

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Кафедра радіотехніки та радіоелектронних систем

«На правах рукопису»

Робота допущена до захисту в ЕК
рішенням кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем
від _____ 2025 року, протокол № _____.
Завідувач кафедри доктор фіз.-мат. наук, професор
_____ Ігор АНІСІМОВ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

на тему:

«Антенна система для безпілотних авіаційних комплексів»

Виконав:

студент 4-го курсу
денної форми навчання
спеціальності 172 - Електронні комунікації та радіотехніка
ОПП «Інформаційна безпека телекомунікаційних систем і мереж»
Мороз Богдан Андрійович _____

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, с.н.с.
Жиров Геннадій Борисович _____

Рецензент:

начальник науково-дослідного відділу
науково дослідного центру ВІКНУ
кандидат технічних наук, с.н.с.
Охрамович Михайло Миколайович _____

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

студент _____ Мороз Богдан

Київ - 2025

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 36 с., 3 табл., 22 рис., 11 джерел.

АНТЕННА СИСТЕМА, БПЛА, МІКРОСМУЖКОВА АНТЕНА, 2.4 ГГц, 5.8 ГГц,
АНТЕНА VIVALDI, АНТЕНА YAGI-UDA, ВІДЕОСИГНАЛ.

Об'єкт дослідження - антенно-фідерна система для забезпечення двоканального зв'язку між безпілотним літальним апаратом (БПЛА) та наземною станцією управління.

Мета роботи - розробка та оптимізація антенної системи, яка забезпечує стабільний двоканальний радіозв'язок у діапазонах 2.4 ГГц (канал управління) та 5.8 ГГц (канал відеопередачі).

У роботі проаналізовано особливості побудови антенних систем для БПЛА, сформульовано вимоги до вибору типів антен для кожного з каналів зв'язку. Проведено теоретичні розрахунки та моделювання патч-антен, антени Vivaldi та антени Yagi-Uda з використанням середовища CST Studio. Виконано оптимізацію геометричних параметрів антен для забезпечення мінімальних втрат та високої ефективності випромінювання.

Отримані результати підтверджують відповідність розробленої системи вимогам до надійності зв'язку, ефективності випромінювання та конструктивної сумісності з малогабаритними БПЛА.

Розроблена антенно-фідерна система рекомендована до використання у складі БПЛА для забезпечення стійкого радіозв'язку в умовах динамічної експлуатації, у тому числі - в складному радіочастотному середовищі.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1.ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ.....	5
1.1 Поляризація, механізм випромінювання та умови поширення електромагнітних хвиль	5
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ АНТЕН У БЕЗПЛОТНИХ СИСТЕМАХ РАДІОЗВ'ЯЗКУ	7
2.1. Коефіцієнт підсилення та спрямованість.....	7
2.2. Узгодження імпедансу та відбиття енергії.....	8
2.3. Ширина робочої смуги	9
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ВИМОГ І ВИБІР СТРУКТУРИ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ	10
3.1 Критерії вибору антен	11
3.2 Особливості роботи у конкретному середовищі	12
3.3 Механічні обмеження	14
РОЗДІЛ 4.ТЕОРЕТИЧНІ РОЗРАХУНКИ АНТЕН ТА МОДЕЛЮВАННЯ	16
4.1 Розрахунок та моделювання патч-антен 2,4 ГГц, та 5.8 ГГц.	16
4.2 Розрахунок та моделювання антени Vivaldi.....	24
4.3 Розрахунок та моделювання антени Yagi-uda	29
ВИСНОВКИ	34
Перелік джерел посилання	35

ВСТУП

Останніми роками спостерігається стрімке зростання попиту на безпілотні літальні апарати (БПЛА), які знаходять широке застосування у сферах цивільного моніторингу, телекомунікацій, сільського господарства, топографічного картування, а також у військовій справі. Ефективність роботи БПЛА безпосередньо залежить від надійності зв'язку між літальним апаратом та наземною станцією управління. У свою чергу, критично важливу роль у забезпеченні стабільного радіозв'язку відіграє антенно-фідерна система.

Антенна система виступає посередником між електричним сигналом і просторовим електромагнітним полем, яке розповсюджується у середовищі. Її характеристики - спрямованість, коефіцієнт підсилення, робоча частота, - мають безпосередній вплив на якість прийому та передачі даних, а також на стійкість зв'язку в умовах впливу завад, багатопроменевого поширення або динамічних змін положення БПЛА у просторі.

Зважаючи на це, актуальним є створення оптимізованої антенної системи, яка забезпечить двоканальний радіозв'язок між безпілотним апаратом і оператором - зокрема в діапазоні 2.4 ГГц (канал управління) та 5.8 ГГц (відеопотік). При цьому необхідно враховувати суворі обмеження по масі та габаритах антени, її живленні, електромагнітній сумісності та стабільності характеристик у широкому діапазоні температур і положень.

Метою цієї роботи є розрахунок, моделювання та аналіз антенної системи для БПЛА, яка відповідатиме вимогам щодо спрямованості, широкосмуговості, мінімальних зворотних втрат і конструктивної придатності до використання на легких літальних платформах.

У процесі виконання роботи буде досліджено геометричні та електромагнітні характеристики антен, розроблено 3D-моделі в середовищі CST Studio Suite, проведено оптимізацію параметрів.

РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ

Формування та передача радіосигналу в системах безпілотних літальних апаратів ґрунтується на законах класичної електродинаміки. Ключову роль у цьому процесі відіграє взаємодія електричних та магнітних полів, яка описується системою рівнянь Максвелла. У загальному вигляді ці рівняння встановлюють причинно-наслідкові зв'язки між змінними електромагнітними величинами у просторі та часі.

Розповсюдження електромагнітної хвилі можливе завдяки тому, що змінне електричне поле породжує змінне магнітне, яке у свою чергу генерує нове електричне поле - і так далі. Таким чином формується хвильовий фронт, який переміщується у просторі з швидкістю світла $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с

До основних параметрів, які визначають електромагнітну хвилю, належать її частота f , довжина хвилі λ , фаза, амплітуда та поляризація. У контексті антен для БПЛА критичною є частота, оскільки вона прямо впливає на розміри та резонансні властивості елементів випромінювання.

Залежність між довжиною хвилі та частотою визначається виразом:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

Для частоти 2.4 ГГц, що відповідає каналу управління, довжина хвилі становить приблизно 12.5 см. У випадку відеоканалу на 5.8 ГГц - близько 5.17 см. Ці значення використовуються при розрахунку довжини резонансного елемента антени, зокрема у мікросмушкових та спіральних конфігураціях.

1.1 Поляризація, механізм випромінювання та умови поширення електромагнітних хвиль

Поляризація електромагнітної хвилі визначає напрям коливання електричного вектора поля відносно площини розповсюдження. Найчастіше в системах дистанційного управління використовуються лінійна горизонтальна або вертикальна, а також кругова поляризація.

У динамічних платформах, таких як БПЛА, де можлива постійна зміна орієнтації апарата в просторі, рекомендованим є застосування кругової поляризації. Вона дозволяє зберігати стабільність сигналу навіть у випадках, коли орієнтація антени змінюється в реальному часі. Це особливо актуально для передавання відео, де навіть короткочасне зникнення зв'язку призводить до втрати інформації.

Антенa є перетворювачем енергії - вона трансформує високочастотний електричний сигнал у поширювану електромагнітну хвилю і навпаки. Процес випромінювання відбувається за рахунок прискореного руху зарядів на провіднику, внаслідок чого утворюється змінне поле. При прийманні антена виконує обернену функцію: взаємодіючи з полем, вона індукує на своїх виводах напругу, пропорційну інтенсивності падаючої хвилі.

Для забезпечення ефективного випромінювання необхідне узгодження хвильового опору антени з характеристичним імпедансом тракту живлення. У разі поганого узгодження значна частина енергії відбивається назад у передавач, що призводить до втрат потужності та, можливо, перегріву передавального елемента.

У контексті БПЛА найчастіше розглядається модель поширення у вільному просторі, де хвиля розповсюджується прямолінійно без істотного впливу сторонніх об'єктів. Однак у реальних умовах присутні численні фактори, що спотворюють хвильовий фронт: відбиття від землі, багатопроменевість, поглинання вологи, розсіювання на перешкодах.

Особливо критичним є забезпечення прямої видимості (LoS) між передавальною та приймальною антенами. За її відсутності ефективність зв'язку суттєво знижується, а рівень сигналу може падати нижче порогу прийому. З огляду на це, геометрія спрямованості антени повинна бути такою, щоб мінімізувати втрати при відхиленні від осі.

РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ АНТЕН У БЕЗПІЛОТНИХ СИСТЕМАХ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

Проектування антенної системи для безпілотного літального апарата вимагає ґрунтовного розуміння фізичних параметрів, які визначають ефективність випромінювання, приймання та загальну якість радіоканалу. На відміну від стаціонарних або малорухомих систем, де антена може бути орієнтована жорстко і стабільно, у БПЛА антена перебуває в постійному русі. Це накладає додаткові вимоги як до її спрямованості, так і до поляризаційних характеристик та ширини смуги. Більше того, для мінімізації енергоспоживання і ваги необхідно досягти оптимального поєднання геометричних, електричних і функціональних властивостей. У цьому розділі розглядаються найважливіші антенні характеристики, які мають визначальний вплив на якість зв'язку між безпілотним апаратом та операторською станцією.

2.1. Коефіцієнт підсилення та спрямованість

Коефіцієнт підсилення антени є інтегральним показником, що об'єднує два важливих чинники - її ефективність у перетворенні електричної потужності в електромагнітну та просторовий розподіл цього випромінювання. Інакше кажучи, це міра того, наскільки ефективно антена "сфокусована" у певному напрямку. Вимірюється він у децибелах (дБ) відносно ізотропного випромінювача, який гіпотетично випромінює однаково в усі боки. [1]

Для систем керування БПЛА зазвичай застосовують антени з невисокою або помірною спрямованістю, що дає змогу зберігати надійний контакт із дроном, навіть коли його положення в просторі змінюється непередбачувано. У таких випадках кругова діаграма випромінювання є перевагою. Натомість для відеопередачі, де необхідна більша смуга пропускання і висока якість сигналу, доцільно застосовувати антени з широкосмуговими характеристиками і спрямованими діаграмами, які забезпечують ефективну передачу відеосигналу у

напрямку польоту апарата. Діаграма спрямованості визначає, як змінюється інтенсивність випромінювання в різних напрямках простору. Для антен, що встановлюються на наземних станціях, її форма повинна бути такою, щоб охопити максимальну ділянку повітряного простору без надмірного розсіювання енергії в непотрібних напрямках. З іншого боку, антена на самому БПЛА повинна забезпечувати рівномірне випромінювання в широкому телескопічному секторі, оскільки точна орієнтація часто неможлива або недоцільна. Поняття спрямованості детально описано у [2].

