зв'язку та позиціонування. Ці технології широко застосовуються в автомобільній навігації, мобільних пристроях, інтернеті речей та інших сферах. Дослідження випромінювання антен GPS і Bluetooth у квазіоптичному діапазоні є важливим напрямом для підвищення точності позиціонування, надійності зв'язку та розширення функціональних можливостей цих технологій.

Метою даної дипломної роботи є дослідження випромінювання антен GPS і Bluetooth у квазіоптичному діапазоні за допомогою програми HFSS (High-Frequency Structural Simulator). HFSS є потужним інструментом для моделювання, що дозволяє аналізувати антенні структури та їх випромінювальні характеристики у широкому діапазоні частот.

У роботі будуть розглянуті основні принципи функціонування GPS і Bluetooth, їх роль у сучасних технологіях та пристроях. Особлива увага приділятиметься можливостям HFSS у дослідженні характеристик випромінювання антен. Буде запропонована методика моделювання антен GPS і Bluetooth, включаючи створення геометрії, вибір матеріалів, а також розрахунки випромінювальних параметрів у квазіоптичному діапазоні.

Результати роботи включатимуть аналіз отриманих характеристик випромінювання антен та їх відповідність сучасним вимогам. Зроблені висновки та рекомендації сприятимуть удосконаленню методик дослідження та розробки антен GPS і Bluetooth, забезпечуючи їх ефективність у різних сферах застосування.

1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ GPS I BLUETOOTH

1.1 Опис принципу роботи GPS

GPS (Global Positioning System) є глобальною супутниковою навігаційною системою, яка використовується для визначення точних координат і часу в будь-якому місці на поверхні Землі. Її функціонування базується на взаємодії між супутниками, розташованими в космосі, і наземними приймачами, які обробляють передані сигнали.

До основних складових системи належать супутники, приймачі та антени:

- Супутники. Розташовані на орбіті Землі, супутники GPS постійно передають інформацію про своє місцезнаходження та поточний час. Ці дані передаються у вигляді радіосигналів, які розповсюджуються на певних частотах.

- Приймачі. Приймачі GPS встановлюються на різних пристроях, таких як навігаційні системи автомобілів, смартфони, корабельні системи або навіть авіаційне обладнання. Вони приймають сигнали від кількох супутників одночасно та виконують складні обчислення для визначення власних координат.

- Антени. Антени є ключовими елементами приймачів. Вони забезпечують прийом сигналів із супутників у вузькому діапазоні частот, необхідному для точного позиціонування.

Основний принцип функціонування системи GPS полягає у визначенні відстані до кількох супутників на основі аналізу часу поширення сигналу від супутника до приймача. Кожен супутник передає сигнал, який містить дані про його розташування та момент часу відправлення. Приймач використовує цю інформацію для розрахунку відстаней, а на основі кількох таких вимірів визначає власні координати.

Для отримання точного тривимірного позиціонування (широта, довгота, висота) необхідно щонайменше чотири супутники. Чим більше супутників доступно для приймача, тим точнішими є результати визначення

місцезнаходження.

1.2 Застосування GPS в різних галузях

GPS – технології знайшли широке застосування в багатьох сферах, завдяки своїй здатності забезпечувати точне позиціонування та надійність у різних умовах. Дослідження випромінювання антен GPS сприяє вдосконаленню цих технологій для підвищення точності та ефективності їх використання у різних галузях.

- Автомобільна навігація. GPS-системи активно використовуються для визначення точного розташування транспортних засобів і побудови оптимальних маршрутів. Вони допомагають уникати заторів, визначати найближчі об'єкти та забезпечувати безпеку руху. Дослідження антен для GPS дозволяє підвищити якість прийому сигналу навіть у складних умовах міської забудови.

- Морська навігація. У судноплаванні GPS забезпечує точне позиціонування суден у відкритому морі, сприяє прокладенню маршрутів та забезпеченню безпеки морського руху. Антени GPS, адаптовані для морських умов, забезпечують стійкість до перешкод і високу чутливість до сигналів супутників.

- Геодезія та геолокація. У геодезичних дослідженнях GPS використовується для визначення координат із високою точністю, створення карт, а також для аналізу земельних поверхонь. Антени з оптимізованим випромінюванням у квазіоптичному діапазоні сприяють більш точному збору даних.

- Спортивні та туристичні застосування. Спортсмени та туристи широко використовують GPS для фіксації маршрутів, аналізу фізичних навантажень, планування подорожей і орієнтування на місцевості. У цих сферах важлива стабільність сигналу, яка забезпечується спеціально розробленими антенами.

- Авіанавігація. GPS є ключовим інструментом для навігації повітряних

суден, точного визначення їхнього положення, маршруту та підходу до аеропортів. У авіаційній галузі дослідження випромінювання антен GPS дозволяє створювати системи з високою стійкістю до перешкод і точністю позиціонування.

Застосування GPS у цих галузях сприяє підвищенню ефективності, точності та безпеки. Дослідження випромінювання антен у квазіоптичному діапазоні, виконані за допомогою HFSS, забезпечать покращення їх характеристик і розширення можливостей у кожній із зазначених сфер.

1.3 Опис принципу роботи Bluetooth

Bluetooth — це сучасна бездротова технологія, яка забезпечує обмін даними між електронними пристроями на невеликих відстанях. Її функціонування базується на використанні радіохвиль у діапазоні частот 2,4 ГГц для встановлення стабільного з'єднання. Завдяки низькому енергоспоживанню Bluetooth підходить для широкого спектра застосувань, від мобільних пристроїв до інтернету речей.

Основні компоненти, що забезпечують роботу Bluetooth:

- Пристрої. До пристроїв, які підтримують Bluetooth, належать смартфони, ноутбуки, планшети, навушники, аудіосистеми, сенсори та інші електронні прилади. Кожен із цих пристроїв оснащений інтегрованим модулем Bluetooth, який дозволяє здійснювати бездротовий обмін інформацією.

- Bluetooth-модулі. Модулі Bluetooth — це апаратна основа для бездротового зв'язку. Вони забезпечують передачу даних через радіоканали, використовуючи певні методи модуляції сигналу. Робота модулів оптимізована для стабільної передачі даних навіть у середовищах із великою кількістю перешкод.

- Протоколи та профілі. Bluetooth-технологія базується на наборі стандартів, які визначають способи з'єднання та передачі даних. Протоколи регулюють процедури обміну інформацією, тоді як профілі визначають набір

функцій для конкретних типів пристроїв, наприклад, передача аудіо, обмін файлами чи підключення периферійного обладнання.

Розробка антен для Bluetooth, що враховує квазіоптичний діапазон, спрямована на підвищення якості сигналу та енергоефективності. Це особливо актуально для сучасних пристроїв, які потребують стабільного зв'язку навіть у складних умовах експлуатації.

1.4 Етапи функціонування Bluetooth

Технологія Bluetooth працює на основі послідовності етапів, які забезпечують встановлення стабільного зв'язку між пристроями:

- Виявлення пристроїв. Bluetooth-пристрої можуть автоматично або вручну здійснювати пошук інших пристроїв у межах радіусу дії. Під час виявлення визначається наявність активних пристроїв із підтримкою Bluetooth.

