

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інформаційної безпеки та електронних комунікацій

(повне найменування інституту, факультету)

Інформаційних технологій та телекомунікацій

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

Магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ТА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО
ВІДСТЕЖЕННЯ БПЛА З ПЕРЕДАВАЧАМИ КЕРУВАННЯ 2,4ГГц

Виконав: студент(ка) 6 курсу, групи РТ-512м

Спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Інтелектуальні технології мікросистемної
радіоелектронної техніки

Керівник Вадим ОНИЩЕНКО

(прізвище та ініціали)

Рецензент Гаррі МОРОЗ

(прізвище та ініціали)

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій

Кафедра __ Інформаційних технологій електронних засобів _____

Ступінь вищої освіти Магістр _____

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка _____
(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація): Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки _____
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІТЕЗ _____

« _____ » _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Павленко Микола Іванович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Розробка алгоритму та системи автоматичного відстеження БПЛА з передавачами керування 2,4ГГц _____

керівник проєкту (роботи) Онищенко Вадим Федорович, к.ф.-м.н, доцент каф.ІТЕЗ _____,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвердені наказом закладу вищої освіти від «11» листопада 2023 року № 448

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 20 грудня _____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) протоколи передавання відеосигналу та сигналу керування бездротовим методом, що використовується у БПЛА на частоті 2,4ГГц _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз області розробки, Основні вимоги до системи відстеження та її структура, Методика роботи електронної частини системи відстеження, Розробка конструкції друкованих плат, Розробка програми керування системою відстеження БПЛА, висновки, перелік посилань, додаток А, додаток Б _____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
23 слайди _____

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	Вадим ОНИЩЕНКО	03.10.23	
2	Вадим ОНИЩЕНКО	17.10.23	
3	Вадим ОНИЩЕНКО	07.11.23	
4	Вадим ОНИЩЕНКО	21.11.23	
нормоконтроль	Ірина ПОСПЕЄВА	01.12.23	

7. Дата видачі завдання «04» __вересня____ 2023_року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз області розробки	9.10.23	
2	Основні вимоги до системи відстеження та її структура	11.10.23	
3	Методика роботи електронної частини системи відстеження	12.10.23	
4	Розробка конструкції друкованих плат	20.10.23	
5	Розробка програми керування системою відстеження БПЛА	15.11.23	
6	Тестування	25.11.23	
7	Розробка програмного забезпечення для ПК	02.12.23	
8	Оформлення ПЗ та захист дипломного проєкту	16.12.23	

Студент(ка)

_____ **Микола ПАВЛЕНКО**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)

_____ **Вадим ОНИЩЕНКО**
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 85 сторінок, 57 рисунків, 3 таблиць, 8 джерел, 1 додаток.

БЕЗПЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ, ПЕРЕДАВАЧ, ДЕТЕКТОР, ВИКОНАВЧА СИСТЕМА, АНТЕНА

Мета роботи – розробка алгоритмів відстеження БПЛА по радіосигналу який вони випромінюють під час польоту та розробка апаратної системи відстеження на основі запропонованих алгоритмів.

Об'єкт дослідження: алгоритм керування пристроєм відстеження БПЛА по радіосигналу.

Предмет дослідження: система відстеження БПЛА по радіосигналу в діапазоні 2,4ГГц.

У першому розділі розглядаються основні вимоги до системи відстеження та її структура.

У другому розділі проводиться розробка методики роботи електронної частини системи відстеження.

У третьому розділі розробляється конструкція друкованих плат.

У четвертому розділі розробляється програма керування системою відстеження БПЛА.

ЗМІСТ

Реферат.....	4
Вступ	7
1. Основні вимоги до системи відстеження та її структура	8
1.1 Структура та основні принципи роботи системи.....	8
1.2 Конструктивні вимоги та конструктивне виконання трекеру системи відстеження.....	10
1.2.1 Вимоги до конструкції та її загальна структура	10
1.2.2 Горизонтальний ротатор.....	11
1.2.3 Стійка антени	17
1.2.4 Драйвер верхньої антени	20
1.2.5 Стріла антени	22
1.2.5 Противага	24
2 Методика роботи електронної частини системи відстеження.....	25
2.1 Антена приймача	25
2.2 Поширення сигналу.....	29
2.3 Блок детектування сигналу	30
2.3.1 Основи антени блоку детектування.....	31
2.3.2 Антени сенсора рівня сигналу	33
2.3.3 Моделювання антени	34
2.3.4 Перехід на плату друкованої плати FR4	36
2.4 Балун.....	37
2.4.1 Балун Базука.....	38
2.4.2 Мікросмушкові балуни	38
2.5 Мікросхема детектора живлення	43

2.6 Фільтр	44
2.6.1 Керамічні фільтри.....	45
3 Розробка конструкції друкованих плат	46
3.1 Плати детектора.....	46
3.2 Екранування	52
3.3 Розміщення фідерних антен	53
3.4 Виконавча система	55
3.4.1 Двигуни постійного струму та редуктори	55
3.4.2 Регулятори швидкості	60
4 Розробка програми Керування системою відстеження БПЛА та тестування	62
4.1 Модуль керування	62
4.2 Програмне забезпечення.....	65
4.2.1 Блок-схеми програми	65
4.2.2 ШІМ	68
4.2.3 Процедура аналогово-цифрового перетворення	72
4.2.4 Компенсація	73
4.2.5 Датчик вертикального розташування.....	73
4.3 Контроль безпеки	75
4.4 Тестування.....	76
4.4.1 Лабораторні тестування.....	76
4.4.2 Польові випробування	77
Висновки.....	78
Перелік джерел посилання	81
Додаток А – Презентація	82

ВСТУП

Мета цієї роботи полягає в тому, щоб змусити рефлекторну антену з двигуном автоматично відслідковувати БПЛА за допомогою встановленого на борту передавача 2,4 ГГц. Це було зроблено з однієї причини, щоб мати можливість передавати відеосигнали з БПЛА на землю в реальному часі. Одним із можливих завдань для подібної програми є політ БПЛА над небезпечними зонами (наприклад затопленими територіями та лісовими пожежами), і з безпечної відстані спостерігати, як виглядає ця територія.

Зараз подібні дії проводяться шляхом відстеження БПЛА наводячи рефлекторну антену вручну. Це може бути дуже важко на великих відстанях, коли БПЛА важко побачити неозброєним оком.

Існують методи з керування рефлекторною антеною за GPS-координатами літака. Недоліком цих методів є те, що цивільна система GPS має обмеження в точності, також існує затримка в часі від моменту передачі БПЛА своїх координат до моменту, коли двигуни фактично направляють антену до заданих координат. Тому потрібен новий підхід що збільшить точність наведення антени.

1 ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ ВІДСТЕЖЕННЯ ТА ЇЇ СТРУКТУРА

1.1 Структура та основні принципи роботи системи

В роботі пропонується новий підхід до вирішення проблеми відстеження БПЛА що базується на прийомі переданого БПЛА сигналу 2,4 ГГц за допомогою рефлекторної антени з високим коефіцієнтом підсилення та невеликим кутом основного пелюстка діаграми направленості.

Коли диск відбивача (рефлектора) антени вирівняно з передавачем, фокусна точка буде розташована прямо перед антеною, але коли передавач виходить за межі лінії, фокусна точка буде рухатися в протилежному напрямку передавача. Цей факт використовується для відстеження БПЛА.

Для кожної площини (горизонтальної та вертикальної) дві маленькі Ягі-антени, розміщені на невеликій відстані від теоретичної точки фокусу рефлекторної антени. Залежно від руху БПЛА потужність сигналу на антенах Yagi буде різною. Виходячи з цього, рефлекторним диском можна керувати, щоб зменшити ці відмінності і, отже, спрямувати диск (основний пелюсток діаграми направленості) безпосередньо на БПЛА. Коли виникають відмінності в антенах Yagi, мікроконтролер реагує, порівнюючи ці сигнали, і залежно від відмінностей у потужності сигналу мікропроцесор керує двигунами, щоб направляти рефлекторну антену в правильне положення. Це означає, що фокусна точка завжди буде розташована десь між чотирма виявляючими Yagi.

Інтерфейс між антенами Yagi та входами аналого-цифрового мікропроцесора є високопродуктивним мікросхемою логарифмічного RF детектора від Linear Technology, LT5534. Ця мікросхема перетворює потужність радіочастотного сигналу на рівень постійного струму, який можна використовувати для мікропроцесора.

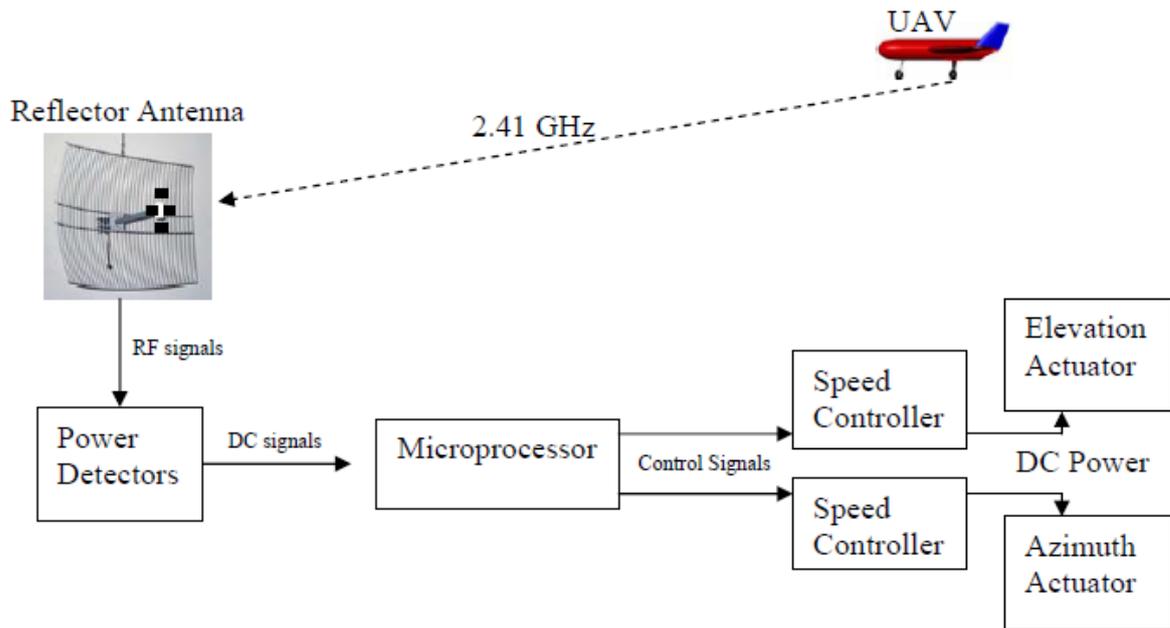


Рисунок 1.1 – Структура системи

Використання антен Yagi було не єдиним варіантом, як антени Patch, так і Helix були також проаналізовані як варіант для застосування. Після подальшого дослідження використання патч-антен виявилось некоректним, оскільки вони блокували б занадто багато вхідного випромінювання і, отже, зменшували коефіцієнт підсилення рефлекторної антени. Антени Helix були резервним варіантом, якщо б антени Yagi не спрацювали.