2.2. Узгодження імпедансу та відбиття енергії

Кожна антена має власний вхідний опір, який повинен бути узгоджений із хвильовим опором тракту живлення - зазвичай це коаксіальний кабель або мікросмужкова лінія з характеристичним імпедансом 50 Ом. У разі поганого узгодження виникає зворотне відбиття сигналу, яке не лише зменшує корисну потужність, що випромінюється, але й може створити високі стоячі хвилі, що призводять до перегріву передавача або до зниження лінійності сигналу.

Однією з найважливіших характеристик у цьому контексті є коефіцієнт зворотного відбиття, або S_{11} -параметр, який показує, яка частка потужності відбивається назад у передавач. Для практичних систем зв'язку вважається припустимим рівень $S_{11} < -10$ дБ, що означає відбиття менше ніж 10%. Проте в системах з високими вимогами до ефективності - наприклад, у малогабаритних БПЛА з обмеженою енергетикою - доцільно досягати рівнів -15 дБ – 20 дБ і нижче, щоб мінімізувати втрати. [3]

У CST Studio та подібних середовищах параметр S_{11} розраховується у частотній області як функція частоти, і на основі графіка можна визначити резонансну частоту та робочу смугу антени. Окрім цього, імпедансне узгодження може бути покращене за допомогою введення додаткових структур: слотів, чвертьхвильових трансформаторів, або шляхом зміни геометрії антени - наприклад, відстані до точки живлення у патч-антенах.

2.3. Ширина робочої смуги

Для передачі інформації, особливо відео у реальному часі, антена має забезпечувати сталу роботу в певному частотному діапазоні. Цей діапазон називають робочою смугою частот, і вона визначається як частотний інтервал, у межах якого зберігається прийнятне узгодження та стабільні характеристики діаграми випромінювання.

Типові мікросмужкові патч-антени мають відносно вузьку смугу (3–5% відносно центральної частоти), що може бути недостатнім у випадках, коли використовуються широкосмугові або частотно-змінні сигнали. Натомість спіральні антени, логоперіодичні структури або антени типу Vivaldi здатні охоплювати ширші діапазони, зберігаючи робочі параметри на належному рівні. [3,4]

У практиці проектування антен для БПЛА важливо не лише досягти бажаної смуги частот, а й забезпечити її стабільність при зміні навколишніх умов: температури, вологості, наявності відбивальних поверхонь поблизу. Саме тому під час моделювання доцільно враховувати вплив навколишнього середовища та компонувальні обмеження, пов'язані з геометрією самого літального апарата.

Таблиця 2.1 візуальне порівняння та вибір типу антени в залежності від задачі (керування або відео).

Тип антени	Gain (дБ)	Смуга частот	Розміри	Поляризація	Переваги
Мікросмугова патч-антена	6–8	Вузька	Малі	Кругова	Проста, дешева, компактна
Yagi-Uda	10–14	Вузька	Великі	Лінійна	Висока спрямованість
Vivaldi	9–12	Дуже широка	Великі	Лінійна	Добре підходить для відео

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ВИМОГ І ВИБІР СТРУКТУРИ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ

Розробка антенної системи для безпілотного літального апарата (БПЛА) - це, по суті, спроба знайти гармонію між невидимим і вимірюваним, між рухомим і статичним. Така система має працювати в динаміці, зберігаючи зв'язок із об'єктом, який може крутитись, нахилитись, тікати від перешкод або навіть ховатись за деревами. Саме тому ключовою вимогою стає не лише геометрична або частотна відповідність, а й витримка антени у контексті реального сценарію зв'язку - складного, шумного, нестабільного.

З огляду на ці умови, у даній роботі було обрано конфігурацію з чотирьох антен, що утворюють замкнуту двосторонню систему зв'язку: дві розміщені на борту БПЛА, а ще дві - на наземній станції. Така структура дозволяє реалізувати окремі канали для передачі керуючих команд та відеопотоку з максимальним рівнем надійності, з урахуванням можливості обертання літального апарата у просторі, втрат через розсинхронізацію поляризацій та впливу середовища.

Таблиця 3.1 візуальне порівняння та вибір типу антени в залежності від задачі (керування або відео).

Сторона	Частота	Антенa	Поляризація
БПЛА	2.4 ГГц	Мікросмугова патч-антенa	Кругова
Наземна	2.4 ГГц	Yagi-Uda	Направлена
БПЛА	5.8 ГГц	Мікросмугова патч-антенa	Кругова
Наземна	5.8 ГГц	Vivaldi	Направлена з широкими боковими пелюстками

3.1 Критерії вибору антен

Вибір типів антен значною мірою впливає як на якість і стійкість зв'язку, так і на загальну ефективність функціонування системи в умовах експлуатації. Під час аналізу було враховано ряд технічних, експлуатаційних та конструктивних критеріїв, що дозволили сформувавши оптимальну конфігурацію.

По-перше, було обрано мікросмугові патч-антени для встановлення на борту БПЛА в обох робочих діапазонах (2.4 ГГц та 5.8 ГГц). Основними перевагами даного типу антен є компактні габаритні розміри, низька маса та висока механічна стійкість, що дозволяє ефективно інтегрувати їх у конструкцію безпілотного апарата без погіршення його аеродинамічних характеристик. Окрім того, патч-антени забезпечують стабільну кругову поляризацію, що критично важливо для динамічної системи зв'язку з апаратом, який постійно змінює своє просторове положення.

Для наземної станції було обрано дві різні типи антен: Yagi-Uda для діапазону 2.4 ГГц та Vivaldi для діапазону 5.8 ГГц. Антена Yagi-Uda відома своєю високою спрямованістю та коефіцієнтом підсилення, що дозволяє ефективно формувати канал керування з мінімальним рівнем перешкод та високою енергетичною ефективністю. Завдяки вузькій діаграмі спрямованості така антена здатна забезпечувати надійний зв'язок навіть на великих відстанях.

Антена Vivaldi, що використовується для приймання та передачі відеопотоку в діапазоні 5.8 ГГц, демонструє дуже широку смугу пропускання та хорошу стійкість до багатопроменевого поширення. Її особливістю є наявність широких бокових пелюсток, що забезпечують кращу роботу в умовах з відбиттями та завадами. Це дозволяє підвищити якість передачі відеоданих у складному радіочастотному середовищі.

Таким чином, обрана конфігурація антен - результат компромісу між вагою, розмірами, електричними характеристиками та вимогами до експлуатаційної надійності системи зв'язку. Приклад такої системи показано на рисунку 3.1

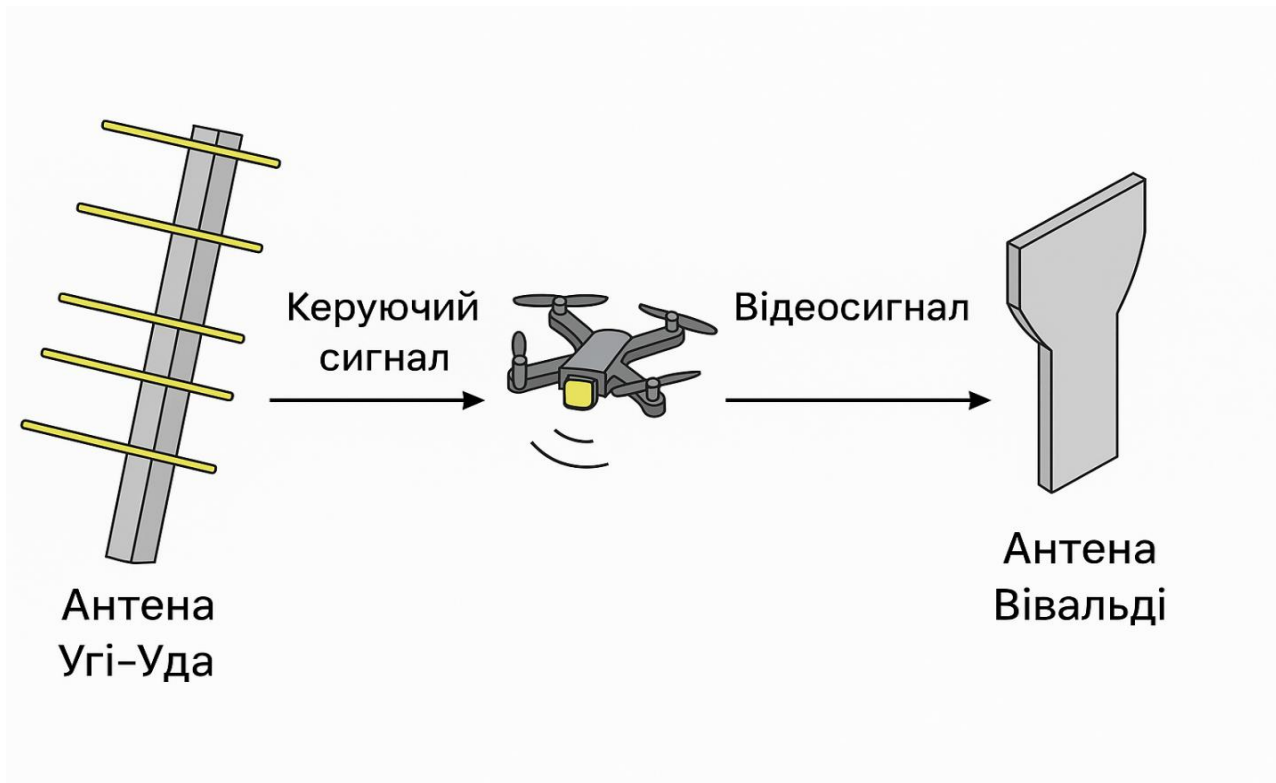


Рисунок 3.1 - Ілюстративне зображення антенної системи

3.2 Особливості роботи у конкретному середовищі

Особливості експлуатаційного середовища мають визначальний вплив на вимоги до побудови антенної системи безпілотного літального апарата. В умовах сучасних бойових дій ці вимоги суттєво зростають порівняно з цивільними сценаріями застосування. Бойова обстановка характеризується високою динамікою, значним рівнем електромагнітних завад та складною конфігурацією рельєфу і забудови, що вимагає від антенної системи підвищеної надійності, стійкості та універсальності.

Мікросмугові патч-антени, обрані для встановлення на борту БПЛА в діапазонах 2.4 ГГц та 5.8 ГГц, забезпечують оптимальне поєднання компактності, маси та електричних характеристик. Ключовою перевагою цих антен є наявність кругової поляризації, для зменшити втрати сигналу під час активного маневрування літального апарата. У бойових умовах БПЛА нерідко змінює курс, нахилиється, виконує складні просторові маневри з метою уникнення виявлення чи ураження засобами ППО або РЕБ противника. Завдяки використанню патч-антен із

круговою поляризацією забезпечується стабільний радіоканал навіть за відсутності стабілізації положення БПЛА відносно горизонту.