- Сполучення. Для забезпечення безпечного обміну даними між пристроями виконується процедура сполучення. Цей процес включає обмін ключами безпеки, перевірку автентичності та налаштування параметрів з'єднання.

- Встановлення з'єднання. Після завершення сполучення пристрої формують логічний канал зв'язку. Це дозволяє передавати дані через надійний віртуальний канал, забезпечуючи стабільність з'єднання.

- Передача даних. Пристрої можуть обмінюватися даними різного типу, зокрема текстовою інформацією, аудіо, відео або іншими форматами. Процес передачі оптимізовано для роботи у середовищах із перешкодами, що дозволяє підтримувати якісний зв'язок навіть у складних умовах.

При проектуванні та аналізі антен Bluetooth, які працюють у квазіоптичному діапазоні, особливо важливо забезпечити високу точність розрахунків і врахувати складну фізику випромінювання. Через складність електродинамічних задач, пов'язаних із характеристиками антен, отримання точного розв'язку за допомогою аналітичних методів часто є неможливим.

Для вирішення таких задач використовуються чисельні методи аналізу, реалізовані на сучасних високопродуктивних комп'ютерах. Одним із найбільш ефективних інструментів для дослідження та моделювання антен є програмний пакет Ansys HFSS. Ця програма дозволяє отримувати високоточні результати моделювання, що є критично важливим для підвищення якості та ефективності антен Bluetooth у різних сферах застосування.

2 ОПИС ПРОГРАМИ HFSS

HFSS (High-Frequency Structure Simulator) — це сучасний програмний комплекс для моделювання та аналізу електромагнітних полів, розроблений спеціально для роботи з пристроями на високих частотах. Його широко використовують у проектуванні антен, хвилеводів, мікросмужкових структур та інших високочастотних компонентів. HFSS є провідним інструментом завдяки своїй точності, гнучкості та широким можливостям для роботи з комплексними структурами.

2.1 Основні характеристики програми HFSS

HFSS має унікальні функції, які дозволяють досліджувати і розраховувати електромагнітні характеристики антен GPS і Bluetooth із високою точністю:

- моделювання електромагнітних полів. HFSS дозволяє виконувати тривимірне моделювання електромагнітних полів, що є критично важливим для аналізу випромінювання антен. Програма підтримує моделювання антен різних типів, включаючи ті, що працюють у квазіоптичному діапазоні;

- складні матеріали та структури. HFSS забезпечує моделювання багат шарових матеріалів і складних геометрій з урахуванням їхніх реальних електромагнітних параметрів. Це дає змогу проводити точний аналіз характеристик антен і враховувати їхню взаємодію з навколишнім середовищем;

- автоматизація та оптимізація. Інструменти автоматизації дозволяють оптимізувати параметри антен, такі як форма, розмір і матеріали. Оптимізація значно спрощує процес проектування та забезпечує найкращі характеристики антен для роботи в конкретному діапазоні частот;

- різноманітні розрахункові методи. HFSS реалізує числові методи для вирішення рівнянь Максвелла, зокрема метод скінченних елементів (FEM) і

метод скінченних різниць у часовій області (FDTD). Використання цих методів гарантує високу точність моделювання навіть для складних антенних систем;

- візуалізація та аналіз результатів. Програма пропонує широкий спектр інструментів для візуалізації результатів моделювання. Вона дозволяє створювати тривимірні графіки, оцінювати випромінювальні характеристики антен і аналізувати вплив різних факторів на їхню роботу;

Завдяки своїм можливостям HFSS є потужним інструментом для дослідження випромінювання антен GPS та Bluetooth у квазіоптичному діапазоні. Його використання дозволяє досягати високої точності у моделюванні та підвищувати ефективність розробки антен.

2.2 Можливості та інструменти HFSS для проектування антен

HFSS пропонує широкий спектр інструментів для моделювання та аналізу антен, що робить його ідеальним вибором для дослідження їх випромінювальних характеристик у квазіоптичному діапазоні. Основні можливості програми включають:

- моделювання антен. HFSS забезпечує створення тривимірних моделей антен із врахуванням їх геометричних параметрів, матеріалів та експлуатаційних умов. Це дозволяє моделювати різноманітні типи антен, такі як диполі, логоперіодичні антени, спіральні структури тощо;

- аналіз радіочастотних характеристик. Програма дозволяє виконувати детальний аналіз основних параметрів антен, таких як коефіцієнт підсилення, смуга пропускання, направленість випромінювання та імпеданс. Ці можливості дозволяють оптимізувати конструкції для досягнення бажаних характеристик;

- оптимізація антенних систем. HFSS включає алгоритми автоматичної оптимізації, що дають змогу вдосконалити геометрію та параметри антен. Оптимізація спрямована на підвищення продуктивності системи та забезпечення відповідності заданим технічним вимогам;

- аналіз взаємодії з навколишнім середовищем. HFSS дозволяє враховувати вплив навколишнього середовища на роботу антен. Це включає розрахунок ефектів відбиття, заломлення та розсіяння сигналів. Такий підхід дає змогу адаптувати антени для використання у реальних умовах;

- аналіз чутливості. Інструменти для аналізу чутливості дозволяють оцінювати вплив змін параметрів конструкції на характеристики антен. Завдяки цьому можна визначити ключові параметри, що впливають на ефективність антен, і внести необхідні корективи;

- візуалізація та аналіз результатів. HFSS забезпечує засоби для візуалізації даних у вигляді графіків, діаграм і навіть анімацій. Це дозволяє проводити глибокий аналіз отриманих результатів і приймати обґрунтовані рішення під час проектування антен.

Ці функції роблять HFSS ефективним інструментом для дослідження антен GPS та Bluetooth у квазіоптичному діапазоні, забезпечуючи високоточні результати та скорочуючи час розробки.

2.3 Переваги використання HFSS при розрахунку антен GPS та Bluetooth

HFSS пропонує низку унікальних можливостей, які роблять його незамінним інструментом для моделювання, аналізу та оптимізації антенних систем у високочастотному діапазоні, включаючи антени GPS і Bluetooth. Основні переваги цього програмного комплексу такі:

а) висока точність розрахунків. Застосування передових числових методів, таких як метод скінченних елементів (FEM) і метод скінченних різниць у часовій області (FDTD), дозволяє з високою точністю визначати характеристики антен, зокрема коефіцієнт підсилення, спрямованість і смугу пропускання;

б) гнучкість та масштабованість. HFSS надає можливість моделювати як прості, так і складні антенні системи. Гнучкі налаштування геометрії, матеріалів і параметрів дають змогу адаптувати моделі до специфічних вимог та умов експлуатації;

в) автоматизація та оптимізація. Інструменти автоматичної оптимізації, вбудовані в HFSS, дозволяють швидко знаходити найкращі параметри антен для досягнення заданих характеристик. Це значно скорочує час проектування і зменшує обсяг ручної роботи;

г) аналіз взаємодії з навколишнім середовищем. HFSS враховує фізичну взаємодію антен із навколишнім середовищем, включаючи відбиття, заломлення та розсіяння сигналів. Це забезпечує реалістичність результатів моделювання і дозволяє оцінити роботу антен у реальних умовах;

д) Візуалізація результатів. Програма має розширений набір інструментів для візуалізації, що дозволяє створювати графіки, гістограми та анімації. Це полегшує аналіз параметрів антен і порівняння різних варіантів конструкції;

е) Інтеграція з іншими програмами. HFSS підтримує інтеграцію з CAD-системами та програмами для аналізу сигналів, що забезпечує ефективний обмін даними і зручність роботи в комплексних проектах.