Було проаналізовано різні способи виявлення та порівняння радіочастотних сигналів. Результатом аналізу було ознайомлення з різними виробниками мікросхем, які можуть бути корисними для цієї задачі. Це виявилось досить складним завданням, оскільки існує багато різних виробників з великою кількістю мікросхем.

Після проведеного аналізу було знайдено у виробників Analog Devices, Maxim і Linear Technology мікросхеми детектора потужності з так званим виходом RSSI. Остаточний вибір був зроблений у бік мікросхеми детектора живлення Analog Devices LT5534 і відповідну оціночну плату.

Було проведено аналіз багатьох відкритих джерел щодо фільтрів і того, який тип фільтра використовувати. Була проаналізована продукція компаній-виробників

фільтрів Toko, Murata та Johansson Technology, щодо зразків смугових фільтрів 2,45 ГГц.

У якості керуючого мікроконтролера було обрано PIC16F877. Використання PIC16F877 не було визначено на початку проекту, але оскільки процесор і система розробки були доступні, подальших досліджень для пошуку відповідного процесора не проводилося.

Оскільки антена цієї системи має бути здатною рухатися дуже маленькими кроками з високою точністю, щоб відстежувати БПЛА на великих відстанях, механічне рішення має бути дуже міцним, щоб уникнути збоїв і провисання. На основі цих фактів було розроблено конструкцію механічного рішення.

1.2 Конструктивні вимоги та конструктивне виконання трекеру системи відстеження

1.2.1 Вимоги до конструкції та її загальна структура

Технічні характеристики пристрою відстеження БПЛА які мають бути забезпечені під час його роботи:

- система повинна мати можливість відстежувати БПЛА, що летить зі швидкістю до 40 м/с, на відстані до 10 км;
- система повинна мати можливість рухатися з кроком 1 градус (не більше), щоб стежити за БПЛА на великій відстані.
- для транспортування система повинна вміщуватись в багажник легкового автомобіля.

Тривимірна модель розробленої конструкції наведена на рис.1.2.

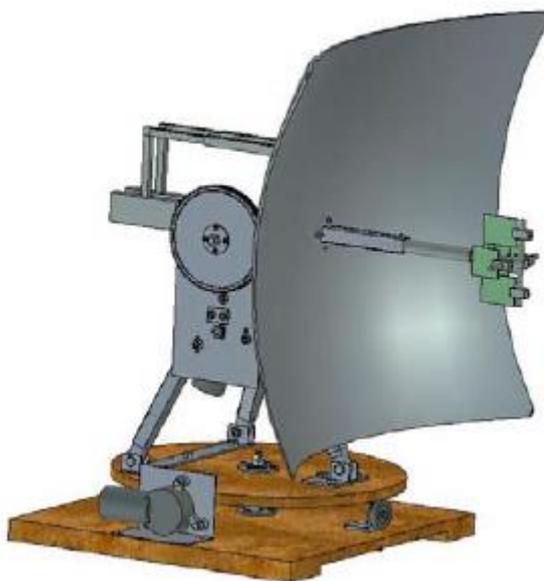


Рисунок 1.2 – Тривимірна модель конструкції трекера

Конструкція трекера системи складається з наступних елементів:

- горизонтальний ротатор;
- стійка антени;
- драйвер верхньої антени;
- стріла антени;
- противага

1.2.2 Горизонтальний ротатор

Регулюючи тиск на центральний болт, можна регулювати тиск на опорні колеса та ведуче колесо, щоб ведуче колесо не проковзнуло. Цей спосіб передачі може бути не найкращим у довгостроковій перспективі, тому що гума має тенденцію втрачати зчеплення з часом. Кращим способом зробити це може бути встановлення зубчастого кола під дерев'яний диск і невелике зубчасте колесо на двигуні або використання ремінної передачі, подібної до передачі, що використовується у вертикальній площині.

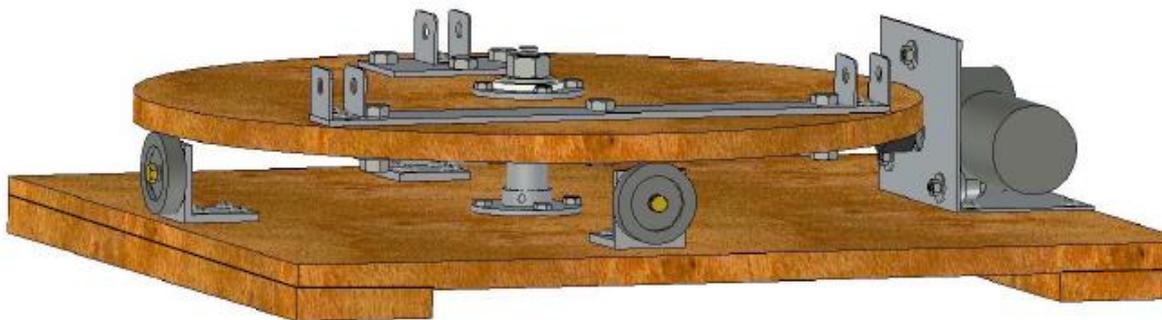


Рисунок 1.3 – Горизонтальний ротатор

Нижня плита (основа) виготовлена з ДСП товщиною 18 мм і має розмір 560 x 600 мм. Два 10-міліметрові отвори, один у центрі основи та один у центрі диска, що обертається, були просвердлені для заземлення, відео та кабелю керування, які необхідні для керування горизонтальним двигуном і виведення відеосигналу. Також було просвердлено чотири отвори діаметром 8 мм для кріплення болтів середньої опорної стійки. Дві дошки шириною 90 мм були прикріплені вздовж коротшої сторони основної плати, щоб отримати відстань для кабелів, що виходять із середнього отвору.

Три колеса з пластику з гумовою поверхнею були встановлені на алюмінієвих кутах і прикріплені до нижньої пластини звичайними дерев'яними шурупами. Колеса були встановлені на відстані 230 мм від центрального отвору на нижній пластині, як показано на малюнках 3.2 і 3.6. Колеса та алюмінієві кути були знайдені в майстерні ECSE, імовірно, це були деталі, що залишилися від попередніх проектів, але вони добре працювали для нас.

Спрощена модель двигуна була виготовлена в IronCAD, а кронштейн призначений для його утримання. Кронштейн був виготовлений із складеного алюмінію 3 мм, див. (1) на малюнку 3.6 для гарного огляду.



Рисунок 1.4 – Середнє стебло горизонтального ротатора

Функція середніх штоків полягає в центруванні обертового диска на центральному отворі в опорній пластині. Стовбур складався з кількох частин, як показано на малюнку 3.3 ліворуч. Усі деталі зроблені з алюмінію, за винятком трохи яскравішої шайби у верхній частині, яка зроблена з нейлону для зменшення тертя під час обертання. Стебло можна розділити на дві великі частини: верхню (обертальну) і нижню (нерухому). Верхній був прикручений до великого обертового диска, а нижній – до опорної плити.

На рис. 1.5 наведено три частини, які утворюють нижню частину середнього стебла.

Верхня частина праворуч підтримує опорний корпус верхньої частини середнього стовбура, описаний на наступній сторінці. Зверху він мав різьблення M12, тому його можна затягнути на великий диск і уникнути прослизання колеса. Крім того, у всіх цих частинах є отвір, через який можуть проходити сигнальні кабелі, які потрібно взяти з обертової частини підставки.

Середня частина була затягнута на опорній плиті 4 болтами, які вкручені в різьбові отвори в нижній частині.



Рисунок 1.5 – Середнє стебло, нижня частина

Верхня частина середнього штока (показана на рис. 1.6) складається з трьох виготовлених на замовлення частин і одного кулькового підшипника.

Середній шток проходить через дві нижні частини цієї конструкції і зупиняється на кульковому підшипнику. Різьбова частина проходить через верхню шайбу, а гайку можна затягнути зверху за допомогою нейлової шайби між гайкою та алюмінієвою шайбою. Ця нейловою шайба зменшує тертя між гайкою та алюмінієвою шайбою, коли горизонтальний диск обертається.



Рисунок 1.6 – Середнє стебло, верхня частина

Потім усі ці частини стягуються разом чотирма болтами М6 навколо основного диска (рис. 1.7).

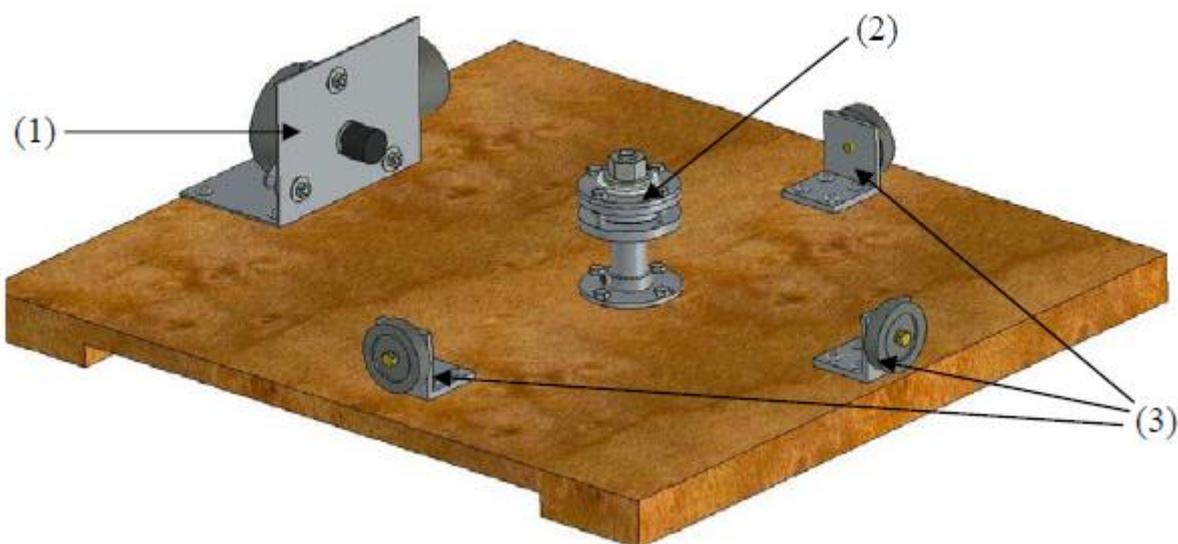


Рисунок 1.7 – Повна база,

(1): двигун із кронштейном, (2): середній шток, (3): опорні колеса

Диск, який буде тримати підставку, виготовлений з ДСП 18 мм. Центр диска був відфрезерований, як можна бачити на рис. 1.8, щоб верхня частина середнього стебла поміщалася в диск.