На наземній станції для організації каналу керування використовується антена Yagi-Uda, що має вузьку діаграму спрямованості та високий коефіцієнт підсилення. Це дозволяє ефективно пригнічувати вплив сторонніх сигналів та зменшувати вплив навмисних завад, які активно застосовуються у сучасній бойовій обстановці засобами радіоелектронної боротьби. При цьому вузька спрямованість антени вимагає ретельної орієнтації на етапі розгортання наземної станції, що враховується в процедурі підготовки до бойової роботи.

Антенa Vivaldi, що використовується на наземній станції для передавання та приймання відеопотоку у діапазоні 5.8 ГГц, демонструє високу ефективність у складних радіочастотних умовах. Завдяки дуже широкій смузі пропускання та специфічній формі діаграми спрямованості (із широкими боковими пелюстками) ця антена забезпечує якісну передачу відеоданих навіть у сценаріях з інтенсивним багатопробним поширенням сигналу - характерним для міських умов або зон з густою забудовою. Враховуючи, що у бойових діях БПЛА часто залучаються для моніторингу в реальному часі складних ландшафтів або населених пунктів, такий вибір антени є цілком виправданим.

Окрім електромагнітних характеристик, важливу роль у бойових умовах відіграє механічна стійкість та захищеність антен. Вибрані типи антен мають конструктивні особливості, що дозволяють їх ефективно інтегрувати у захищені корпуси (для БПЛА) або встановлювати у захищеному виконанні на наземній станції. Це забезпечує їх стійкість до пилу, вологи, механічних впливів та температурних перепадів, що є типовими для сучасного поля бою.

Таким чином, обрана структура антенної системи дозволяє ефективно вирішувати завдання забезпечення стійкого двостороннього зв'язку між БПЛА та наземною станцією в умовах реального бойового застосування, забезпечуючи високу якість та надійність роботи системи в широкому діапазоні тактичних сценаріїв.

3.3 Механічні обмеження

Для забезпечення стійкого двостороннього зв'язку між БПЛА та наземною станцією було необхідно врахувати низку конструктивних обмежень, що безпосередньо впливали як на вибір конкретних типів антен, так і на їх подальшу практичну реалізацію у складі системи.

Зважаючи на те, що система розробляється для використання в умовах реальних бойових дій, при проектуванні постійно враховувалась необхідність забезпечити достатню механічну надійність елементів при збереженні максимальної простоти конструкції. Вибір антен здійснювався з урахуванням можливості їх застосування у «штатному» виконанні - без потреби у спеціальних захисних кожухах чи складних монтажних вузлах.

Для антен, призначених для встановлення на БПЛА, критичним параметром були габаритні розміри та маса. Будь-яке додаткове навантаження на бортовий апарат впливає на льотні характеристики та час автономної роботи. У процесі проектування приділялась увага вибору таких розмірів антенного елемента та підкладки, які дозволяють досягти необхідних електромагнітних характеристик без надмірного збільшення фізичних розмірів.

Також враховувалась стійкість таких антен до вібрацій та механічного впливу, які можуть виникати як під час роботи у повітрі, так і в процесі транспортування або підготовки апарата до польоту. У проекті передбачено кріплення антен у стандартних монтажних точках корпусу БПЛА без додаткових захисних елементів, але з урахуванням мінімізації впливу вітрового навантаження.

Для наземної станції вимоги до конструкції антен були дещо іншими. Антена Yagi-Uda, яка використовується у каналі керування, має вузьку діаграму спрямованості та доволі витягнуту конструкцію. У процесі проектування враховувалась необхідність забезпечити достатню механічну жорсткість рефлектора та директорів для збереження точності геометрії під час транспортування та розгортання у польових умовах. Конструкція антени передбачає можливість оперативного монтажу на щоглі або мобільній платформі.

Антенa Vivaldi, що застосовується у каналі відеопередачі, має іншу конструкцію - пласку та більш стійку до деформацій. При проектуванні даної антени враховувалась потреба забезпечити достатню товщину металевого елемента та вибір матеріалу підкладки, яка зберігає стабільність своїх характеристик при температурних коливаннях та механічному впливі. Це дозволяє використовувати антену у відкритому виконанні без додаткового захисту.

Загалом у ході роботи було прийнято рішення не передбачати розроблення спеціальних механічних засобів захисту або кріплення антен поза межами стандартного функціонального виконання. Основна увага приділялась забезпеченню того, щоб самі антени у вибраній конфігурації були конструктивно достатньо стійкими для практичного використання у бойових умовах та не створювали додаткових вимог до оператора при розгортанні системи.

Таким чином, у процесі проектування були враховані як особливості механічного навантаження у ході експлуатації системи, так і необхідність забезпечення максимальної простоти та надійності конструкції без зайвого ускладнення її практичного використання.

РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНІ РОЗРАХУНКИ АНТЕН ТА МОДЕЛЮВАННЯ

У даному розділі проведено попередній розрахунок основних геометричних параметрів антен, які використовуються для формування антенної системи у складі безпілотного авіаційного комплексу. Теоретичні розрахунки виконані для таких антен:

- патч-антена 2,4 ГГц;
- антена Ягі-Уда 2,4 ГГц;
- патч-антена 5,8 ГГц;
- антена Вівальді 5,8 ГГц.

Розраховані значення параметрів дозволяють сформувані вихідні моделі для подальшого моделювання у CST Studio.

4.1 Розрахунок та моделювання патч-антен 2,4 ГГц, та 5.8 ГГц.

Для розрахунку патч-антен для частот 2.4 ГГц та 5.8 та виготовлення антен обрано стандартний склотекстоліт FR-4, завдяки його широкій доступності та задовільним характеристикам. Провідний шар : мідь.

Параметри підкладки FR-4:

- Діелектрична проникність: $\epsilon_r = 4.4$
- Товщина підкладки: $h = 1.6$ мм
- Тангенс кута діелектричних втрат: $\text{tg}(\delta) \approx 0.02$

Методика розрахунку патч-антени

Розрахунок проводиться за класичною методикою Hammerstad [5], яка передбачає врахування ефектів краєвого розтікання поля.

Для проектування прямокутної мікросмушкової патч-антени першим етапом є розрахунок основних геометричних параметрів, які забезпечать роботу антени на потрібній частоті. Процес розрахунку виконується у кілька послідовних кроків.

1. Перше - розрахувати ширину патча (W). Ширина патча визначає імпедансну характеристику антени та впливає на ефективність випромінювання.

Доцільно обирати значення W таким чином, щоб забезпечити зменшення добротності та розширення смуги пропускання.

Ширина розраховується за формулою:

$$w = \frac{c}{2f_0} * \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (4.1)$$

де:

c - швидкість світла ($3 \cdot 10^8$ м/с),

f_0 - робоча частота,

ϵ_r - діелектрична проникність підкладки.

Далі, потрібно визначити ефективну діелектричну проникність (ϵ_{eff})

У реальній антені поле частково проходить у діелектрику, а частково - у повітрі. Щоб це врахувати, використовується ефективна проникність:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \left(1 + \frac{12h}{w}\right)^{-0.5} \quad (4.2)$$

Наступним кроком розраховуємо ефективне подовження країв (ΔL)

Через краєві ефекти реальна довжина патча, що визначає резонансну частоту, дещо більша за геометричну.

Подовження розраховується за формулою Hammerstad:

$$\Delta L = 0.412h \cdot \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (4.3)$$

І останнім кроком визначаємо довжину патча (L)

Тепер обчислюємо довжину патча, яка визначає основний резонанс антени:

$$L = \frac{c}{2f_0 \cdot \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (4.4)$$

Приклад того, де саме використовується L та W при розрахунку патч антени, показано на рисунку 4.1

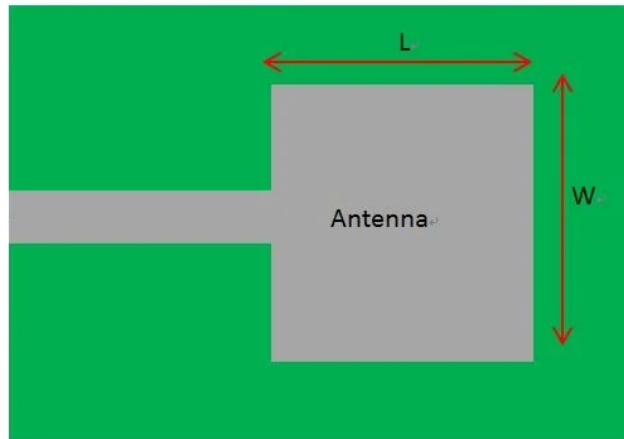


Рисунок 4.1 - Приклад розрахунку патча в антенні

На основі наведених формул, виконаємо практичний розрахунок геометричних параметрів патч-антен для частот 2.4 ГГц та 5.8 ГГц. Для цього підставимо відповідні числові значення у формули, використовуючи однакову підкладку FR-4 ($\epsilon_r = 4.4$, $h = 1.6$ мм).

Для частоти 2.4 ГГц:

$$W = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2.4 \cdot 10^9} * \sqrt{\frac{2}{4.4+1}} \approx 38,04 \text{ мм} \quad (4.1)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{4.4+1}{2} + \frac{4.4-1}{2} * \left(1 + \frac{12 \cdot 0,0016}{0,0038}\right)^{-0.5} \approx 4,085 \quad (4.2)$$

$$\Delta L = 0.412 \cdot 0.0016 \cdot \frac{(4,085+0.3)(23.775+0,264)}{(4,085-0,258)(23.775+0,8)} = 0,739 \text{ мм} \quad (4.3)$$

$$L = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2.4 \cdot 10^9 \cdot 2,02118} - 2 \cdot 0,000739 = 29,45 \text{ мм} \quad (4.4)$$

Для частоти 5.8 ГГц:

$$W = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 5.8 \cdot 10^9} * \sqrt{\frac{2}{4.4+1}} \approx 15,74 \text{ мм} \quad (4.1)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{4.4+1}{2} + \frac{4.4-1}{2} * \left(1 + \frac{12 \cdot 0,0016}{0,01574}\right)^{-0.5} \approx 3,839 \quad (4.2)$$

$$\Delta L = 0.412 \cdot 0.0016 \cdot \frac{(3,839+0.3)(9.8375+0,264)}{(3,839-0,258)(9.8375+0,8)} = 0,724 \text{ мм} \quad (4.3)$$

$$L = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 5.8 \cdot 10^9 \cdot 1,95935} - 2 \cdot 0,000739 = 11,75 \text{ мм} \quad (4.4)$$

Для зручності подання розрахункових даних сформовано узагальнену таблицю, яка слугує основою для подальшого моделювання патч-антени.

Таблиця 4.1 Фінальні розрахунки патчів для 2.4 ГГц та 5.8 ГГц.