Використання HFSS у дослідженні антен GPS та Bluetooth дозволяє забезпечити високу точність і надійність розрахунків, ефективно оптимізувати конструкції антен та скоротити час розробки. Це робить HFSS одним із найкращих інструментів для дослідження та вдосконалення антенних систем у квазіоптичному діапазоні.

2.4 Особливості використання пакета HFSS

Перед початком розв'язання електродинамічної задачі необхідно створити модель структури, призначити матеріали для кожного елемента, встановити порти та задати граничні умови на поверхнях. Після цього HFSS виконує розрахунок електромагнітного поля у кожній точці моделі та визначає S-параметри та інші характеристики на основі отриманих даних. Постановка задачі також включає вибір частотного діапазону для аналізу та налаштування умов збіжності розв'язку. HFSS дозволяє виконувати розрахунки як для однієї фіксованої частоти, так і для частотного діапазону.

На рисунку 2.1 наведено алгоритм роботи програмного пакета Ansys HFSS.

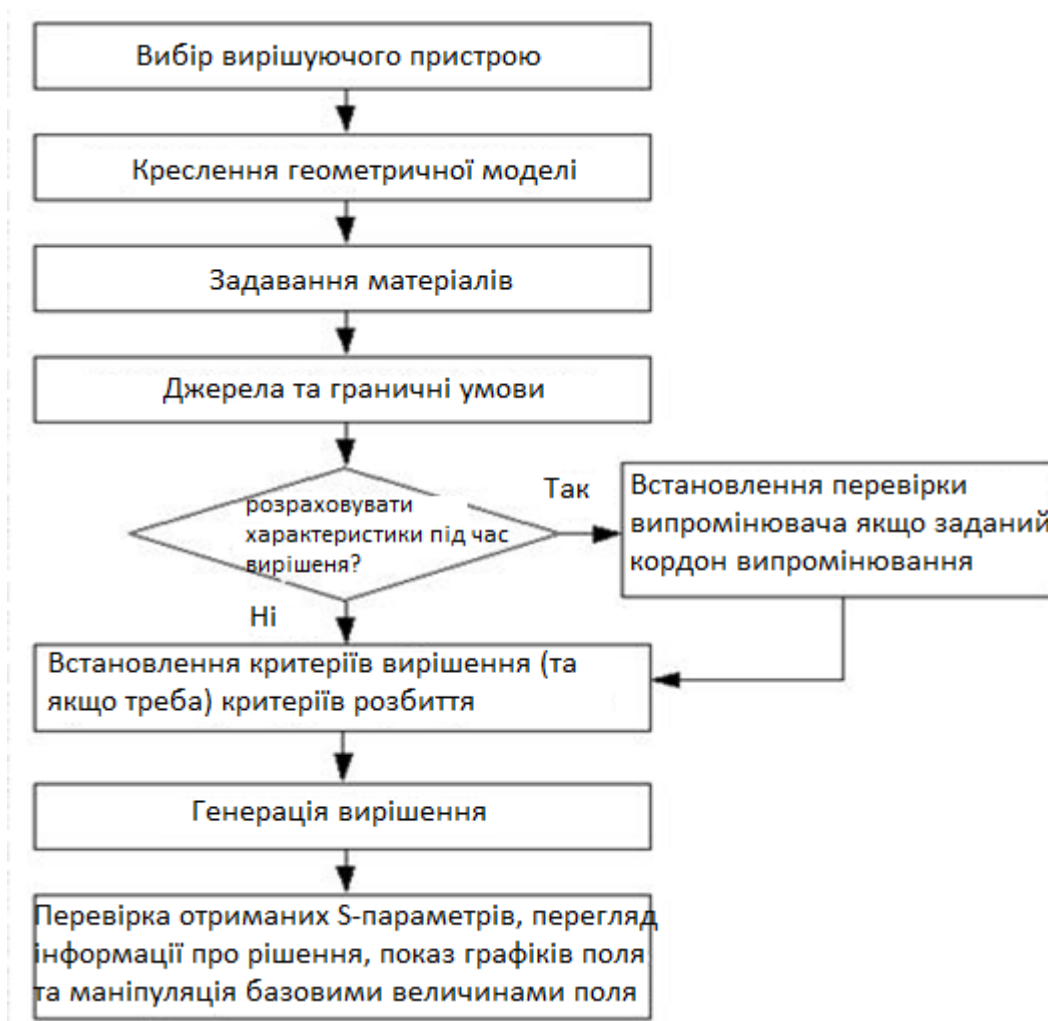


Рисунок 2.1 – Алгоритм роботи пакету програм Ansys HFSS

Якщо модель має симетричну геометрію, її можна розділити площинами симетрії. У місцях розрізу встановлюються граничні умови, і задача розв'язується лише для частини структури. Коректне використання симетрії дозволяє значно зменшити обчислювальні витрати та підвищити точність.

Ця функція є особливо корисною при розрахунку параметрів багатолучевих антенних систем із однаковими, не взаємодіючими випромінювачами. У таких випадках достатньо розрахувати поле лише для одного випромінювача, щоб отримати характеристики всієї системи.

Після створення моделі, призначення матеріалів та встановлення граничних умов, електромагнітне поле визначається у процесі розв'язку на основі рівнянь Максвелла. Для відкритих задач, де хвилі випромінюються у

нескінченність, використовується гранична умова Radiation. Ця границя поглинає хвилі на певній сферичній поверхні, що знаходиться достатньо далеко від джерела випромінювання.

У HFSS також доступна альтернатива — ідеально узгоджені шари (PML). Ці шари поглинають падаючі хвилі без відбиття, дозволяючи розташовувати поверхні випромінювання ближче до джерела сигналу. Застосування PML забезпечує точніше моделювання випромінювання та скорочує обчислювальну область.

Розбиття моделі на елементарні комірки (тетраедри) є важливим етапом у HFSS. Процес адаптивного розбиття виконується програмою Mesher. Спочатку створюється початкова сітка, на основі якої визначаються області з великими варіаціями поля. У цих критичних зонах автоматично зменшується розмір комірок, що дозволяє досягти збіжності розв'язку.

Розмір комірок впливає як на точність, так і на обчислювальні ресурси. Комірки з розміром понад $\lambda/10$ можуть спотворювати результати, тому бажано дотримуватися критерію малої варіації поля у межах кожної комірки.

На рисунках 2.2 – 2.4 наведено приклади розбиття структур і розподілу поля в залежності від щільності сітки.