Рисунок 1.8 – Головний обертовий диск

Щоб зробити міцну основу для підставки, було сконструйовано дві сталеві пластини (1) на рис. 1.9 для утримання кронштейнів (2), які, у свою чергу, утримують ніжки. Причина, чому ці пластини були сконструйовані, полягає в тому, щоб зменшити силу, що діє на кронштейни для ніг. Коли пристрій складається разом, ці кронштейни працюють як з'єднання. Якщо під час згортання болт, який утримує кронштейн разом із ніжкою, не буде належним чином відпущений, зусилля на кронштейн буде досить великим. Якщо кронштейни будуть угвинчені безпосередньо в ДСП шурупами, існує ризик того, що шурупи тріснуть з плити. Тому кронштейни кріпляться на більшу сталеву пластину за допомогою болтів, а пластини, в свою чергу, кріпляться болтами на диск.

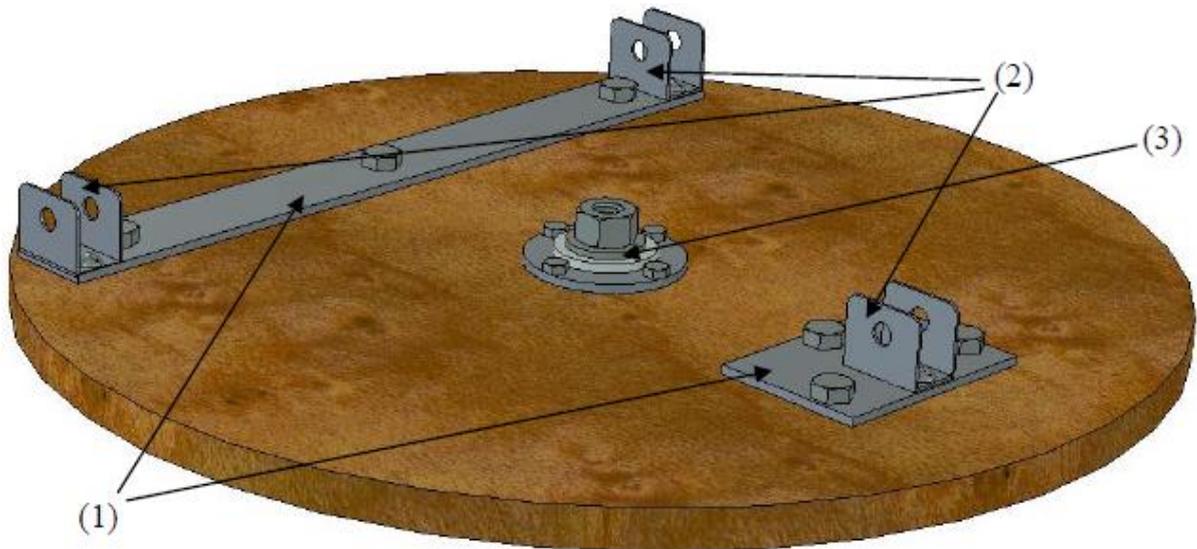


Рисунок 1.9 – Основний диск,
(1) сталеві пластини, (2) кронштейни ніжок, (3) верхня частина центрального
стебла

1.2.3 Стійка антени

Стійка для антени має бути дуже міцною та міцною, але її потрібно складати, щоб можна було досягти більшої мобільності. Враховуючи ці міркування, ми розробили триногу підставку, як показано на рис. 1.10.

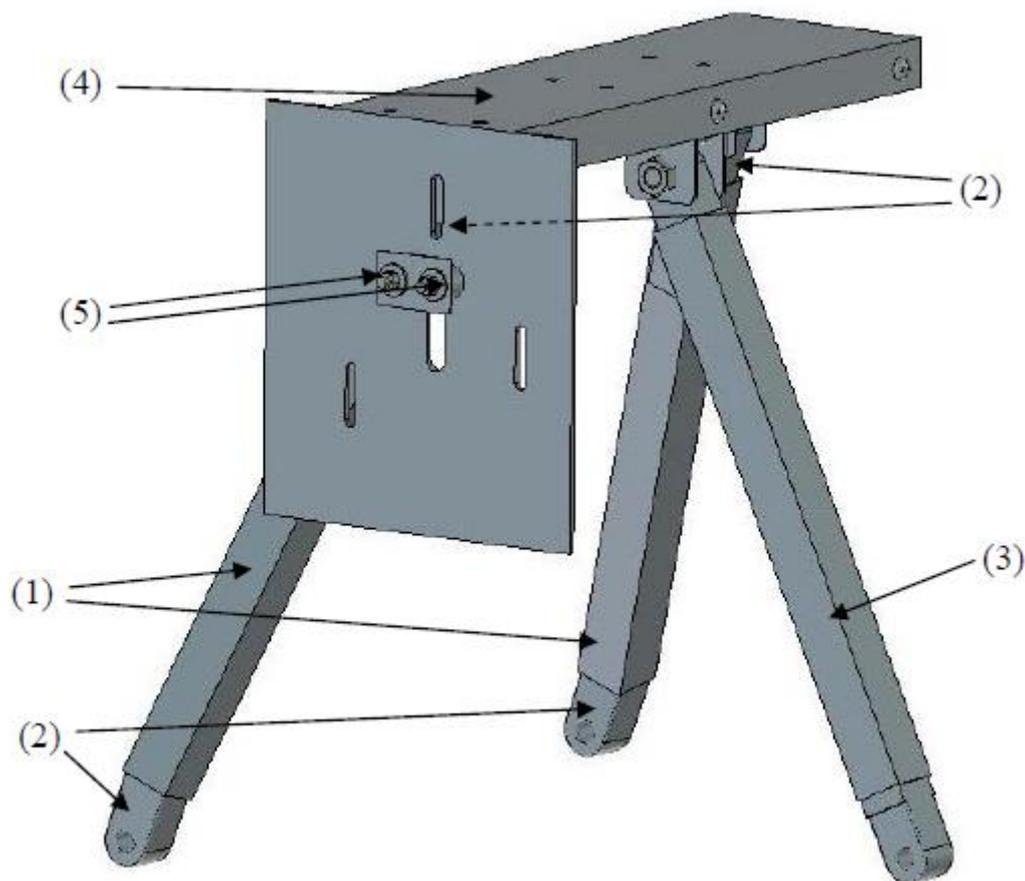


Рисунок 1.10 – Складна підставка для антени,

(1) ніжки встановлені під кутом 14° , (2) тримачі ніжок 14° , (3) пряма ніжка, (4) верхня пластина та кронштейн двигуна, (5) натягувачі пасів

Завдяки цій конструкції досягнуто високої стабільності та мобільності. Перед складанням потрібно зняти лише верхній болт, що тримає одну ніжку сторону. Щоб досягти максимальної стабільності, дві ніжки, встановлені з однієї сторони (1), були встановлені під кутом для збільшення бічної стійкості. Щоб зробити це можливим і в той же час зберегти складність підставки, «тримачі ніжок» (2) повинні були бути відфрезеровані під відповідним кутом, під яким були встановлені ніжки (у цьому випадку 14°), також рис. 1.11 для кращого огляду тримачів для ніг.

Оскільки ніжки встановлені на різній відстані від центру диска, довжина ніжок повинна бути різною, щоб утримувати верхню частину пристрою горизонтально. Довжина ніжок була приблизно розрахована з використанням базової геометрії, але її довелося трохи скоригувати під час складання.

Кінцева довжина ніжок становить 299 мм для двох ніжок, встановлених на кутку (1), і 282 мм для однієї ніжки (3).

У верхньому кінці використовувався той самий спосіб кріплення ніжок, що й у нижньому. Щоб отримати міцну і легку основу для верхньої частини, використовувався алюмінієвий профіль. Оскільки профіль було важко намалювати в IronCAD, була виготовлена спрощена модель профілю; це можна побачити на рис. 1.12. В якості основи верхньої частини був обраний профіль завдяки своїй міцності і невеликій вазі.

Щоб на профіль можна було кріпити речі, навколо нього склали алюмінієвий лист. Цей лист також працює як верхній кронштейн двигуна, див. (4) на рис. 1.10.

Маленькі кулькові підшипники (5) на малюнку 3.9 працюють як натягувачі ременів для пасової передачі, яка забезпечує вертикальний рух. Без цих натягувачів поверхня між ременем і малим приводним шківом була б занадто малою, і ремінь зісковзував би. Але з натягувачами на місці пробуксовування взагалі не було.

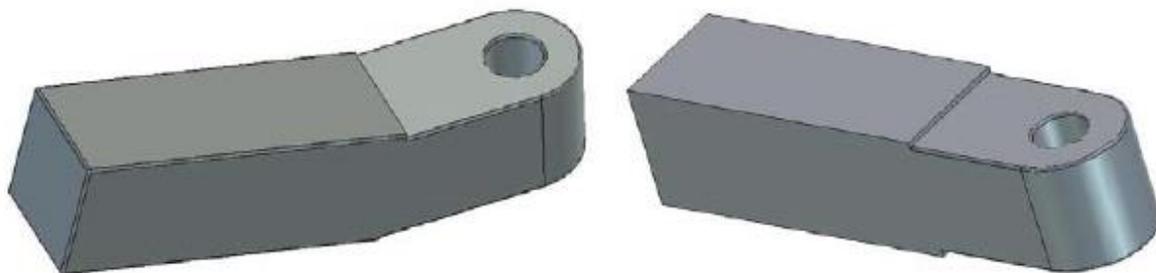


Рисунок 1.11 – Тримачі ніжок. Зліва: кут 14 градусів. Справа: прямо

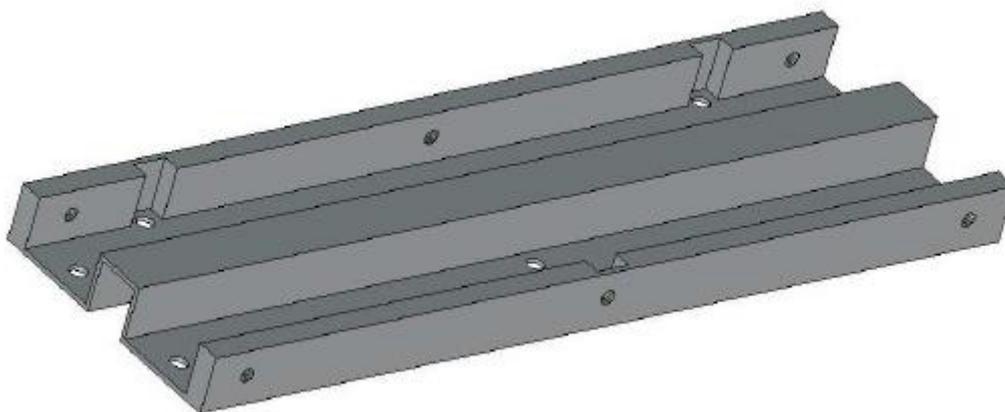


Рисунок 1.12 – Профіль, що складає основу верхньої частини

1.2.4 Драйвер верхньої антени

Щоб змусити антену рухатися у вертикальній площині, було розроблено рішення, показане на рис 1.13.