Частота	W (ширина патча)	ϵ_{eff}	ΔL (мм)	L (довжина патча)
2.4 ГГц	38.04 мм	4.085	0.739	29.45 мм
5.8 ГГц	15.74 мм	3.839	0.724	11.75 мм

Виконавши розрахунок геометричних параметрів для двох патч-антен, заносимо отримані значення ширини та довжини патча у CST Studio. На основі цих даних моделюємо антени у середовищі та отримуємо наступні готові антени для роботи на частотах 2.4 ГГц та 5.8 ГГц.

Окрім розрахунків ширини та довжини патча, під час практичного моделювання для покращення узгодження антени з джерелом сигналу та зменшення коефіцієнта відбиття S_{11} було додатково реалізовано вузький проріз у нижній частині патча, через який здійснюється живлення антени мікросмушковою лінією. Така конструкція дозволяє більш гнучко налаштувати імпеданс антени у робочому діапазоні частот та забезпечити стабільні характеристики випромінювання. [6]

На рис. 4.2 показаний вигляд патч-антени у CST Studio.

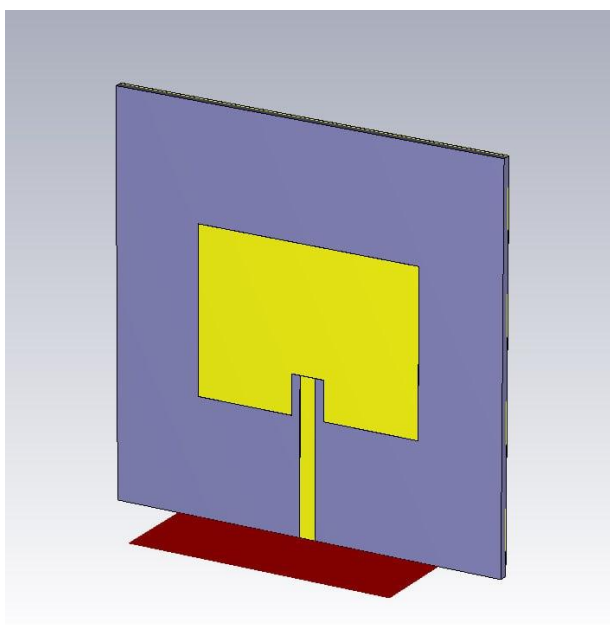


Рисунок 4.2 - Вигляд патч-антени на частоті 2.4 ГГц у середовищі CST Studio

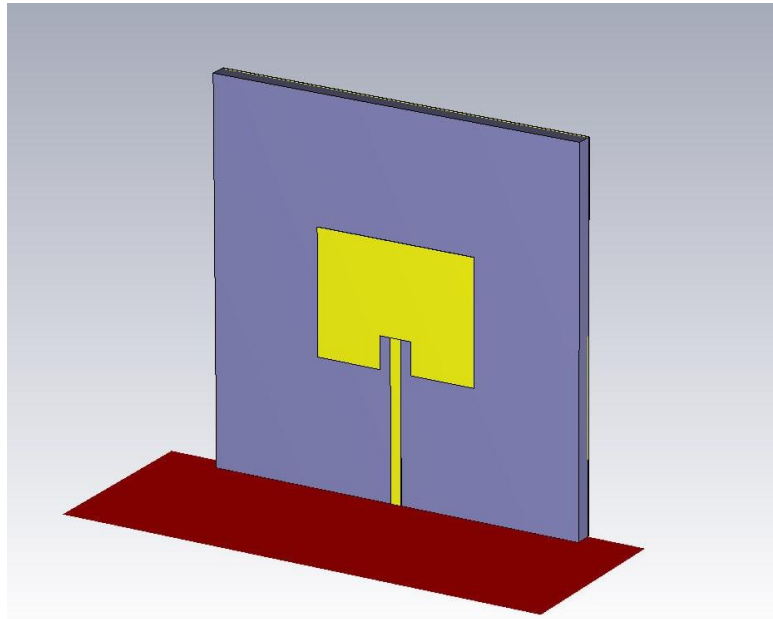


Рисунок 4.3 - Вигляд патч-антени на частоті 5.8 ГГц у середовищі CST Studio

Порівнявши візуально моделі патч-антен для можна зробити висновок, що при збільшенні робочої частоти відбувається зменшення геометричних розмірів антени. Це відповідає фізичним принципам формування стоячих хвиль у патчі: зі зростанням частоти довжина хвилі зменшується, а отже, для забезпечення резонансу необхідно пропорційно зменшувати ширину та довжину патча.

Після побудови моделей патч-антен на основі виконаних розрахунків здійснюється оцінка їхніх основних характеристик. Зокрема, розглядаються параметри коефіцієнта відбиття (S_{11}), діаграми спрямованості та коефіцієнта підсилення, що дозволяє визначити ефективність функціонування антен у заданих частотних діапазонах.

Як показано на рисунках 4.4 та 4.5, для патч-антени на частоті 2.4 ГГц значення коефіцієнта відбиття S_{11} становить приблизно -40 дБ, тоді як для патч-антени, розрахованої на частоту 5.8 ГГц, цей показник дорівнює близько -45 дБ. Такі результати є відмінними, оскільки значення нижче -20 дБ вказує на дуже гарне узгодження антени з трактом живлення та мінімальні втрати потужності на

відбиття. Це свідчить про ефективну передачу енергії у вільний простір у заданих робочих діапазонах частот.

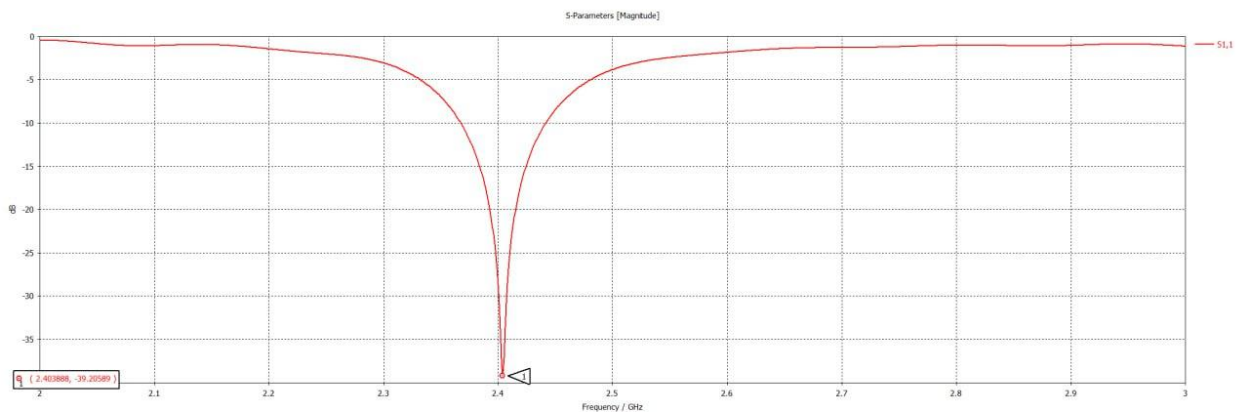


Рисунок 4.4 - Параметр S₁₁ для патч-антени 2.4ГГц

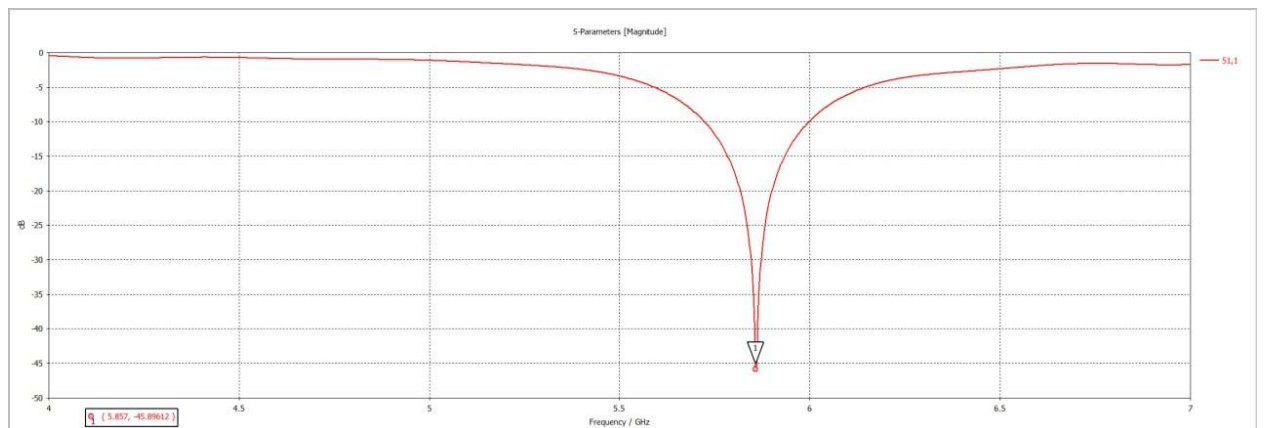


Рисунок 4.5 - Параметр S₁₁ для патч-антени 5.8ГГц

Для патч-антени на 2.4 ГГц основне випромінювання зорієнтоване перпендикулярно до площини антени (у напрямку осі z), що відповідає типовій характеристиці патч-антен. Подібна картина спостерігається і для антени на 5.8 ГГц (рис. 4.6 та рис. 4.7). Аналіз діаграм спрямованості демонструє наявність чітко вираженого основного лобового випромінювання з мінімальними рівнями бічних пелюсток для обох антен. Для більш повного уявлення про просторову характеристику випромінювання побудовано також тривимірні візуалізації діаграм спрямованості, які дозволяють оцінити симетричність та ширину головного пелюстка в різних площинах (рис. 4.8 та 4.9)