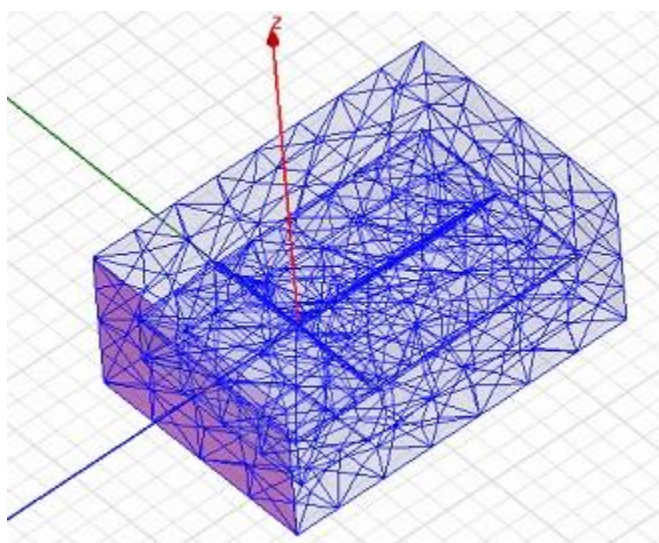


Рисунок 2.2 – Приклад розбиття простору в HFSS.

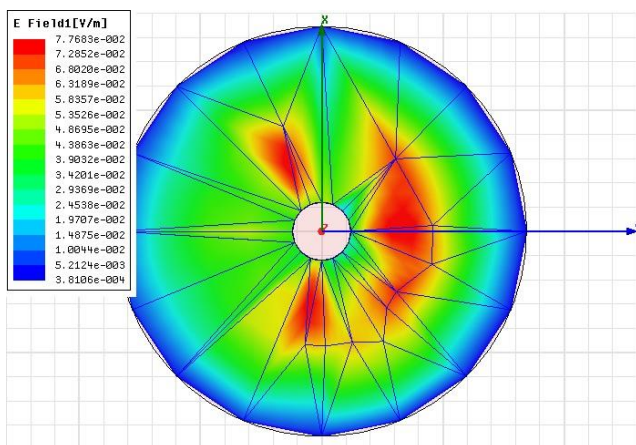


Рисунок 2.3 – Розподіл поля в резонаторі при недостатній щільності розбиття

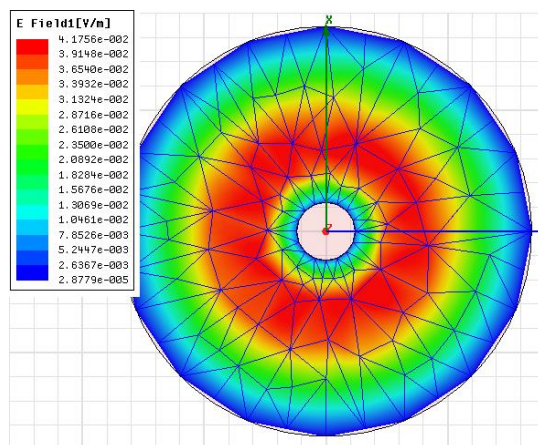


Рисунок 2.4 – Розподіл поля в резонаторі при збільшенні щільності розбиття

Висока щільність сітки дозволяє зменшити похибки, забезпечуючи точні результати, але потребує більших обчислювальних ресурсів. Таким чином, необхідно знаходити баланс між точністю і продуктивністю, адаптуючи розмір комірок під конкретну задачу.

3 РОЗРАХУНОК АНТЕНИ GPS

Основний принцип роботи GPS-системи залишається незмінним незалежно від частотного діапазону: визначення місцезнаходження об'єкта базується на аналізі часових затримок поширення радіосигналів від супутників до антени приймача. Однак у квазіоптичному діапазоні частот (30–100 ГГц) дослідження антен стає критично важливим для забезпечення стабільності та точності сигналів, оскільки фізичні властивості матеріалів і розмір антен суттєво впливають на їхню ефективність.

Антен, розроблені для GPS у цьому частотному діапазоні, повинні відповідати специфічним вимогам:

- забезпечувати мінімальні втрати при відбитті сигналів;
- мати однорідне випромінювання у верхньому півпросторі;
- підтримувати кругову поляризацію для стабільного прийому незалежно від орієнтації супутника.

3.1 Проектування антен у HFSS

Для моделювання антен GPS у квазіоптичному діапазоні було використано програмний пакет HFSS. Структура антени складалася з планарної мікросмужкової конструкції, яка забезпечує компактність і ефективність роботи на високих частотах.

Основні параметри моделі:

- а) Частотний діапазон. Смуга частот від 30 до 100 ГГц.
- б) Матеріал підкладки. PTFE (діелектрична проникність $\sim 2,1$, тангенс кута діелектричних втрат $\sim 0,0002$).
- в) Граничні умови. Ідеально узгоджені шари (PML) для симуляції відкритого простору.

На рисунку 3.1 показано геометрію антени, змодельованої в HFSS.