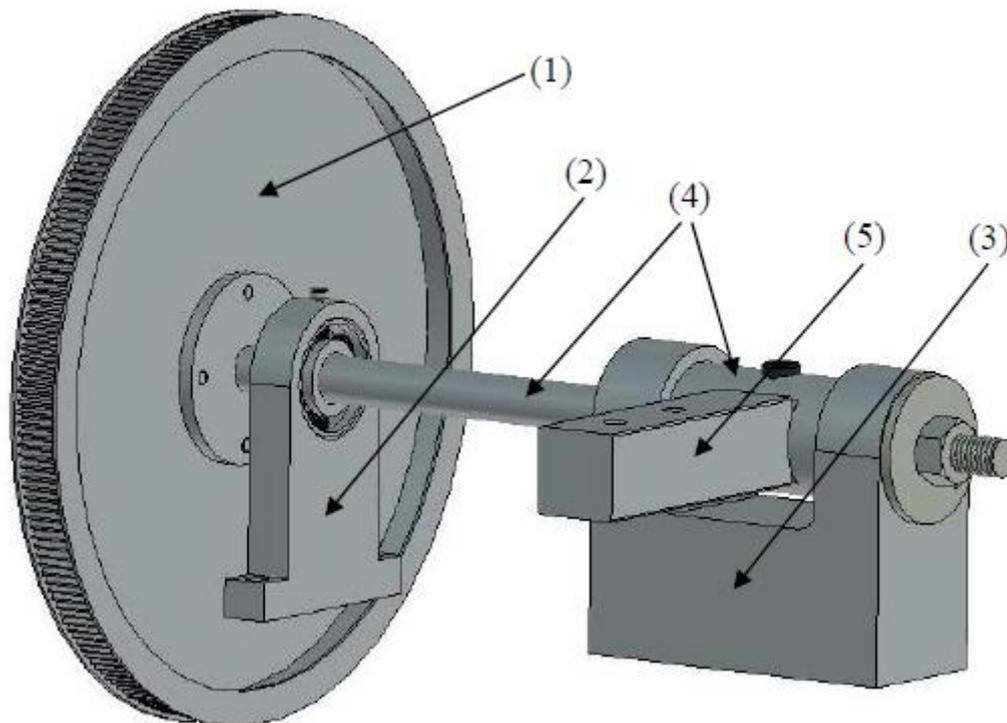


Рисунок 1.13 – Верхній привід,
 (1) велика шестерня, (2) малий підшипник, (3) великий підшипник, (4)
 обертовий вал, (5) адаптер антенної штанги

Щоб забезпечити можливість згортання при встановленому двигуні, двигун було встановлено з правого боку підставки антени. Для обертання антени навколо центральної несучої камери використовувався пасовий привід.

Верхня велика шестерня (1) на рис. 1.13 була знайдена в майстерні ECSE вздовж більшості деталей цього проекту; має діаметр 180 мм. Менша шестерня, яка прикріплена до вихідної осі коробки передач двигунів, на щастя, також була знайдена серед деталей, що залишилися в майстерні, і має діаметр 13 мм (не показано на рис 1.13). Це дає передачу 13,85.

Корпуси підшипників (2) і (3) на рис. 1.13 були виточені з масивного алюмінію в майстерні ECSE Ентоні «Тоні» Бросінські. Отвори у більшому корпусі підшипників (праворуч на рис. 1.14) були зроблені для запресовування кулькових підшипників для найкращої стабільності. Отвір у меншому корпусі підшипника було трохи більше, щоб його було легше розбирати та складати.

Обертний вал (4) на рис. 1.13 (також показаний на рис. 1.15) був виточений і відфрезерований зі сталі, щоб витримувати сили, яким він буде піддаватися. Отвір ліворуч на малюнку 1.15 — це конічний отвір, який використовується для затягування великої шестерні на валу. Відповідний отвір знаходиться на зовнішній шайбі, що утримує велику шестерню. Через ці отвори вбивали конусоподібний клин, щоб позбутися будь-якої слабчини.

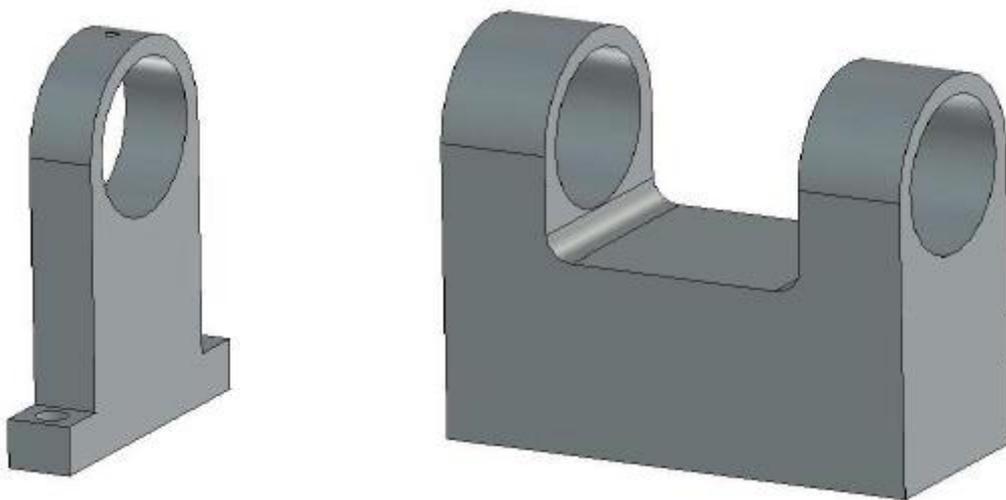


Рисунок 1.14 – Верхні опорні будови



Рисунок 1.15 – Обертовий вал, без і з слухами

1.2.5 Стріла антени

Щоб мати можливість відкалібрувати відстань від фокусної точки відбиваючої дискової антени до фідерних антен, штанга, яка утримує фідерні антени, має бути регульованою, а також кронштейни, які утримують фідерні антени.

Квадратну алюмінієву трубу (1) на рис. 1.16 (такого ж типу, що використовувався в опорах) використовували як основу для конструкції стріли; він щільно прилягає до адаптера стріли, (5) на малюнку 3.12, одним кінцем, а інший кінець з'єднується з зовнішньою пластиковою частиною стріли. Сталевий кронштейн під кутом 90° (2) на рис. 1.16 використовувався для підключення диска відбивача до штанги антени.

Щоб уникнути перешкод у діаграмі спрямованості навколо детектуючих фідерних антен, зовнішні частини штанги були виготовлені з пластику. Пластикові труби були використані для формування останньої частини штанги антени, яка також регулюється по довжині. Хрест був виготовлений із пластикових стрижнів, які вклеєні в отвори, просвердлені через зовнішню пластикову трубу.

На рис. 1.17 можна побачити частину, яка з'єднує стрілу (з відбивачем і противагою) з обертовим валом, яку ми називаємо адаптером стріли. Він

виготовлений із сталі з дуже високою точністю, щоб уникнути провисання між обертовим валом і стрілою. Круглу форму кінця адаптера було обрано, оскільки круглі форми легше зробити з більшою точністю, ніж квадратні.

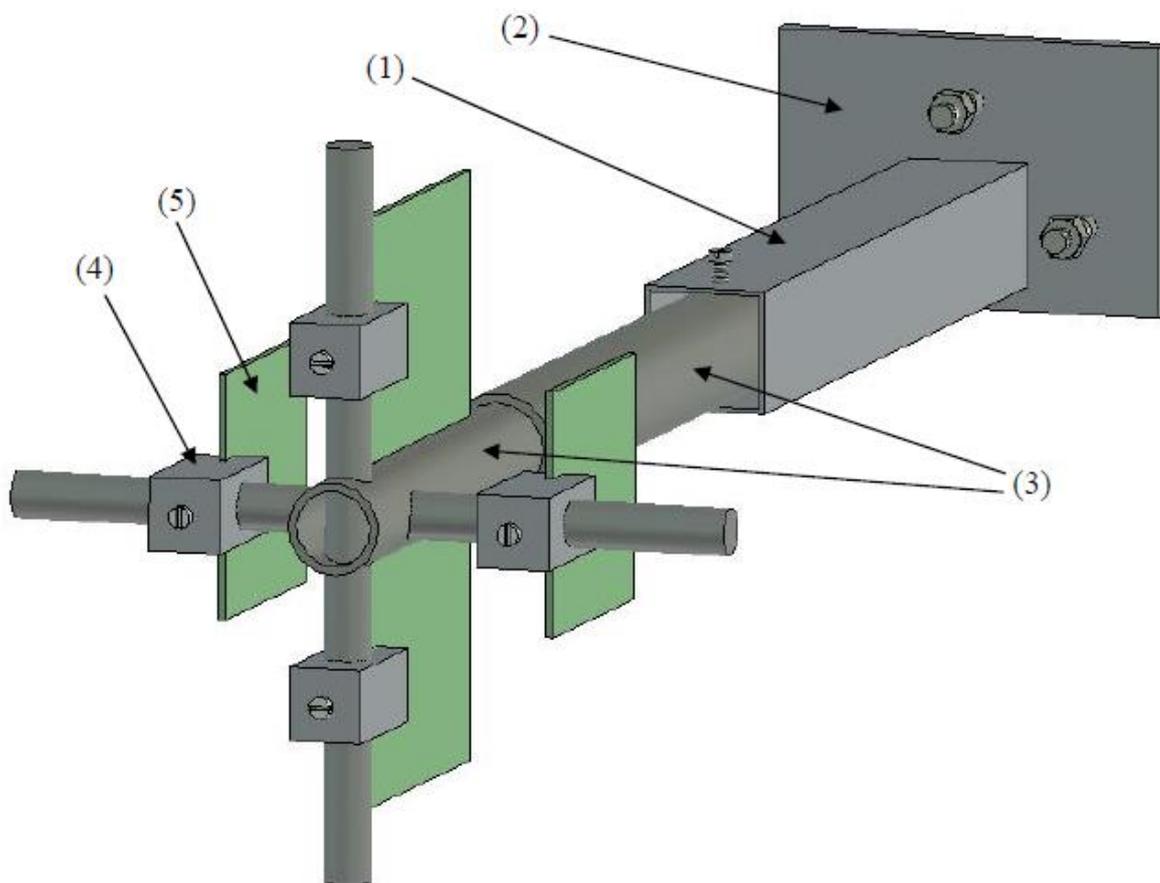


Рисунок 1.16 – Антена в зібраному вигляді.