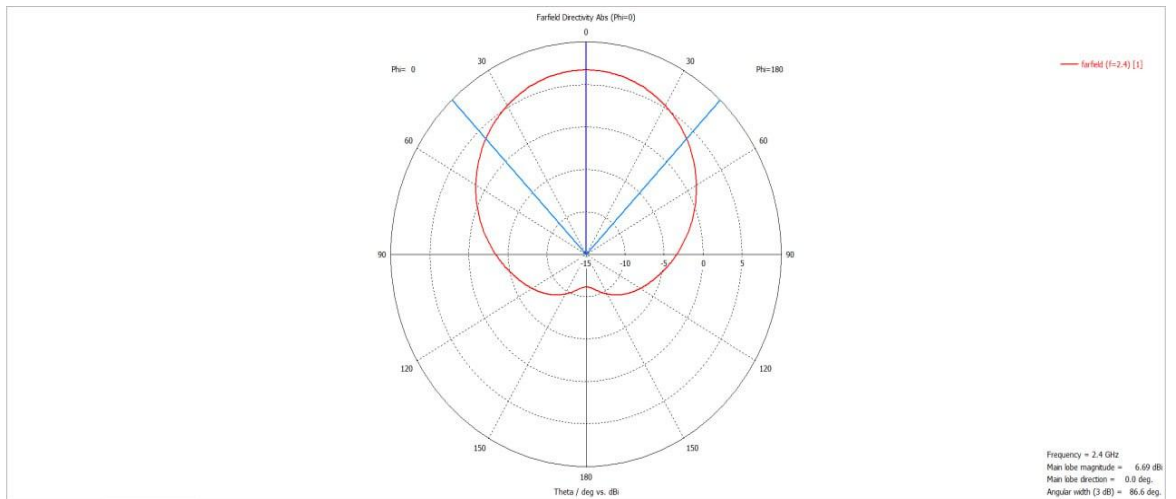


Рисунок 4.6 - Діаграма спрямованості для 2.4 ГГц патч-антени

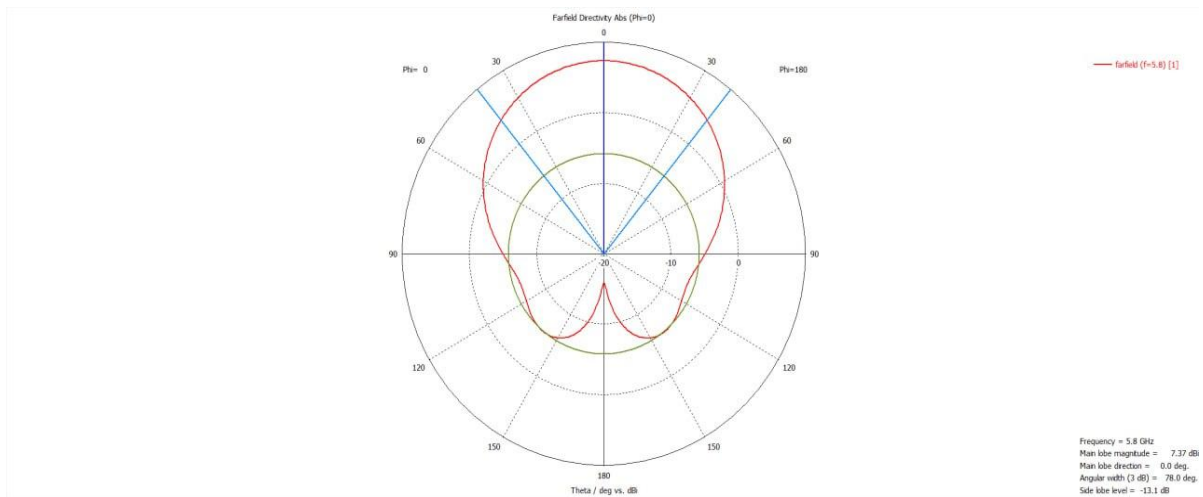


Рисунок 4.7 - Діаграма спрямованості для 5.8 ГГц патч-антени

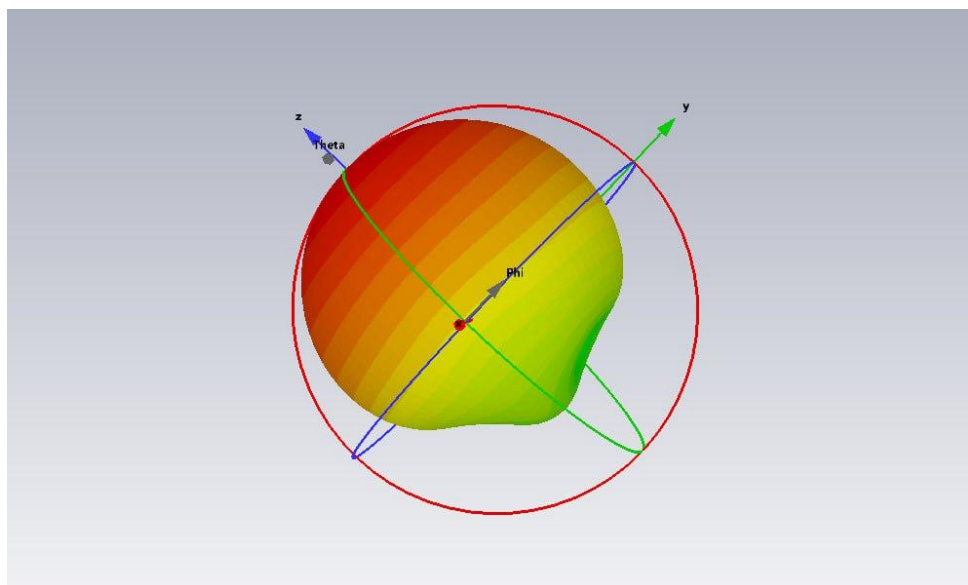


Рисунок 4.8 - 3D візуалізація діаграми спрямованості для 2.4ГГц патч-антени

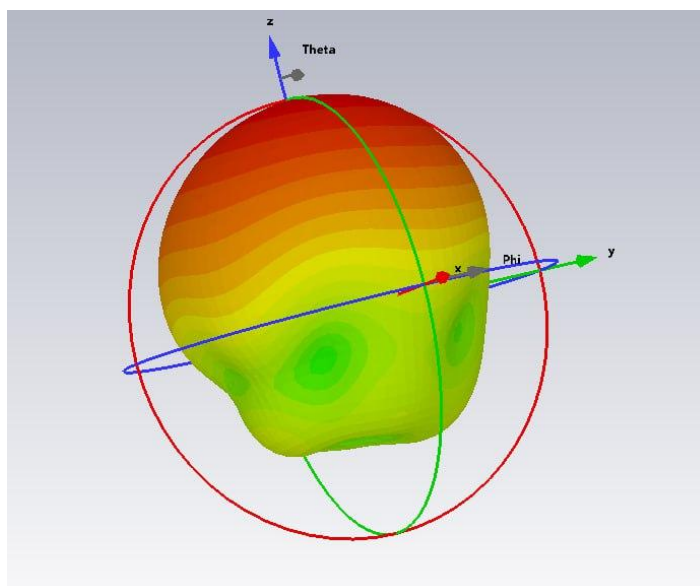


Рисунок 4.9 - 3D візуалізація діаграми спрямованості для 5.8ГГц патч-антени

Щодо коефіцієнта підсилення, з отриманих результатів видно, що антена на частоті 2.4 ГГц забезпечує коефіцієнт підсилення близько 6.7 дБі, а антена на 5.8 ГГц - близько 7.3 дБі. Такі значення є типовими для патч-антен та підтверджують їх здатність ефективно концентрувати випромінювану енергію у заданому напрямку.

Також для оцінки ефективності узгодження антенних систем були проведені вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі (VSWR, Voltage Standing Wave Ratio).

Графіки VSWR (рис. 4.10, рис. 4.11) дають змогу оцінити, наскільки ефективно антена передає або приймає енергію на заданій частоті, та визначити ступінь відбиття енергії назад до передавача. Значення VSWR, наближене до 1.0, свідчить про максимально ефективне узгодження.

З графіка VSWR (рис. 11) для діапазону 2.4 ГГц видно, що антена демонструє дуже гарне узгодження. Мінімальне значення VSWR ≈ 1.05 досягається на частоті 2.4057 ГГц, що забезпечує ефективне передавання потужності з мінімальними втратами. В межах частот 2.3938 – 2.4143 ГГц значення VSWR не перевищує 1.2, що гарантує достатньо широку смугу ефективної роботи.

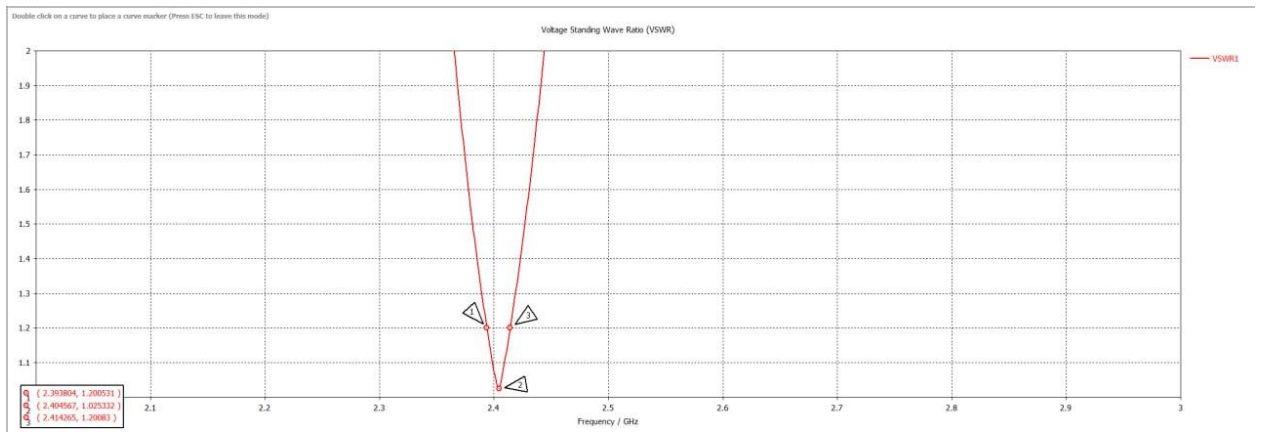


Рисунок 4.10 - Графік VSWR для діапазону 2.4 ГГц

За графіком VSWR (рис. 4.11) у діапазоні 5.8 ГГц також спостерігається відмінне узгодження. Мінімальне значення VSWR ≈ 1.01 досягається на частоті 5.86 ГГц, що свідчить про практично ідеальне узгодження. У діапазоні частот 5.820 – 5.899 ГГц значення VSWR не перевищує 1.2, що забезпечує стабільну та ефективну роботу.

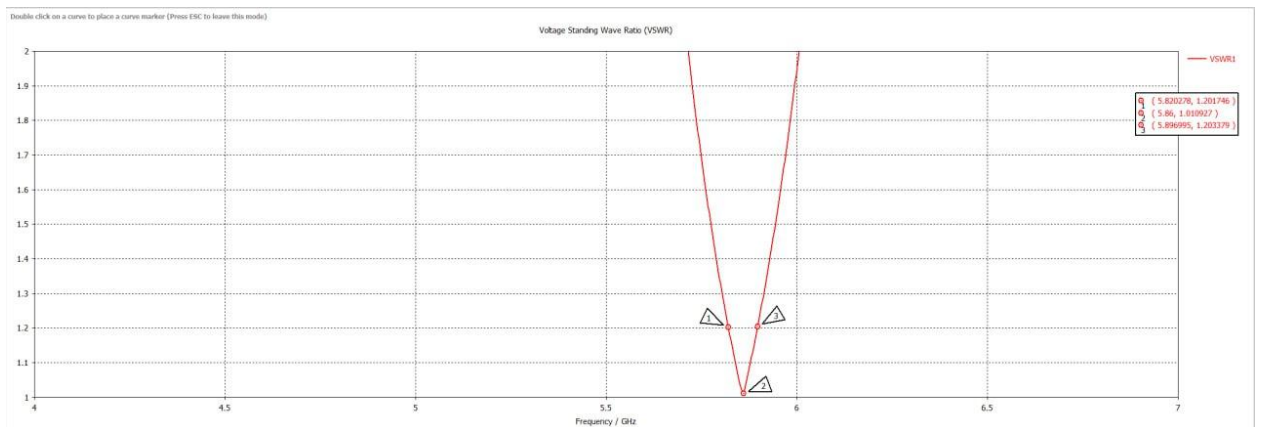


Рисунок 4.11 - Графік VSWR для діапазону 5.8 ГГц

4.2 Розрахунок та моделювання антени Vivaldi

Під час розрахунку враховувалося, що антени типу Vivaldi забезпечують широкосмугове випромінювання завдяки плавному розширенню активної щілини та є ефективними для роботи в діапазоні 5–6 ГГц, що робить їх придатними для приймання відеосигналу.