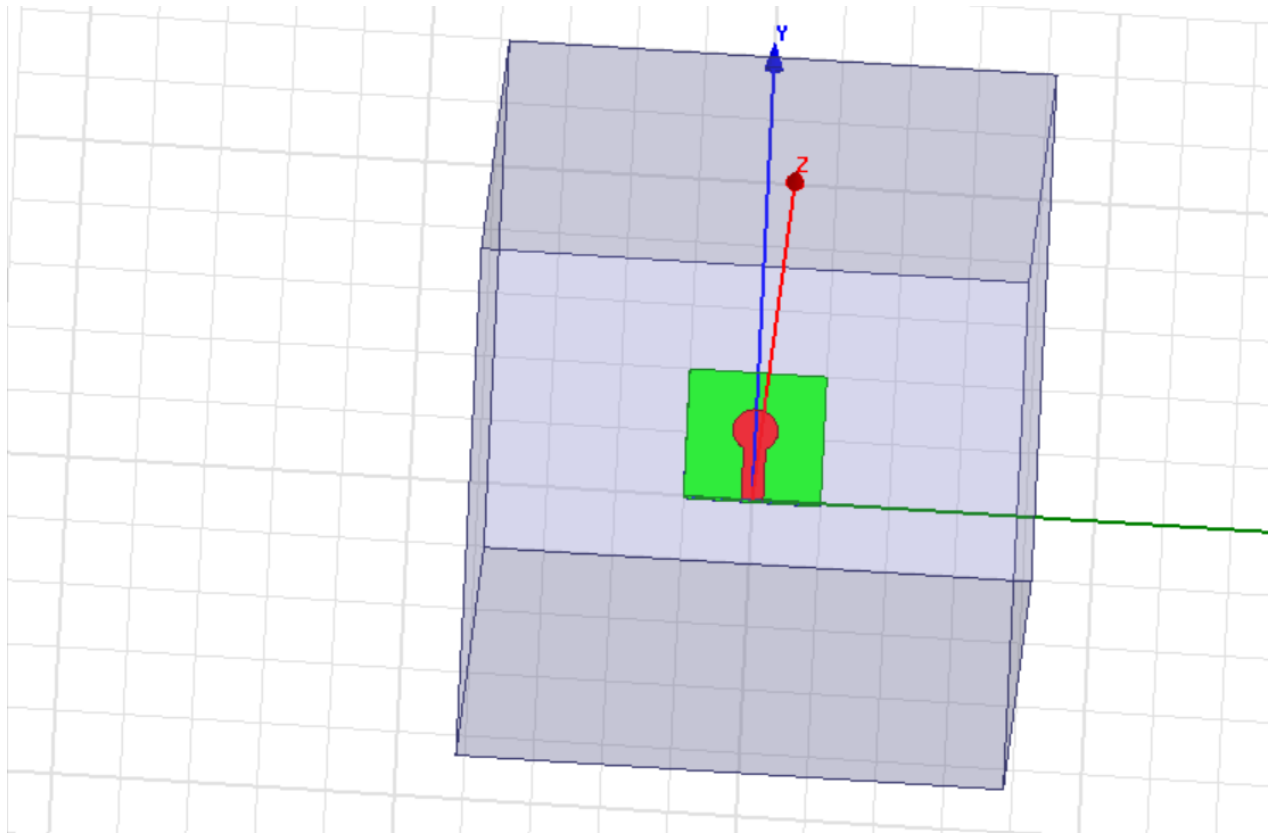


Рисунок 3.1 — Геометрія антени GPS у HFSS

Для забезпечення кругової поляризації використовується квадратна мікросмужкова структура з двома точками живлення. Це дозволяє зсунути фазу одного з сигналів на 90° , забезпечуючи кругову поляризацію випромінюваних хвиль.

3.2 Результати моделювання

Результати моделювання являють собою низку параметрів: коефіцієнт відбиття (S_{11}), діаграма спрямованості, коефіцієнт підсилення

а) Коефіцієнт відбиття (S_{11}).

Коефіцієнт відбиття визначає рівень узгодження антени з живильною лінією. Графік частотної залежності S_{11} наведено на рисунку 3.2.

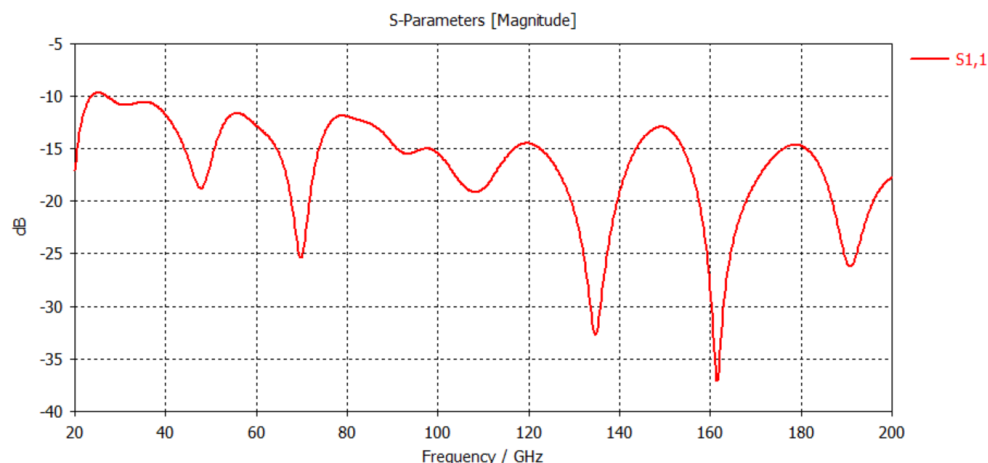


Рисунок 3.2 — Графік коефіцієнта відбиття S_{11}

Як видно, у робочому діапазоні від 30 до 100 ГГц значення S_{11} залишається нижче -10 дБ, що вказує на ефективне узгодження антени.

б) Діаграма спрямованості

На рисунку 3.3 зображено тривимірну діаграму спрямованості антени на частоті 80 ГГц. Інтенсивність випромінювання у верхнє півпростір значно перевищує випромінювання в нижнє, що відповідає вимогам для GPS-систем.

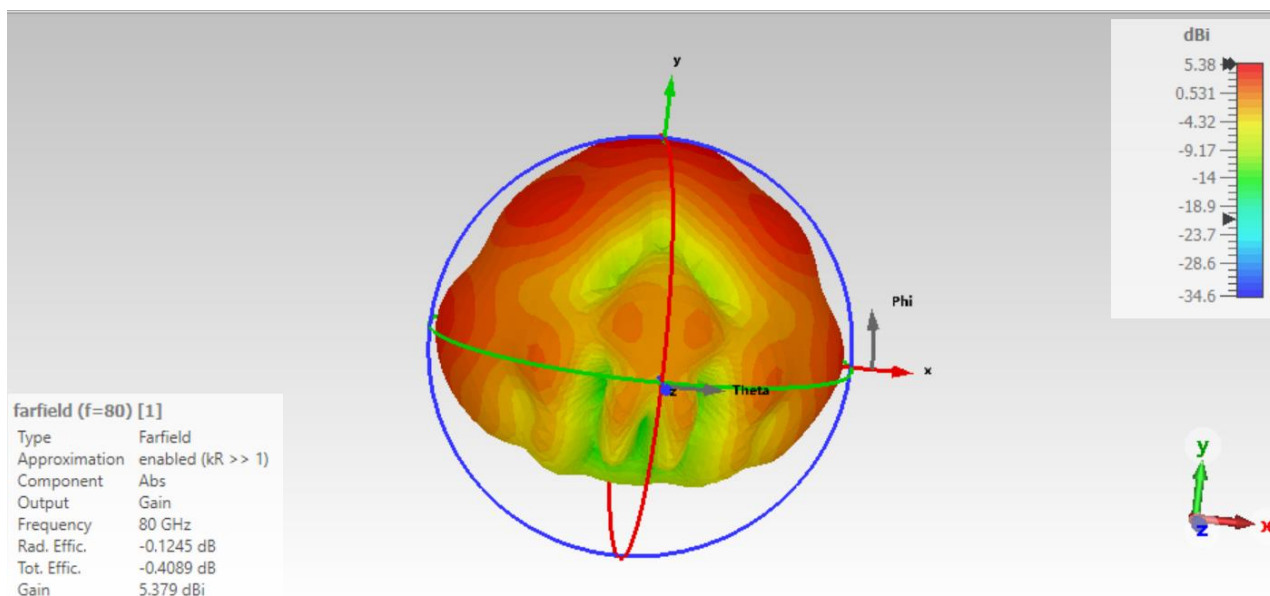


Рисунок 3.3 — Тривимірна діаграма спрямованості антени GPS

в) Коефіцієнт підсилення

Параметри підсилення антени наведено на рисунку 3.4.

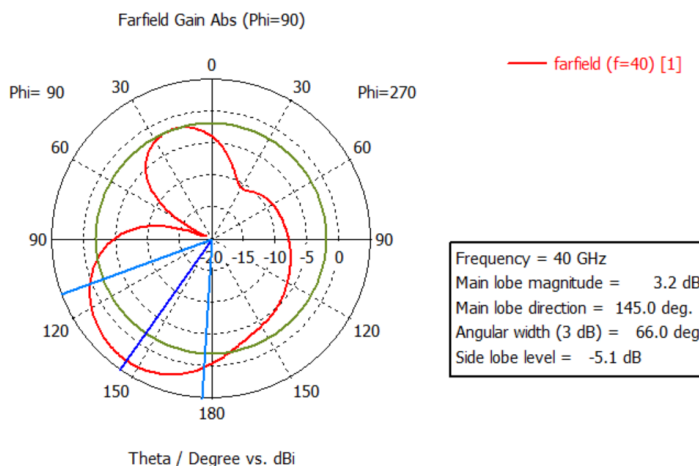


Рисунок 3.4 — Графік коефіцієнта підсилення антени GPS

Як випливає з налізу діаграм, наведених на рисунку 3.4, максимальне підсилення досягається у напрямку основного випромінювання, забезпечуючи стабільний прийом сигналів від супутників.