(1): квадратна алюмінієва стріла, (2): сталевий дисковий кронштейн відбивача,
(3): пластикова частина штанги антени, (4): кронштейн Yagi, (5): антена Yagi

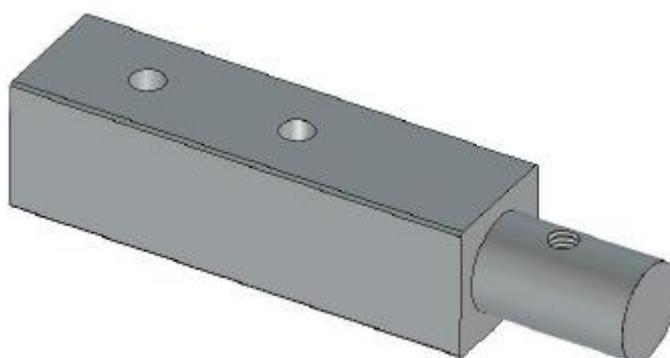


Рисунок 1.17 – Адаптер антенної штанги

1.2.5 Протывага

Щоб врівноважити вагу рефлекторного диска і антенної штанги, була сконструйована протывага. Причиною цього було зменшення натягу приводного ременя та крутного моменту, який має подолати вертикальний двигун, щоб повернути антену.

Оскільки антена повинна мати можливість рухатися на 180° у вертикальній площині, для задоволення цієї потреби була виготовлена спеціальна конструкція. Конструкцію можна побачити на рис. 1.18. З двома окремими руками, які тримають гирі, третя нога (3) на рис. 1.10 пройде між двома руками, і можна здійснити рух на 180° .

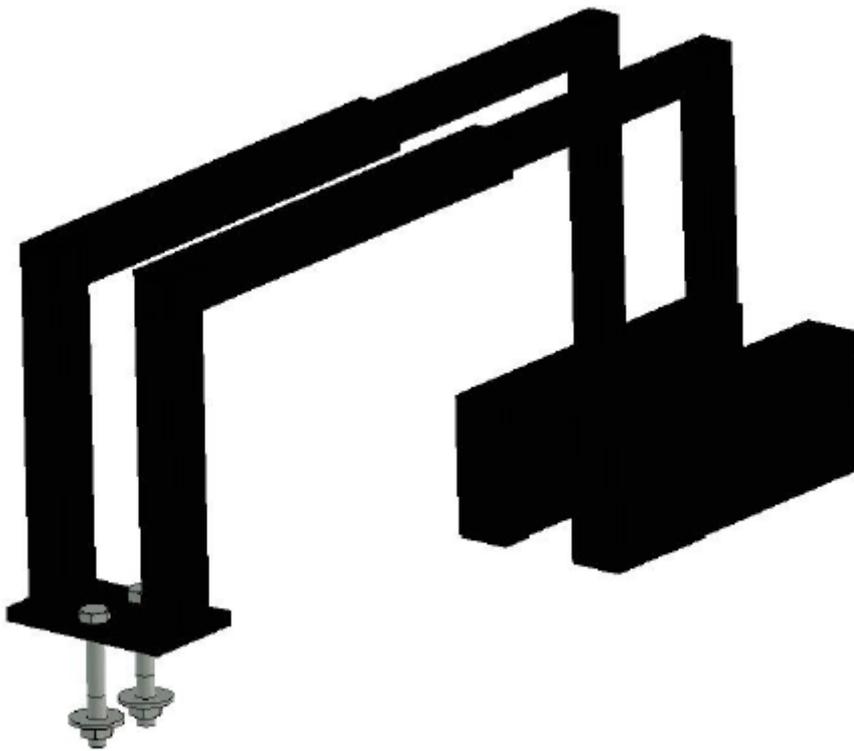


Рисунок 1.18 – Протывага

2 МЕТОДИКА РОБОТИ ЕЛЕКТРОННОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ ВІДСТЕЖЕННЯ

Метою загальної системи було збереження стабільного зв'язку між БПЛА та землею. БПЛА оснащений передавачем, який передає відеосигнал з несучою хвилею на частоті 2,41 ГГц. Антена приймача з такими ж частотними характеристиками була розміщена на землі. Сигнал був прийнятий і демодульований таким чином, що кінцевий вихідний сигнал був чітким аналоговим відеосигналом.

2.1 Антена приймача

Через низьку потужність випромінювання передавача рефлекторна антена на кінці прийому є хорошим варіантом. Антенною для проекту була обрана рефлекторна дискова антена від Hills Industries. Це двонаправлена антена, яку можна використовувати як для передачі, так і для прийому (рис.2.1).



Рисунок 2.1 – Рефлекторна сітчаста антена від Hills Industries

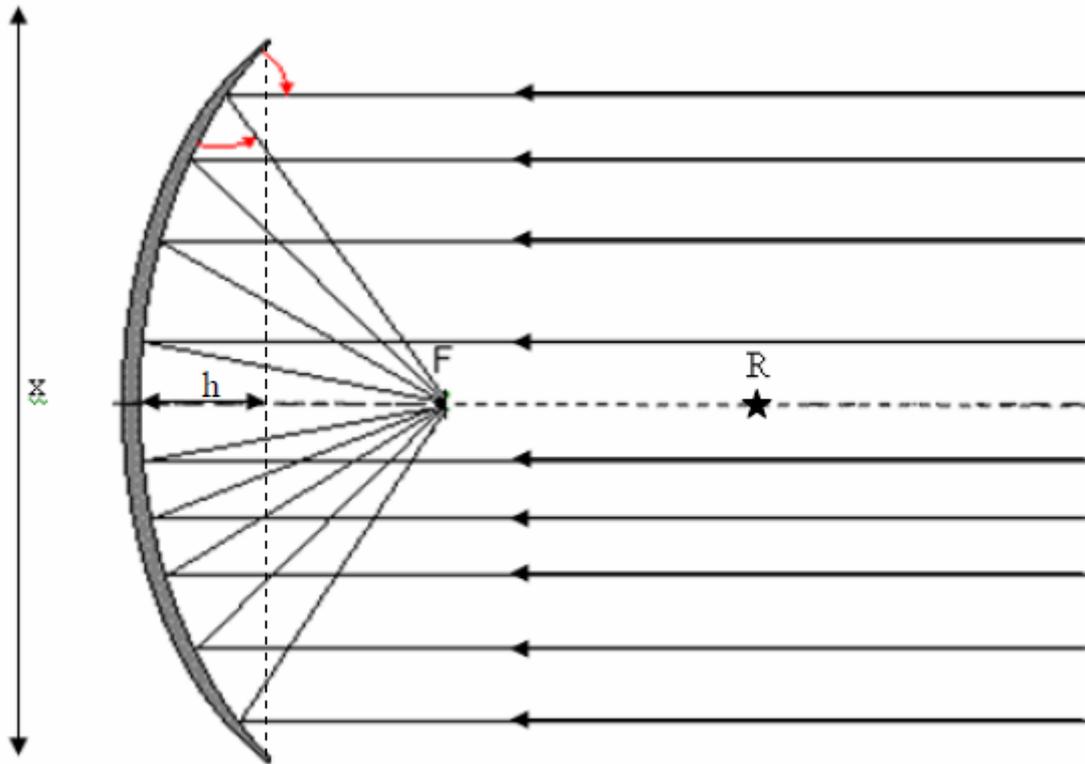


Рисунок 2.2 – Рефлекторний промінь

Рефлекторна антена дає високе посилення за рахунок агрегації вхідних сигналів у фокусі (рис.2.2).

Для знаходження фокусної точки рефлекторної антени Hills Grid використовувалася формула 2.1 [1]. Це формула для обчислення радіуса сегмента кола, і цей рефлекторний диск можна побачити так. Що в цьому випадку відповідають x , h і R , можна побачити на рис. 2.2. Розміри антени Hills Grid становлять $x = 860$ мм і $h = 123$ мм. З цими розмірами радіус був розрахований до 813 мм. Як видно на рис. 4.2, фокусна точка розташована посередині між диском відбивача та центром «кола» (R).

$$h(2R - h) = \left(\frac{x}{2}\right)^2 \quad (2.1)$$

$$R = \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^2}{2 \cdot h} + \frac{h}{2}$$

$$R = \frac{\left(\frac{860}{2}\right)^2}{2 \cdot 123} + \frac{123}{2} = 813 \text{ мм}$$

$$F = \frac{R}{2} \approx 406\text{мм}$$

Цю відстань було перевірено шляхом встановлення антени в безеховій камері та розміщення антени передавача на відстані 4 метрів попереду та на тій самій висоті, щоб отримати рівень хвилі між двома антенами. Просунувши маленьку антену Yagi уздовж антенної штанги, ми спостерігали, де приймався найсильніший сигнал. Він опинився на відстані 400 мм від диска. Це дещо відрізняється від математично розрахованої фокусної точки, але це можна пояснити незначними похибками вимірювання або невеликим перекосом у диску відбивача. Нарешті, це була відстань від диска, де були встановлені приймальні антени Yagi.

Коли фокусна точка відома, можна виміряти діаграму спрямованості для диска відбивача. Рефлекторна антена була встановлена на ротаторі, який обертав антену на 360° навколо власної осі. Коли антена обертається, потужність отриманого сигналу змінюється. На кожному градусі потужність сигналу вимірюється та зберігається в комп'ютері. Процедуру проводили двічі, щоб отримати як горизонтальну, так і вертикальну площину діаграми спрямованості. Передавальна антена мала посилення -10 дБ, а рівень джерела сигналу становив 0 дБм. Коли всі дані були отримані, вони були надруковані на полярному графіку в MatLab (рис.2.3).