Аналогічно до патч-антен, у конструкції було використано підкладку FR-4, оскільки вона є доступною, широко застосовується в друкованих антенах і

характеризується прийнятними втратами при роботі на частотах до 6 ГГц.
Провідний шар (металізація): мідь.

Параметри підкладки:

- діелектрична проникність $\epsilon_r = 4.4$
- товщина $h = 1.6$ мм
- тангенс кута втрат $\text{tg}(\delta) \approx 0.02$

Наступним кроком визначено необхідну довжину антени. Для цього орієнтувався на мінімальну робочу частоту, яку хочу забезпечити. Для Vivaldi довжину антени зазвичай вибирають у межах:

$$L \approx 2 \dots 3 \cdot \lambda_{\min} \quad (4.5)$$

Такий підхід описаний як емпіричний критерій для експоненційних щілин і наведений у численних дослідженнях [6,9], де λ_{\min} - довжина хвилі на нижній межі робочого діапазону.

У роботі прийнято:

$$f_{\min} = 5 \text{ ГГц} \Rightarrow \lambda_{\min} = \frac{3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^9} = 60 \text{ мм} \quad (1.1)$$

Далі обрано:

$$L = 2 \cdot \lambda_{\min} = 120 \text{ мм}$$

Ця довжина дозволяє хвилі достатньо «розкритися» у щілині для ефективного випромінювання.

Ширина антени також прив'язана до λ_{\min} . $W_{\max} \approx \lambda_{\min} = 60$ мм

Така ширина забезпечує достатню апертуру для формування основної петлюстки діаграми спрямованості.

Наступним кроком стало визначення форми експоненційної щілини.

$$y(x) = \pm c * e^{a*x} \quad (4.6)$$

де:

- **x** - координата уздовж антени
- **c** - початкова ширина щілини
- **a** - коефіцієнт експоненціального розширення.

Початкову ширину щілини обрано як : $c = 0,5$ мм. Формула підтверджується в практичних прикладах TSA [6,8].

Щоб правильно задати форму експоненційного розширення, розраховуємо коефіцієнт a за формулою:

$$a = \frac{1}{L} \ln \frac{(W_{max}/2)}{c} \quad (4.7)$$

Підставляючи: $a = \frac{1}{120} \ln \frac{(30/2)}{0.5} = 34,1 \text{ м}^{-1}$

На задній стороні FR-4 реалізоване живлення через мікросмужку із імпедансом 50 Ом. Ширина стрічки $w \approx 3 \text{ мм}$ розрахована за класичною формулою [5]:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right) \quad (4.8)$$

Після цього на передній стороні додано круглий перехід (діаметр $\approx 3 \text{ мм}$). Це дозволяє здійснити плавний перехід з мікросмужки до щілини, покращити узгодження і стабільність діаграми [6,9].

Тепер, використовуючи отримані в результаті розрахунків геометричні параметри антени Вівальді, заносимо відповідні дані у середовище моделювання CST Studio та створюємо тривимірну модель антени. (рис. 4.12 , рис. 4.13) На основі цієї моделі виконаємо чисельний аналіз та проаналізуємо основні параметри антени - коефіцієнт відбиття (S_{11}), коефіцієнт стоячої хвилі (VSWR), діаграму спрямованості та коефіцієнт підсилення.

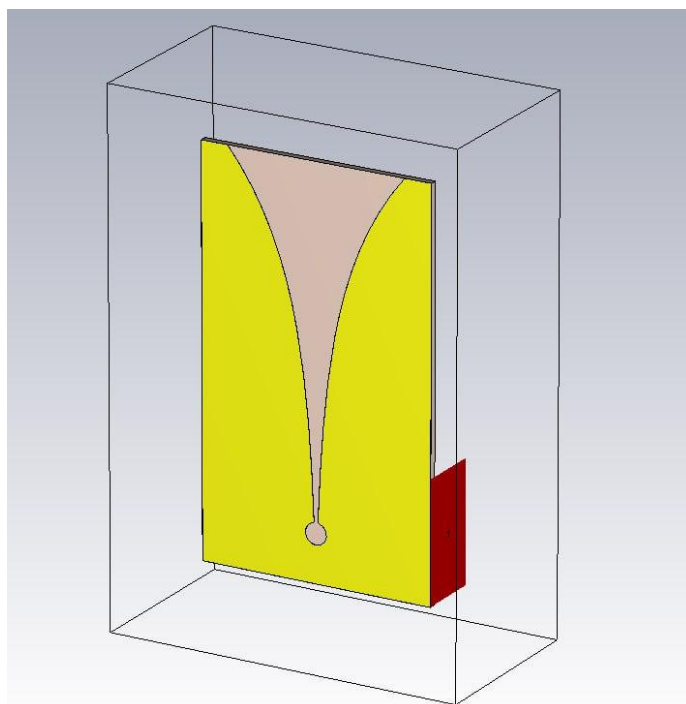


Рисунок 4.12 - Тривимірна модель антени Vivaldi

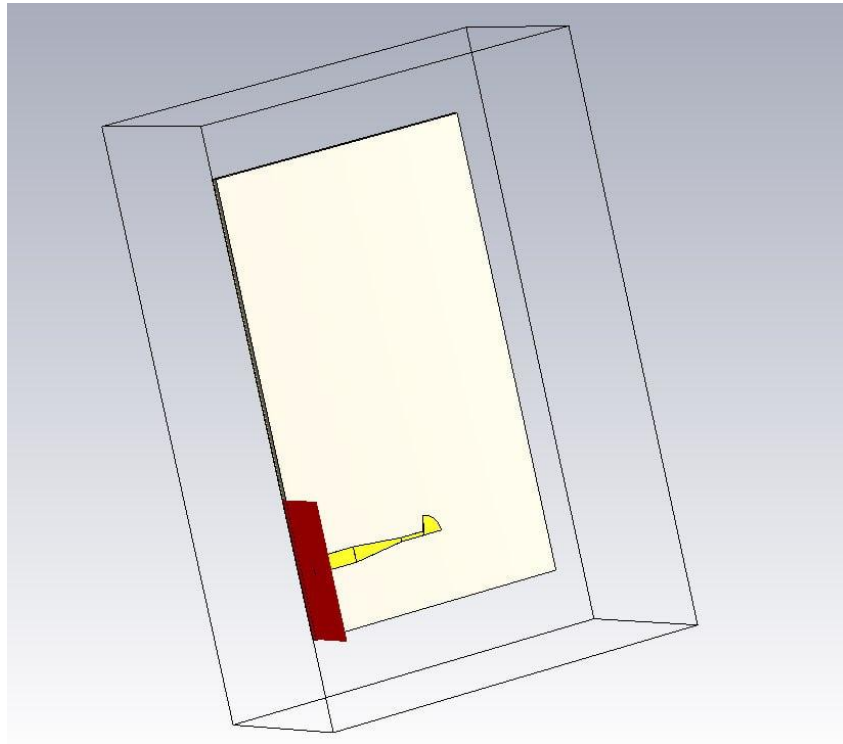


Рисунок 4.13 - Задня частина тривимірної моделі антени Vivaldi

Графік VSWR показує мінімальне значення ≈ 1.01 на частоті 5.86 ГГц. У діапазоні частот 5.820 – 5.899 ГГц значення не перевищує 1.2. Це свідчить про гарне узгодження антени у робочій смузі 5.8 ГГц та забезпечує стабільну ефективну роботу системи у зазначеному діапазоні.

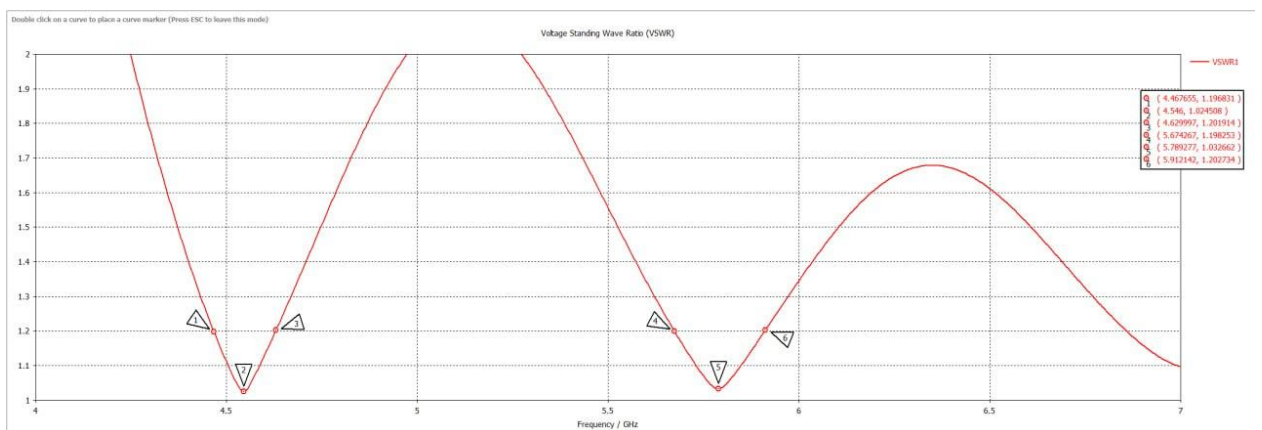


Рисунок 4.14 - Графік VSWR для діапазону 5.8 ГГц антени Vivaldi

Графік S_{11} (рис. 4.15) показує мінімальне значення -35.9 дБ на частоті 5.788 ГГц, що також вказує на ефективне узгодження та низький рівень відбиття сигналу.