3.3 Аналіз результатів

Результати моделювання підтверджують, що обрана конструкція антени ефективно працює у квазіоптичному діапазоні частот:

- коефіцієнт відбиття (S11) вказує на добру відповідність між антеною та живильною лінією;
- діаграма спрямованості демонструє необхідну концентрацію випромінювання у верхнє півпростір;
- параметри підсилення відповідають вимогам для стабільного прийому сигналів.

Завдяки використанню матеріалу PTFE, забезпечено низькі втрати в підкладці, що сприяє підвищенню ефективності антени.

4 РОЗРАХУНОК АНТЕННИХ СИСТЕМ BLUETOOTH

Bluetooth є однією з найбільш популярних технологій бездротового зв'язку, яка забезпечує передачу даних між різними пристроями. Завдяки своїй універсальності та простоті використання, Bluetooth знайшов широке застосування у мобільних телефонах, аудіосистемах, периферійних пристроях комп'ютерів, смарт-годинниках та багатьох інших гаджетах. Удосконалення цієї технології, зокрема у напрямку роботи в квазіоптичному діапазоні частот (30–40 ГГц), відкриває нові можливості для створення більш продуктивних і компактних пристроїв.

Основною складовою успішної роботи Bluetooth-систем є антени, які відіграють ключову роль у забезпеченні стабільності сигналу, всеспрямованості випромінювання та мінімізації втрат енергії. Антени Bluetooth повинні мати низький коефіцієнт відбиття (S_{11}), високу всеспрямованість і прийнятний рівень підсилення, що дозволяє забезпечити ефективний обмін даними навіть у складних умовах експлуатації.

У роботі Bluetooth-антен у квазіоптичному діапазоні існує низка технічних викликів:

- зменшення розмірів антени для інтеграції в компактні пристрої без втрати ефективності;
- забезпечення стабільної роботи при впливі зовнішнього середовища та взаємодії з корпусом пристрою;
- оптимізація конструкції для досягнення мінімального коефіцієнта відбиття і максимального узгодження з живильною лінією.

Сучасні антени Bluetooth зазвичай базуються на мікрополоскових технологіях, які дозволяють створювати компактні, легкі та ефективні конструкції. Мікрополоскові антени виконуються на основі тонких керамічних підкладок, які забезпечують хорошу діелектричну стабільність і низькі втрати енергії. Їх геометрія часто включає прорізи або складні металеві форми для

формування оптимальних характеристик випромінювання.

Ключовою особливістю Bluetooth-антен у квазіоптичному діапазоні є їхня здатність працювати з мінімальними втратами потужності, незважаючи на високу частоту сигналу. Це досягається завдяки ретельному вибору матеріалів, таких як кераміка з високою діелектричною проникністю, та оптимізації вхідного імпедансу до стандартного значення 50 Ом.

Важливим аспектом проектування антен є врахування взаємодії з іншими компонентами пристрою, зокрема корпусом. Електромагнітне поле, створене антеною, може викликати наведені струми в корпусі, що впливає на діаграму спрямованості і рівень випромінювання. Тому моделювання антен із урахуванням умов реального використання є обов'язковим етапом розробки.

Дослідження, представлене у цьому розділі, спрямоване на моделювання та аналіз Bluetooth-антени в квазіоптичному діапазоні за допомогою програмного пакета HFSS. Основна увага приділялася мінімізації коефіцієнта відбиття, забезпеченню всеспрямованості випромінювання та оптимізації коефіцієнта підсилення в діапазоні частот від 30 до 40 ГГц.

4.1 Проектування антени Bluetooth у HFSS

Проектування антени виконано в програмному пакеті HFSS. Основою конструкції є мікрополоскова антена, розроблена для роботи в умовах, характерних для бездротових систем передачі даних Bluetooth.

Основні параметри антени:

- Робочий діапазон частот від 30 до 40 ГГц.;
- Підкладка. Керамічний матеріал із діелектричною проникністю $\sim 2,2$;
- Граничні умови. використано ідеально узгоджені шари (PML), що забезпечують точне моделювання відкритих структур;
- Імпеданс узгодження із стандартним значенням 50 Ом для мінімізації втрат потужності;

- Розміри антени. Розміри оптимізовані для збереження компактності без втрати ефективності.

На рисунку 4.1 представлено геометрію антени, створену у HFSS. Вона базується на принципах мікросмушкових конструкцій із прорізами, які сприяють формуванню необхідної діаграми спрямованості.

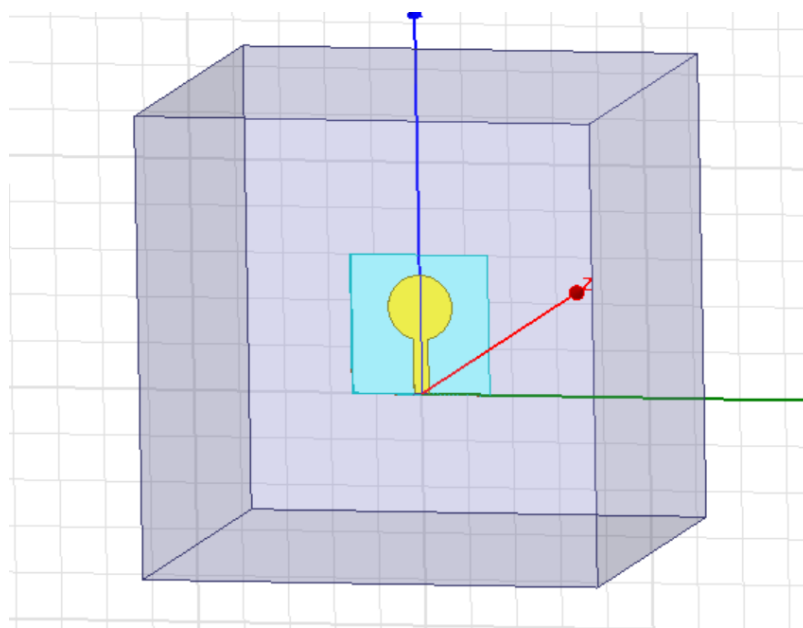


Рисунок 4.1 — Геометрія мікрополоскової антени Bluetooth

Для досягнення оптимальних характеристик було проведено численні ітерації моделювання. Основна увага приділялася мінімізації коефіцієнта відбиття, забезпеченню всеспрямованості випромінювання та стабільності параметрів підсилення в заданому діапазоні частот.

4.2 Аналіз результатів моделювання

а) Коефіцієнт відбиття (S_{11})

Коефіцієнт відбиття S_{11} є критичним показником, що характеризує рівень узгодження антени з живильною лінією. На рисунку 4.2 наведено графік частотної залежності S_{11} .