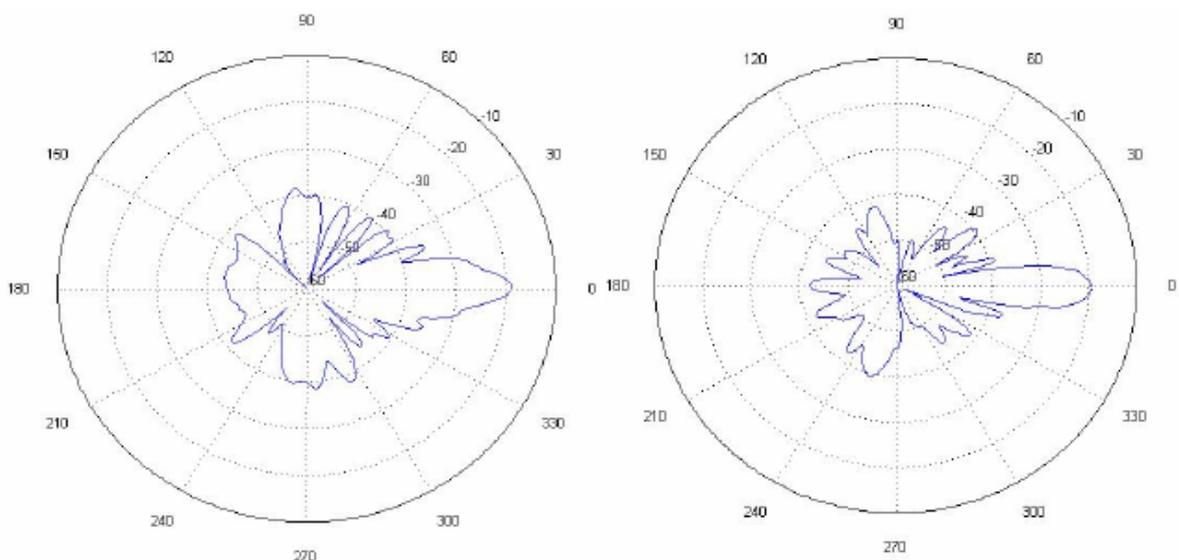


Рисунок 2.3 – Діаграма спрямованості антени (Зліва: Н-площина, справа: Е-площина)

Вказане посилення від Hills Industries становить 23,5 дБі, що означає, що його посилення становить 23,5 дБ порівняно з ізотропною антеною (підсилення 0 дБ). Ізотропна антена — це антена, яка випромінює однакову потужність у всіх напрямках (симетрична). У нашому випадку коефіцієнт посилення антени та напрямки енергії спрямовані до/від точки фокусу. Діаграма спрямованості показує спрямованість диска рефлектора (рис. 2.3). Ширина променя апертури антени дуже вузька через високий коефіцієнт посилення/спрямованості. Класифікація ширини променя полягає в тому, що потужність сигналу була ослаблена на 3 дБ з обох боків головної пелюстки (фокальної точки). Завдяки різним розмірам по горизонталі та вертикалі та тому факту, що фідерна антена була встановлена горизонтально, рефлекторний диск має різну ширину променя для горизонтальної та вертикальної площини. Виміряна ширина променя для рефлекторної антени становила:

Ширина горизонтального променя становить приблизно 8° (4° по обидві сторони від центральної пелюстки)

Ширина вертикального променя становить приблизно 10° (5° з обох боків від центральної пелюстки)

Щоб перевірити вказане посилення (23,5 дБі), встановили антену в безеховій камері з найбільшою спрямованістю в горизонтальній площині в бік передавальної рупорної антени. Щоб довести це, ми використали формулу Фрііса, виражену в дБм, відому з [2][3]:

$$P_R(\text{dBm})=P_T(\text{dBm})+G_T(\text{dB})+G_R(\text{dB})-20\log(r_{\text{km}})-20\log(f_{\text{MHz}})-32.44 \quad (2.2)$$

де P_R — отримана потужність, дБм;

P_T — передана потужність, дБм;

G_T — коефіцієнт посилення антени на передавачі, дБ;

G_R — коефіцієнт посилення нашої приймальної антени, дБ.

Останні частини – це втрати вільного простору для нашої заданої частоти та відстані, константа 32,44 призначена для виправлення використання одиниць,

відмінних від СІ, таких як км і МГц, і отримання результату в дБм. Маючи всі ці характеристики, відомі, ми могли виміряти та розрахувати коефіцієнт підсилення рефлекторного диска.

Коефіцієнт посилення передавальної рупорної антени G_T становив близько 10 дБ, а використовуваний сигнал передачі P_R становив 0 дБм. Відстань між антенами становила 4 метри, а частота – 2410 МГц. Вимірний прийнятий сигнал P_R становив -19,33 дБм. За формулою Фріса (2.2) посилення G_R диска відбивача становило 22,79 дБ. Причина, чому це трохи відрізняється від зазначеного посилення, здебільшого пов'язана з втратами кабелю від антени до аналізатора спектру, який вимірює сигнал.

2.2 Поширення сигналу

Мікрохвильовий сигнал, що передається від БПЛА, поширюється по-різному в залежності від навколишнього середовища. Щоб отримати стабільний зв'язок «точка-точка», між антенами не повинно бути жодних перешкод. Це було встановлено як умову, а максимальна відстань (R) до БПЛА становитиме 10 км. Маючи ці факти, ми можемо відкинути проблему з викривленням землі та припустити ідеальний зв'язок LOS (пряма видимість) між наземною антеною та БПЛА.

Антеною на БПЛА був звичайний диполь з потужністю передачі 10 мВт, що відповідає 10дБм. Оскільки підсилення диполя змінюється через сильніший підсилення в горизонтальній площині та майже відсутність випромінювання у вертикальній площині..

$$P_{\text{дБм}} = 10 \cdot \log\left(\frac{P}{1 \text{ mW}}\right)$$

$$P_{\text{дБм}} = 10 \cdot \log\left(\frac{10 \text{ mW}}{1 \text{ mW}}\right) = 10 \text{ dBm}$$

(2.3)

Коефіцієнт підсилення приймальної антени становив 22,79 дБ із нашим каналом Yagi у фокусній точці. Коли детектор потужності під'єднаноу таблиці даних, він має чутливість -63 дБм ($P_R = -63$ дБм). Маючи ці факти, ми можемо обчислити дальність зв'язку LOS, розв'язавши R за формулою 2.2.

$$20 \log(R) = P_T + G_T + G_R - P_R - 20 \log(f_{MHz}) - 32.44$$

2.3 Блок детектування сигналу

Це може бути найважливішою частиною проекту, оскільки решта системи залежить від виявлення правильного сигналу.

При розробці системи виявлення сигналу були враховані такі факти:

- визначення правильного сигналу 2,41 ГГц, який передається з БПЛА;
- зменшення втрат сигналу від антен Yagi;
- перетворення радіочастотних сигналів в напругу постійного струму для аналогового входу мікроконтролерів.
- розміщення фідерних антен для найкращої продуктивності.

Для цього були використані Yagi-антени для прийому сигналу 2,41 ГГц. Щоб зменшити ризик перешкоджання іншим сигналам правильному сигналу, антени були сконструйовані так, щоб мати досить вузьку смугу пропускання. Вузькосмугові фільтри також використовувалися для придушення заважаючих сигналів.

Щоб зменшити втрати та узгодити антени з живильними кабелями 50 Ом, необхідно було використовувати балуни. Останньою ланкою в цьому ланцюжку був радіочастотний детектор потужності, який перетворює радіочастотний сигнал в рівень постійної напруги.

2.3.1 Основи антени блоку детектування

Антени можуть мати багато різних форм і працювати по-різному, але їх об'єднує одне: усі вони вловлюють електромагнітні хвилі.

Електромагнітна хвиля складається з однієї електричної та однієї магнітної хвилі. Дві хвилі перпендикулярні одна до одної, як показано на рис. 2.4.

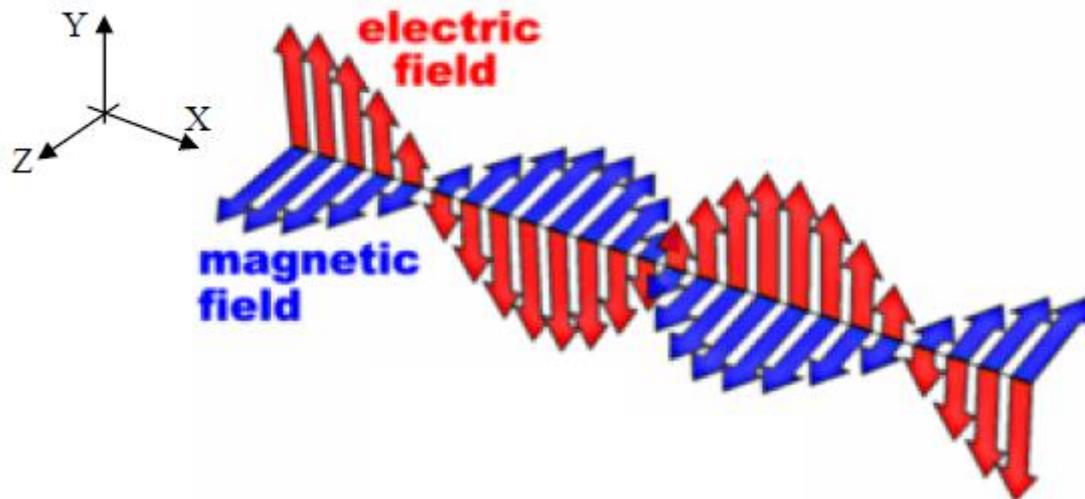


Рисунок 2.4 – Електромагнітна хвиля

На рис. 2.4 стрілки, спрямовані в напрямку y , відповідають електричній хвилі, а стрілки, спрямовані в напрямку z , відповідають магнітному полю, хвилі поширюються в напрямку x .

Існують антени, які використовують площину електричних хвиль для передачі та прийому сигналів, а також є антени, які використовують площину магнітних хвиль. Нижче наведено короткий опис електричного диполя 75 Ом.

Електричний диполь є однією з найпростіших антен, як вказано з назви, це антена, яка працює в площині електричних хвиль, яку часто називають E -площиною. Рисунок 2.5 описує основи такої антени. Оскільки струм змінюється в дипольному елементі, електромагнітні хвилі поширюються навколо нього в площині x - y , електричні хвилі узгоджуються з диполем, а магнітні хвилі перпендикулярні до диполя, а електричні хвилі .