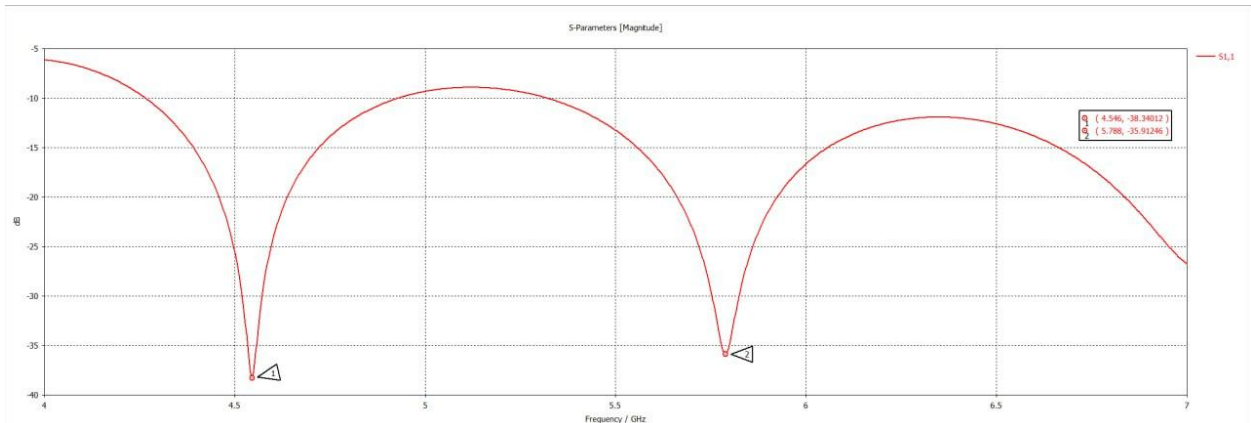


Рисунок 4.15 - Параметр S_{11} для антени Vivaldi

Діаграма спрямованості (рис. 4.16, 4.17) у площині $\Phi = 90^\circ$ показує головну пелюстку з максимальним значенням 9.14 дБ при напрямку 91.0° . Ширина головного пелюстка (3 дБ) складає 51.4° , рівень бічних пелюстків становить -7.3 дБ. Це свідчить про чітко виражену спрямовану характеристику з контрольованими бічними пелюстками.

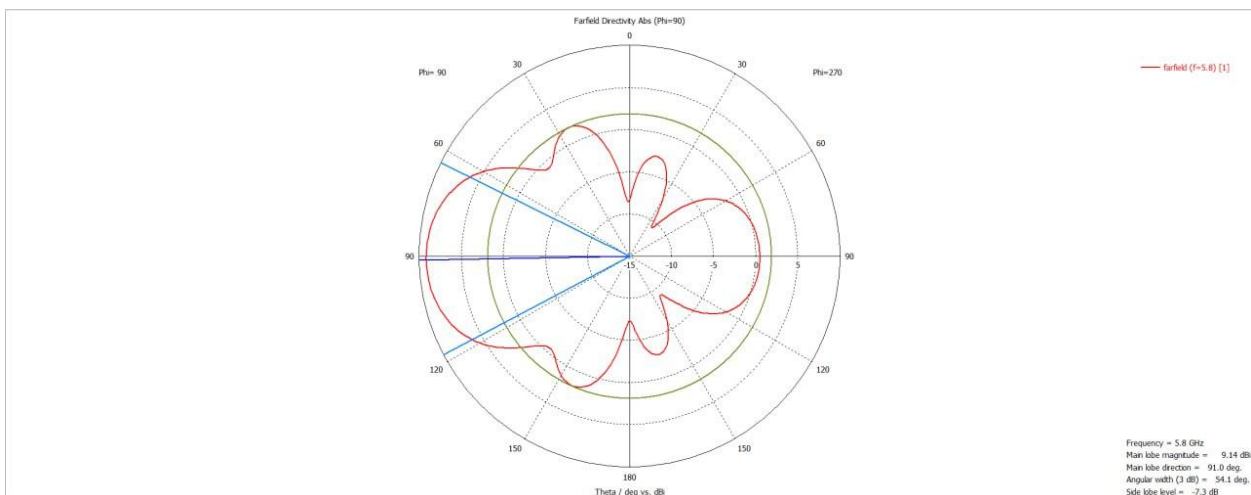


Рисунок 4.16 - Діаграма спрямованості для 5.8 ГГц антени Vivaldi

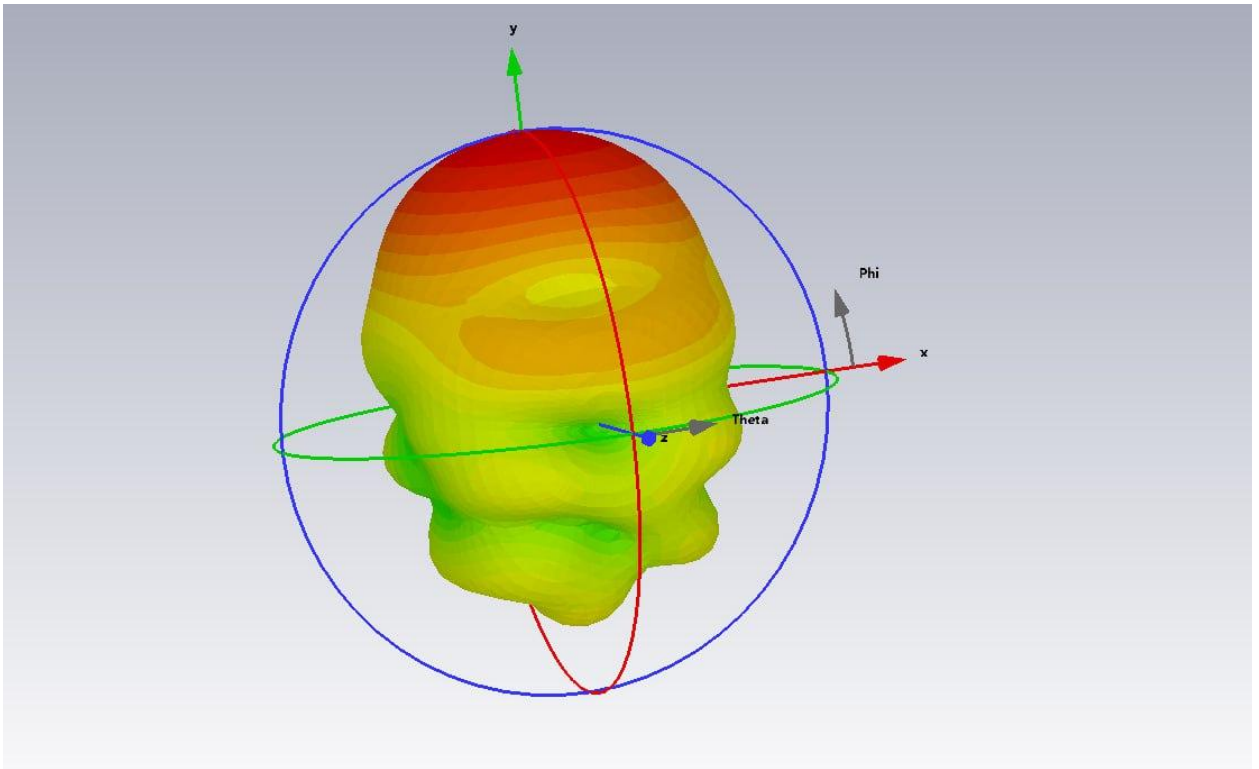


Рисунок 4.17 - 3D Діаграма спрямованості для 5.8 ГГц антени Vivaldi

4.3 Розрахунок та моделювання антени Yagi-uda

Основна частота: 2.4 ГГц.

$$\text{довжина хвилі : } \lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{2,4 \cdot 10^9} = 125 \text{ мм} \quad (1.1)$$

Розрахунок довжин елементів:

Довжина вібратора обирається виходячи з умови максимального випромінювання на резонансній частоті:

$$Ld = \frac{\lambda}{2} \cdot Kd \quad (4.9)$$

Де $Kd \approx 0.95$ - коефіцієнт укорочення для врахування товщини провідника і ефекту навколишнього середовища (за [10], [11]).

$$Kd = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi \cdot d}{Ld}\right)^2}} \quad (4.10)$$

Оскільки в конструкції використовується мідна трубка діаметром приблизно 6 мм і довжина $Ld \approx \lambda/2$ спершу береться $kd \approx 0.95$, а потім ітераційно уточнюється.

$$Ld = \frac{125}{2} * 0.95 = 59.375 \text{ мм} \quad (4.11)$$

Оптимальна довжина рефлектора визначається як:

$$L_r = 125 \times 0.49 = 61.25 \text{ мм} \quad (4.12)$$

Довжини директорів зазвичай зменшуються каскадно. Для першого директора:

$$L_{dir1} = 125 \times 0.435 = 54.375 \text{ мм}$$

для наступних директорів часто застосовують ступінчате зменшення $\Delta L \approx 1-2\%$:

$$L_{dir(n)} = L_{dir1} \times (1 - (n - 1) \times 0.01)$$

Розрахунок міжелементних відстаней

Відстань між рефлектором і вібратором:

$$d_{r-d} = \lambda \times (0.1)$$

Візьмемо:

$$d_{r-d} = 125 \times 0,1 = 12.5 \text{ мм}$$

Відстань між вібратором і першим директором:

$$d_{d-dir1} = 125 \times 0,15 = 18,75$$

Для зручного використання в CST studio та створення візуальної моделі, складемо всі результати в зручну таблицю:

Таблиця 4.3 Результати розрахунків для моделювання антени Yagi-Uda.i

Елемент	Довжина (мм)	Відстань до попереднього елемента (мм)
Reflector	61.25	-
Driven Element	59.38	12.50
Director 1	54.38	18.75
Director 2	53.83	18.75
Director 3	53.29	18.75

На основі отриманих результатів побудовано візуальну модель в середовищі CST Studio (рис. 4.18).

Прийнята конструкція:

- Стійка - алюмінієвий профіль прямокутного перерізу.
- Елементи - мідні трубки, 6 мм.
- Конфігурація - 1 рефлектор + 1 вібратор + 3 директори.