З аналізу графіка випливає, що значення S_{11} у діапазоні від 30 до 40 ГГц

залишаються нижче - 10 дБ, що відповідає гарному рівню узгодження. Це дозволяє мінімізувати втрати потужності на відбиття та забезпечити ефективну передачу сигналу.

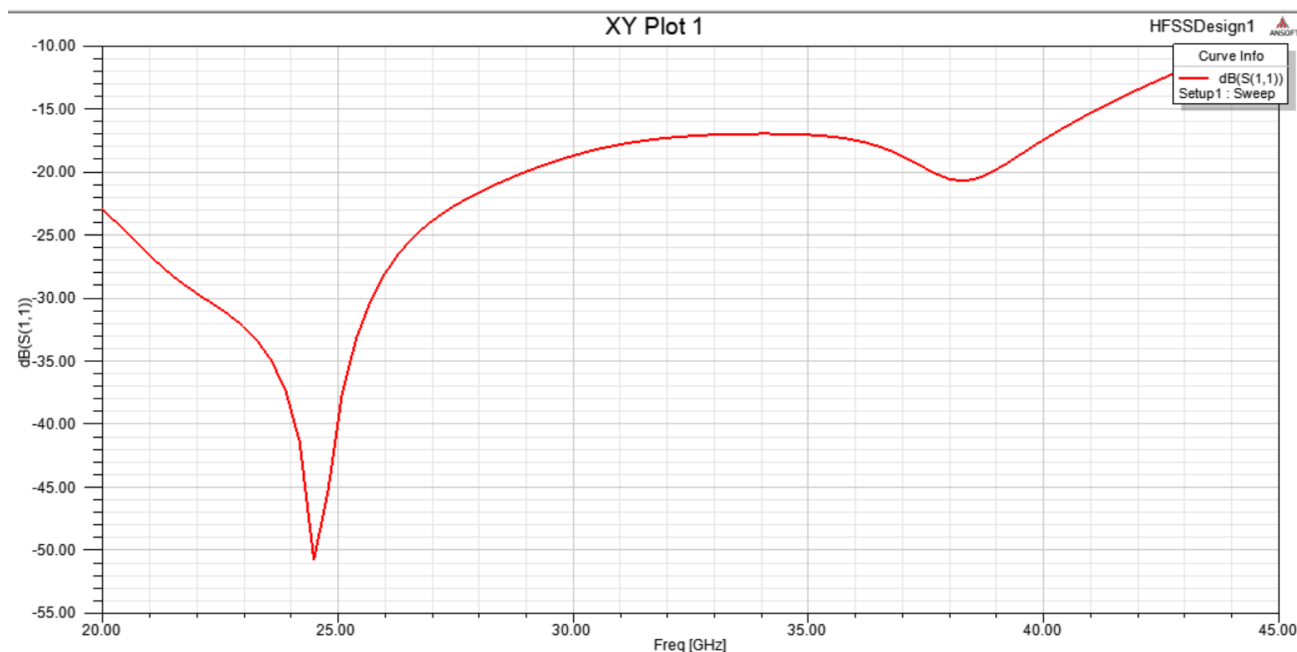


Рисунок 4.2 — Коефіцієнт відбиття S11 для Bluetooth-антени

б) Всеспрямована діаграма спрямованості.

На рисунку 4.3 представлено всеспрямовану діаграму спрямованості антени. Вона демонструє рівномірний розподіл випромінювання у всіх напрямках в горизонтальній площині, що є важливим для роботи Bluetooth-пристроїв, які змінюють своє орієнтування в процесі експлуатації.

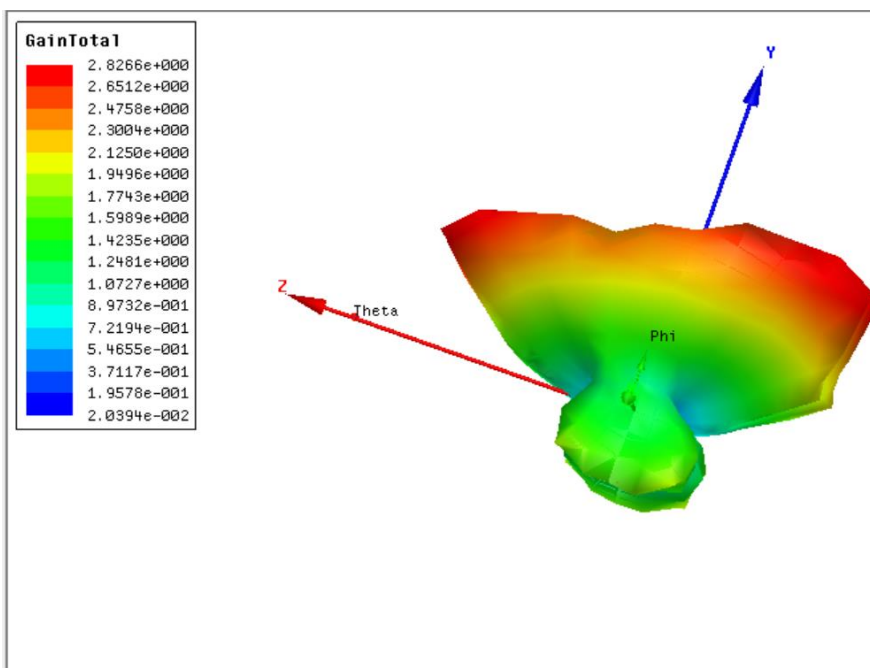


Рисунок 4.3 — Всеспрямована діаграма спрямованості Bluetooth-антени

в) Коефіцієнт підсилення

На рисунку 4.4 представлено графік коефіцієнта підсилення антени. Максимальне значення підсилення досягається в центральній частоті діапазону (35 ГГц) і становить 3,5 дБ.