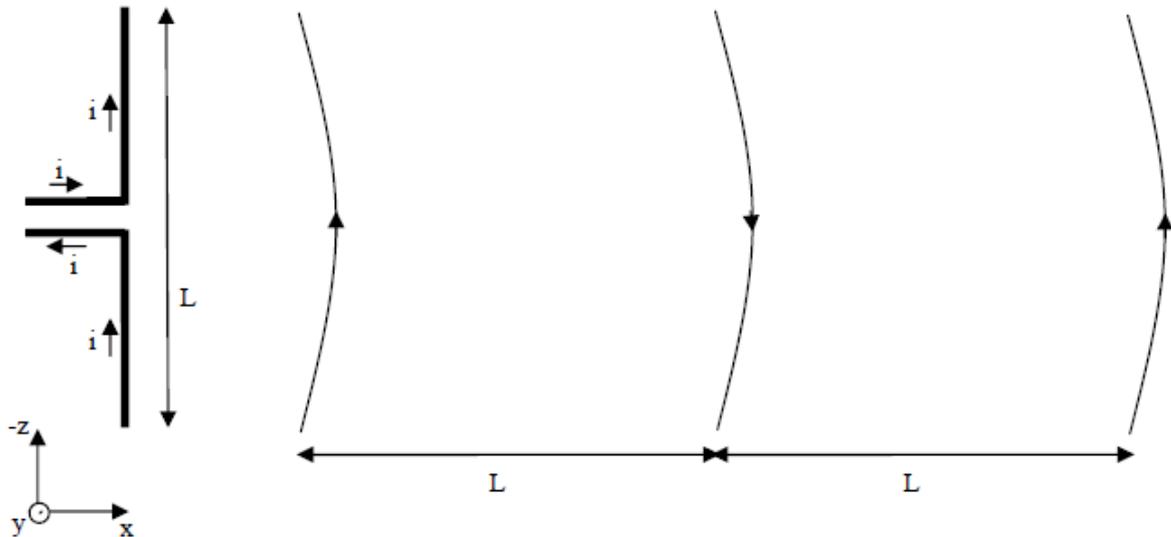


Рисунок 2.5 – Дипольне поширення електричної хвилі

Залежно від форми антени різняться її здатність приймати або передавати хвилі в різних напрямках. Це явище називається діаграмою спрямованості. Подібний вище диполь випромінює хвилі з однаковою потужністю навколо диполя (навколо осі z), але вздовж осі z він взагалі не випромінює (теоретично). На рис. 2.6 показано три графіки, взяті з програмного забезпечення моделювання SuperNEC10; вони показують діаграму спрямованості електричного диполя.

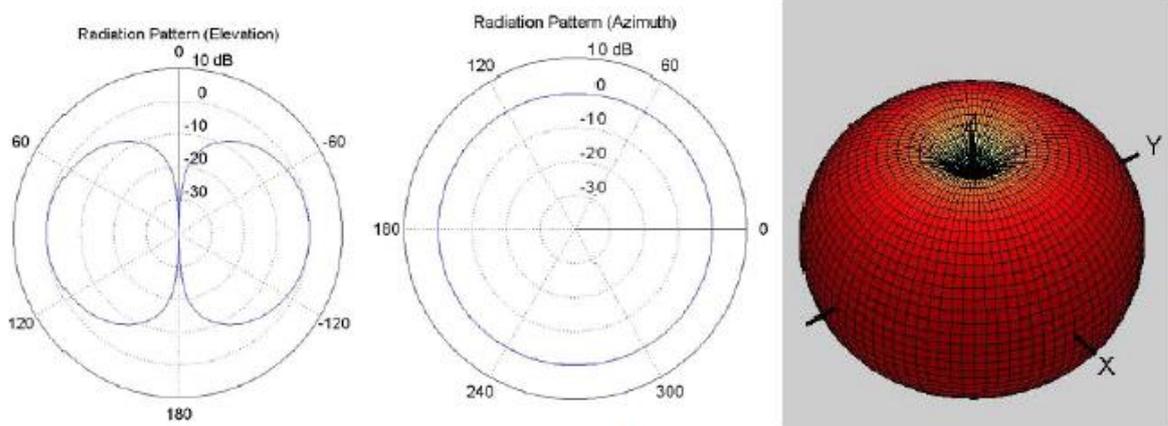


Рисунок 2.6 – Дипольні діаграми спрямованості

Як видно на рис. 2.6, діаграма спрямованості є всенаправленою в площині x - y , більш відомої як H -площина або азимутальна площина, і симетрична в x - z , E -площині або площині місця. Площина азимута та кута місця іноді може бути

поганим вибором для виклику площин, оскільки вони залежать від того, як встановлено антену.

Довжина дипольного елемента повинна бути приблизно половиною довжини хвилі частоти передачі або прийому.

2.3.2 Антени сенсора рівня сигналу

Фідерні антени, що використовуються в цьому проекті, мають тип Yagi-Uda. Антену Яги-Уда можна охарактеризувати як посилений диполь. Один керований елемент (диполь) і один або більше пасивних елементів вирівняні, щоб утворити антену Yagi. Вирівнявши елементи, можна змінити діаграму спрямованості та досягти більшої спрямованості.

Довжина елементів різна: рефлектор повинен бути трохи довшим веденого елемента, а директори трохи коротші. Довжини елементів зазвичай знаходяться в такому діапазоні [3]:

- відбивач: $0,49\lambda$,
- ведений елемент: $0,46\lambda$,
- директори: $0,44\lambda$,

де λ — довжина хвилі.

Це лише ознаки, їх можна і потрібно налаштувати для кращої продуктивності. Відстань між елементами - це частина, де встановлюється більшість характеристик антени. Зазвичай відстані між елементами дорівнюють $0,1\lambda$ до $0,25\lambda$, але, як і у випадку з довжиною елементів, це лише вказівки.

У системі антени Yagi будуть використовуватися як приймальні фідерні антени, і тому потрібно забезпечити ширину променя (кут, під яким діаграма спрямованості зменшується на 3 дБ від максимальної точки) приблизно 110° у H-площині та 80° в площині E. Чому ці пропорції вибрано в першу чергу для відповідності відносним розмірам рефлекторної антени. Антени Yagi повинні отримувати лише відбитий сигнал від рефлекторного диска, а не інші оточуючі сигнали поза диском. Фідерні антени також потребують переднього та заднього

співвідношення принаймні 10 дБ, щоб стримувати джерела сигналу з неправильного напрямку. Після деяких випробувань ми зрозуміли, що нам потрібна 3- або 4-елементна антена Yagi для досягнення відповідної діаграми спрямованості.

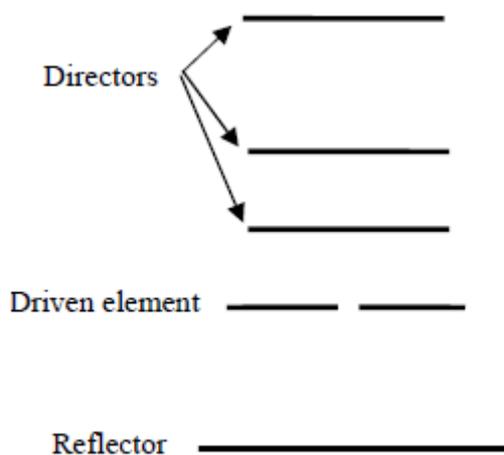


Рисунок 2.7 – Модель Yagi

2.3.3 Моделювання антени

Під час проектування антени програми моделювання дуже корисні для спрощення процесу розробки. Найвідомішою програмою та основою багатьох інших програм для моделювання є NEC [11]. У процесі розробки було протестовано багато різних версій програм NEC, напр. 4nec2, Expert MiniNEC і SuperNEC. Після кількох випробувань цих програм SuperNEC виявилася найкращою для цієї програми та була використана для моделювання кінцевої антени.

SuperNEC розроблено компанією Poyniting Software (Pty) Ltd. у Південній Африці та працює як доповнення до Mathworks MatLab. Це не безкоштовна програма, але існує обмежена версія для студентів.

Середовище в SuperNEC дуже зручне для користувачів і з ним легко працювати. На рис. 2.8 показано дамп екрана головного вікна, де розроблено антени.

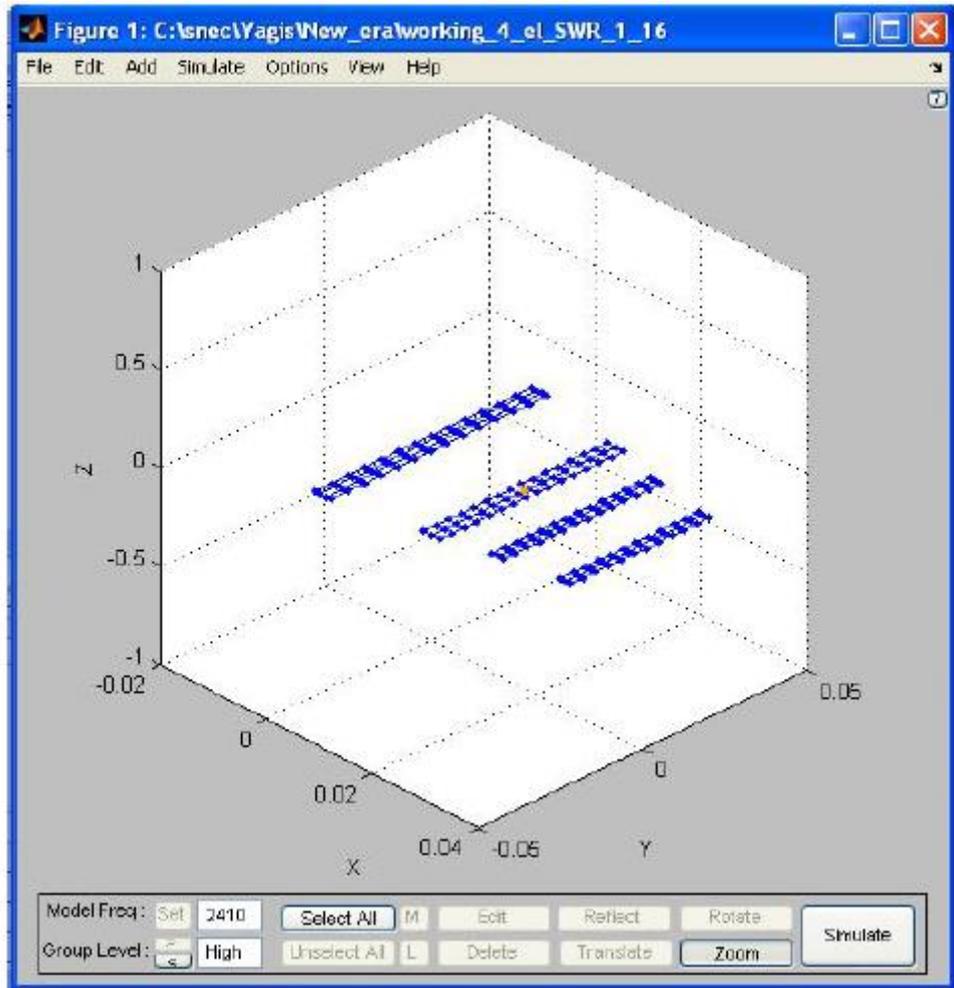


Рисунок 2.8 – SuperNEC, програмне забезпечення моделювання антени

Один зі способів, і, можливо, також найпростіший, побудувати антену Yagi для понад 1 ГГц (де довжина хвилі коротка) - це зробити її на PCB[12]. Це потрібно було взяти до розрахунку під час моделювання. Тому антена на рис. 2.8 виглядає трохи дивно. Ширина (а не довжина) елемента не сильно впливає на діаграму спрямованості антени, але впливає на електричні характеристики антени, які також можна змоделювати в SuperNEC.