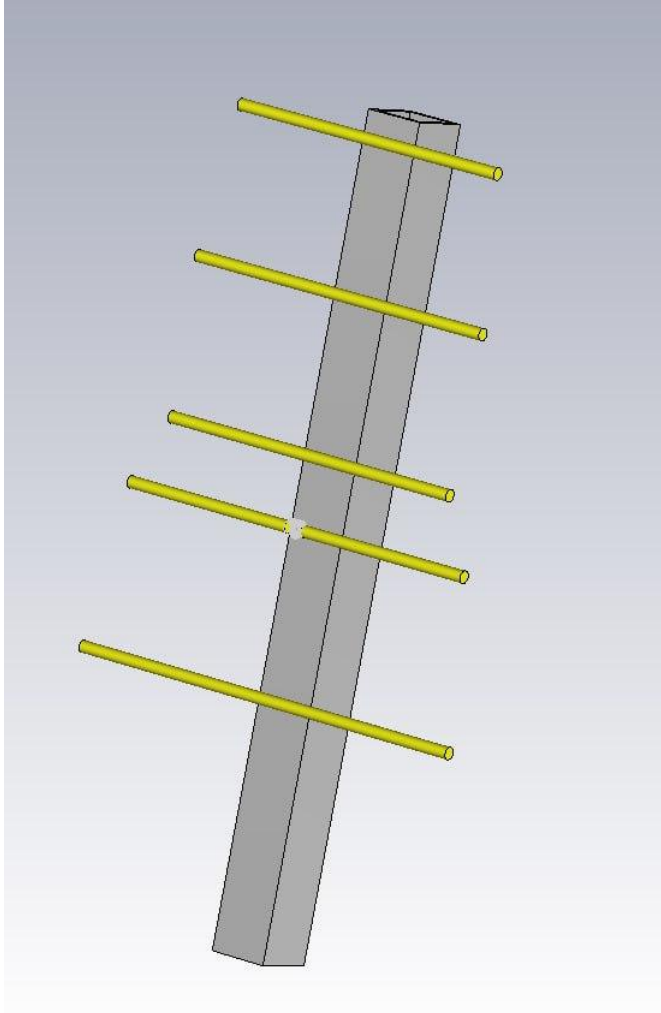


Рисунок 4.18 - Тривимірна модель антени Yagi-Uda

Графік VSWR (рис. 4.19) показує мінімальне значення ≈ 1.006 на частоті 2.4 ГГц. У діапазоні частот 2.357 – 2.427 ГГц значення не перевищує 1.31, що свідчить про гарне узгодження антени у робочій смузі 2.4 ГГц.

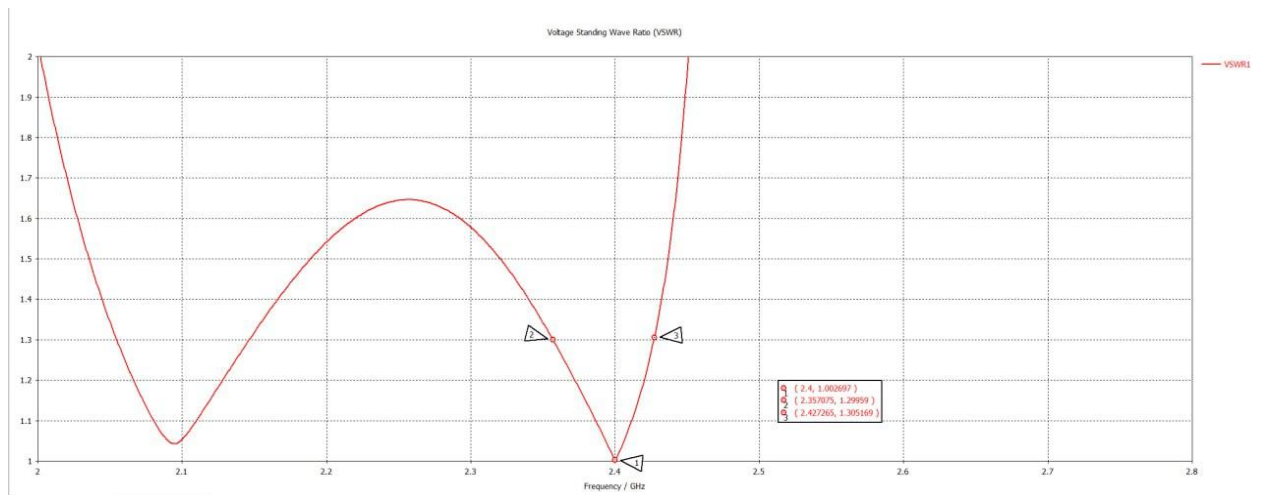


Рисунок 4.19 - Графік VSWR для антени Yagi-uda

Графік S_{11} (рис. 4.20) показує мінімальне значення -57.41 дБ на частоті 2.4 ГГц. Це свідчить про дуже ефективне узгодження з передаючим трактом та мінімальний рівень відбиття сигналу.

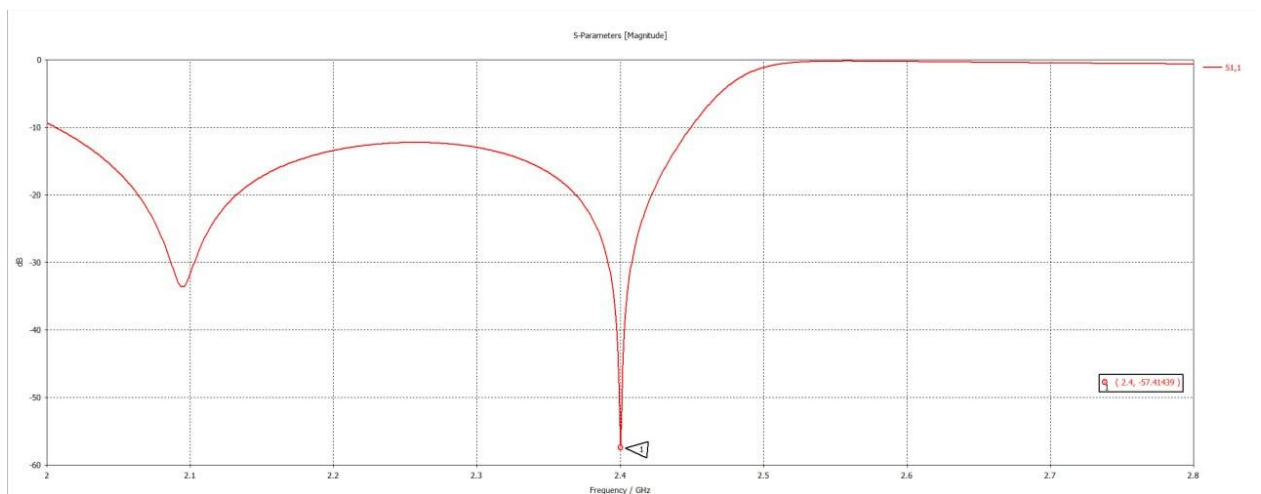


Рисунок 4.20 - Графік S_{11} для антени Yagi-uda

Діаграма спрямованості (рис. 4.21) у площині показує головний пелюсток з максимальним значенням 9.02 дБ при напрямку 0° . Ширина головного пелюстка (3 дБ) складає 66.6° , рівень бічних пелюстків - -8.1 дБ. Це свідчить про добре

виражену

спрямовану

характеристику.

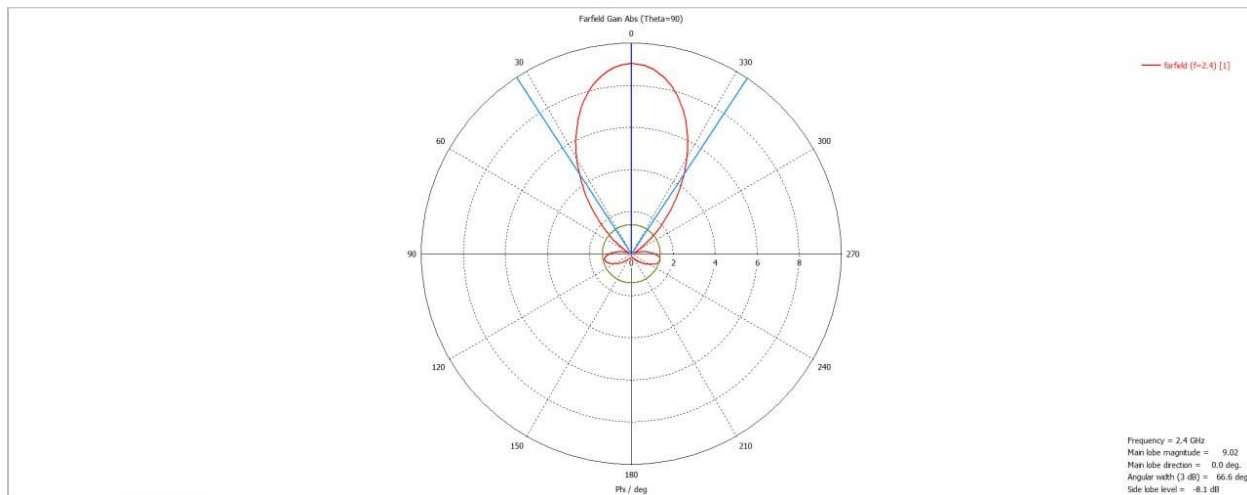


Рисунок 4.21 - Діаграма спрямованості для антени Yagi-uda

ВИСНОВКИ

У процесі виконання дипломної роботи було розроблено та оптимізовано антенно-фідерну систему для забезпечення двоканального радіозв'язку між безпілотним літальним апаратом та наземною станцією управління.

На основі аналізу вимог до антенних систем БПЛА було обґрунтовано вибір типів антен для кожного каналу зв'язку. Для каналу управління (2.4 ГГц) було розроблено патч-антену для встановлення на БПЛА та антену Yagi-Uda для наземної станції. Для каналу передачі відео (5.8 ГГц) розроблено патч-антену для БПЛА та антену Vivaldi для приймання на землі.

Проведено розрахунок та моделювання антен у середовищі CST Studio. Результати моделювання підтвердили ефективне узгодження антен із живильними трактами ($S_{11} < -35$ дБ), високий коефіцієнт підсилення (від 6.7 до 9.14 дБі) та чітко виражені діаграми спрямованості.

Розроблено ілюстративне зображення загальної конфігурації антенної системи БПЛА (рис. 3.1), що демонструє принцип взаємодії антен та напрямки передачі керуючих команд і відеосигналу.

Запропонована антенно-фідерна система задовольняє вимоги до ефективності, масогабаритних характеристик і стійкості роботи у складних умовах експлуатації. Отримані результати свідчать про можливість її практичного використання у малогабаритних БПЛА для забезпечення стабільного радіозв'язку у бойових та цивільних застосуваннях.

Перелік джерел посилання

1. C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, Wiley.
2. R. C. Johnson, Antenna Engineering Handbook, McGraw-Hill.
3. D. M. Pozar, Microwave Engineering, Wiley.
4. W. S. T. Rowe, Wideband Planar Antennas for Wireless Communications, Wiley.
5. Hammerstad, E. and Jensen, O.: “Accurate models for microstrip computer-aided design,” Proceedings of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 1980, pp. 407–409.
6. O. Iupikov, "Feed Model for the Tapered Slot Antennas," 2011.
7. G.E. Ponchak et al., "Characteristics of Double Exponentially Tapered Slot Antenna," NASA, 2007.
8. L. Pu & X.-M. Zhang, “Low-Profile Dual Exponentially Tapered Slot Antenna,” PIER Lett., 2009.
9. COMSOL Blog: “Vivaldi Antenna Design Analysis,” 2015.
10. C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, Wiley, 2016.
11. ARRL Antenna Handbook, latest edition.