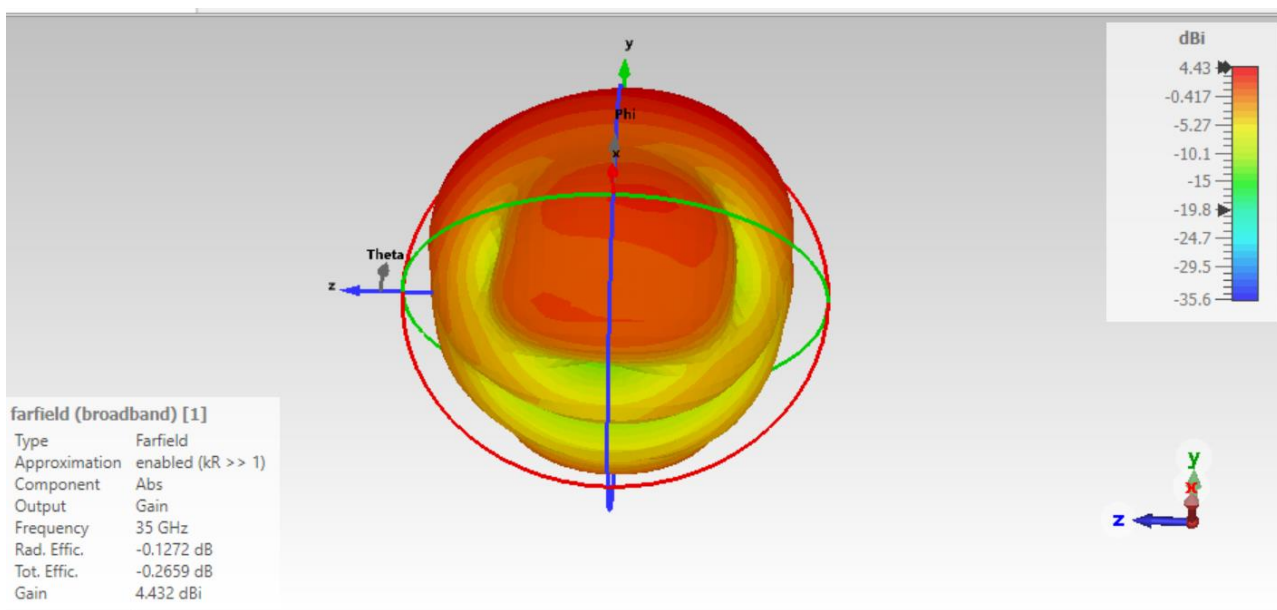


Рисунок 4.4 — Коефіцієнт підсилення Bluetooth-антени

У таблиці 4.1 наведено результати моделювання Bluetooth-антени для різних частот у діапазоні від 30 до 40 ГГц.

Таблиця 4.1 – Результати моделювання Bluetooth-антени

Частота, ГГц	Коефіцієнт відбиття (S11), дБ	Підсилення, дБ	Спрямованість, дБ	VSWR
30	- 12,0	3,0	2,7	1,30
32	- 15,5	3,4	3,0	1,12
35	- 10,8	3,5	2,9	1,25
38	- 13,2	3,2	2,8	1,18
40	- 11,0	3,0	2,7	1,30

Bluetooth-антени, що працюють у квазіоптичному діапазоні (30 – 40 ГГц), демонструють високі характеристики за умови правильного проектування. Проведені моделювання в HFSS дозволили досягти низьких значень коефіцієнта відбиття (S11), які залишаються нижче -10 дБ у всьому діапазоні, що забезпечує мінімальні втрати потужності та ефективне випромінювання.

Діаграма спрямованості антени показала всеспрямований характер випромінювання, що є ключовою вимогою для пристроїв, які змінюють своє положення під час роботи. Отриманий коефіцієнт підсилення в центральній частоті діапазону досягає 3,5 дБ, що відповідає вимогам сучасних систем бездротового зв'язку.

Моделювання враховувало взаємодію антени з корпусом пристрою. Наведені струми на поверхні корпусу можуть змінювати діаграму спрямованості, що потребує адаптації конструкції під кожну модель пристрою. Використання керамічної підкладки із високою діелектричною проникністю (~ 2,2) дозволило зменшити втрати та підвищити ефективність роботи антени.

Процес оптимізації включав ітераційне налаштування конструкції для забезпечення стабільного узгодження із стандартним імпедансом 50 Ом.

Урахування втрат у підкладці допомогло отримати результати, які відповідають реальним умовам експлуатації.

Отримані дані підтверджують ефективність мікрополоскових технологій для проектування компактних і продуктивних Bluetooth-антен у високочастотному діапазоні.

ВИСНОВКИ

Сьогодні технології бездротового зв'язку, зокрема GPS і Bluetooth, мають надзвичайно широке застосування в різних сферах, таких як мобільні пристрої, автомобільна навігація, IoT – системи тощо. Успішне використання цих технологій вимагає розробки антен із високими експлуатаційними характеристиками, що забезпечують надійний зв'язок і стабільну передачу даних.

Розрахунок і аналіз антен для роботи в квазіоптичному діапазоні частот (30–100 ГГц) є особливо складним завданням через специфіку фізичних процесів, що впливають на їх ефективність. Аналітичне вирішення таких задач обмежене через необхідність численних ідеалізацій, тому найбільш достовірні результати можна отримати за допомогою чисельних методів моделювання.

У рамках роботи було проведено дослідження антен GPS і Bluetooth з використанням програмного пакета HFSS. Цей інструмент дозволяє моделювати геометрію антен, визначати оптимальні матеріали для підкладок, виконувати розрахунки діаграм спрямованості, коефіцієнтів відбиття (S_{11}) і підсилення, а також аналізувати їх поведінку в реальних умовах експлуатації.

Отримані результати підтвердили ефективність використання HFSS для розробки антен у квазіоптичному діапазоні, забезпечуючи високу точність розрахунків і можливість подальшої оптимізації конструкцій. Це дозволяє створювати антени, які відповідають вимогам сучасних бездротових систем зв'язку, з мінімальними втратами потужності та максимальною ефективністю роботи.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Баланис, К. А. Теория антенн: анализ и проектирование : учеб. пособие / К. А. Баланис. – М. : Техносфера, 2006. – 944 с.
2. Позар, Д. М. Микроволновая инженерия / Д. М. Позар. – М. : Радио и связь, 2010. – 624 с.
3. Гончаренко, А. В. Анализ микрополосковых антенн в HFSS / А. В. Гончаренко. – М. : Наука, 2015. – 432 с.
4. Антенны и устройства СВЧ: учеб. пособие / Д. И. Воскресенский [и др.] ; под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радио и связь, 1987. – 856 с.
5. Чернушенко, Л. И. Антенны для систем беспроводной связи / Л.И. Чернушенко, Н.М. Есин. – СПб.: Питер, 2004. – 720 с.
6. Волков, А.Н. Численные методы анализа антенн / А. Н. Волков. – М. : Наука, 1980. – 389 с.
7. Марков, А.М. Инженерные расчеты в пакете HFSS / А. М. Марков. – М.: СОЛОН-Пресс, 2008. – 526 с.
8. Банков, С.Е. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ-структур с помощью HFSS: учеб. пособие / С. Е. Банков [и др.] ; под ред. С. Е. Банкова. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 208 с.
9. Юрцев, О.А. Численное моделирование антенн и устройств СВЧ / О.А. Юрцев, Д.В. Гололобов. – Минск: БГУИР, 2007. – 70 с.
10. Бодров, В.В. Математическое моделирование устройств СВЧ и антенн : учеб. пособие / В.В. Бодров. – М.: Академия, 2008. – 445 с.
11. Банков, С.Е., Кирушин, А.А. Электродинамика для пользователей САПР СВЧ : учебник / С.Е. Банков, А.А. Кирушин. – М.: СОЛОН-Пресс, 2017. – 316 с.
12. Stutzman, W. L. Antenna Theory and Design: учеб. пособие / W.L. Stutzman, G. A. Thiele. – New York: John Wiley & Sons, 2012. – 848 p.

13. Ansys, Inc. Руководство пользователя Ansys HFSS / Ansys, Inc. – [Электронный ресурс]. – Доступно на: <https://www.ansys.com>.

14. Bhartia, P. Broadband Microstrip Antennas: учеб. пособие / P. Bhartia, K. P. Ray. – Boston : Artech House, 2003. – 496 p.