Після моделювання були отримані результати, показані на рис. 2.9.

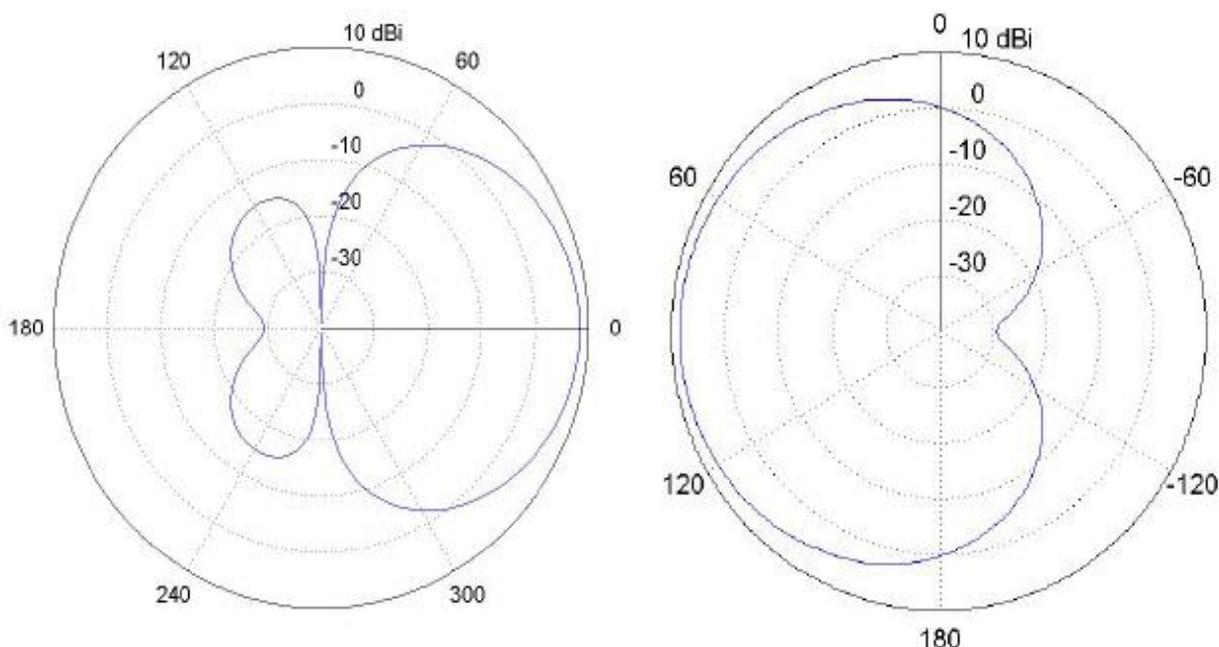


Рисунок 2.9 – Змодельована діаграма спрямованості випромінювання Yagi (Е-площина ліворуч)

2.3.4 Перехід на плату друкованої плати FR4

Після того, як було знайдено низхідну модель антени з діаграмою спрямованості, яка відповідала специфікаціям, антену було побудовано з використанням мідної стрічки на скловолоконних платах FR4, що є тим самим матеріалом, який дуже часто використовується у звичайних друкованих платах.

Оскільки довжина електромагнітної хвилі змінюється в різних матеріалах через різні діелектричні константи, як-от плита FR4 і повітря. Елементи антени потрібно було налаштувати відповідно до вільного простору (що використовувалося в симуляції SuperNEC). Після багатьох випробувань і розрізання мідної стрічки було зроблено висновок, що довжина хвилі на поверхні плати FR4 товщиною 1,59 мм становить приблизно 73 % довжини хвилі вільного простору. Це означає, що елементи антени повинні складати 73% довжини, яка використовувалася в програмному забезпеченні моделювання.

Коли було знайдено потрібну довжину елементів Yagi і змодельовані результати добре відповідали нашій мідній антені Yagi, чотири антени були відфрезеровані на станку для друкованих плат.

2.4 Балуни

Балун використовується для балансування з'єднання між симетричним портом і незбалансованим портом, напр. між антеною та живильним кабелем. У нашому випадку основною функцією балунів є симетричний розподіл зарядів уздовж веденого елемента для досягнення симетричної діаграми спрямованості та підвищення ефективності. Це також допомагає уникнути випромінювання радіочастотних сигналів із кабелю та підтримує стабільний рівень SWR незалежно від довжини кабелю та об'єктів поблизу антени.

Балуни можна побудувати різними способами. Два типи балунів, які відносно легко реалізувати на цій частоті, - балун і мікросмужковий балун. Це також два типи, які були протестовані та оцінені.

На рис. 2.10 показано, як електричний струм рухається в кінці коаксіального кабелю без балуна. Як видно на рис. 2.10, i_1 рухається вгору і вниз по внутрішньому провіднику, а i_2 вгору і вниз по внутрішній частині (через скін-ефект) рукава. Але в точці, де i_2 має передаватися на дипольний елемент, струм також витікає назовні гільзи. Це викликає відмінності розподілу струму в дипольних елементах, що погано впливає на діаграму спрямованості (стає несиметричною).

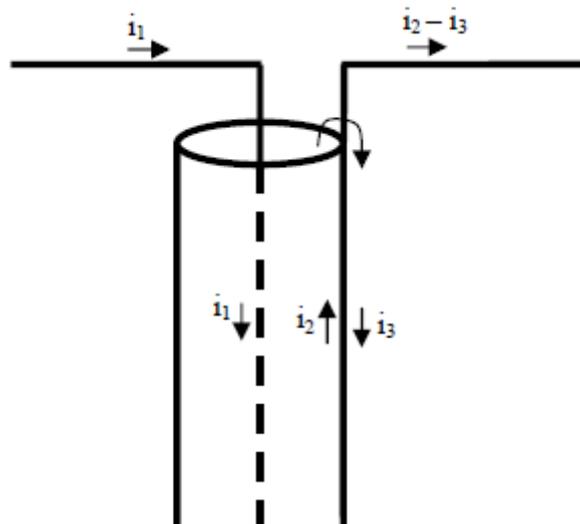


Рисунок 2.10 – Коаксіальний кабель з дипольною антеною

2.4.1 Балун Базука

Щоб уникнути цього, для зупинки i_3 використовується балун. Часто використовуваним балуном на частотах діапазону VHF[15] і вище є так званий балун або балун-гільза.

Цей тип балуна складається з додаткової гільзи, розташованої на зовнішній стороні коаксіального кабелю, як показано на рис. 2.11. Довжина цієї гільзи повинна становити чверть довжини хвилі в матеріалі зовнішнього ізолятора в коаксіальному кабелі. Це може бути важко дізнатися, але хорошим значенням для початку є -75 % чверті довжини хвилі вільного простору. Нижня частина гільзи повинна бути з'єднана з внутрішньою гільзою на чверть довжини хвилі від кінця кабелю. На кінці кабелю і базуки не повинно бути з'єднання. Зробивши це, потенціал у зовнішньому та внутрішньому рукавах з часом буде однаковим. І, отже, струм витoku i_3 більше не буде існувати або принаймні буде дуже малим.

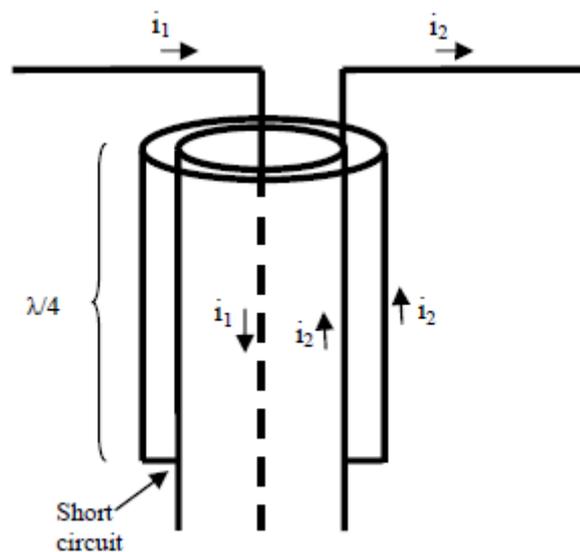


Рисунок 2.11 – Балун Базука

2.4.2 Мікросмушкові балуни

Існує багато різних компонувань мікросмушкових балунів, деякі з них були протестовані під час розробки з різними результатами. Щоб мати можливість розробити подібний балун, на платі повинні бути використані лінії передачі 50 Ом,

щоб уникнути відбиття та втрат. Найбільш звичайним способом створення хвилеводу 50 Ом є створення мікросмужкової лінії на платі з «нескінченною» площиною заземлення (див. рис. 2.12). Але це було неможливо в даному випадку, коли антена була б розташована на одній платі.

Щоб створити смужкову лінію 50 Ом без великої площини заземлення, можна скористатися схемою, зображеною на рис. 2.12, але виконайте розрахунки з подвійною товщиною плати, на якій вона буде створена. Це відповідатиме мікросмузі на рис. 2.13.

Використовуючи цей тип мікросмужки, проблему лінії передачі 50 Ом було вирішено. Компоновку першого випробуваного мікросмужкового балуна можна побачити на рис. 2.14.

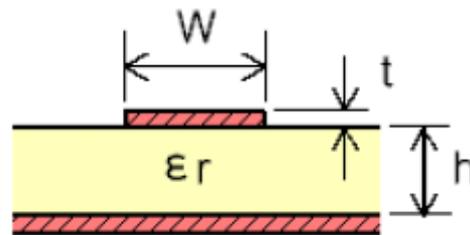


Рисунок 2.12 – Мікросмужкова лінія з нескінченною площиною заземлення

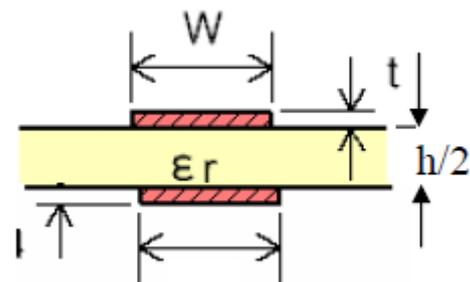


Рисунок 2.13 – Мікросмужкова лінія, ширина площі заземлення дорівнює ширині смужкової лінії

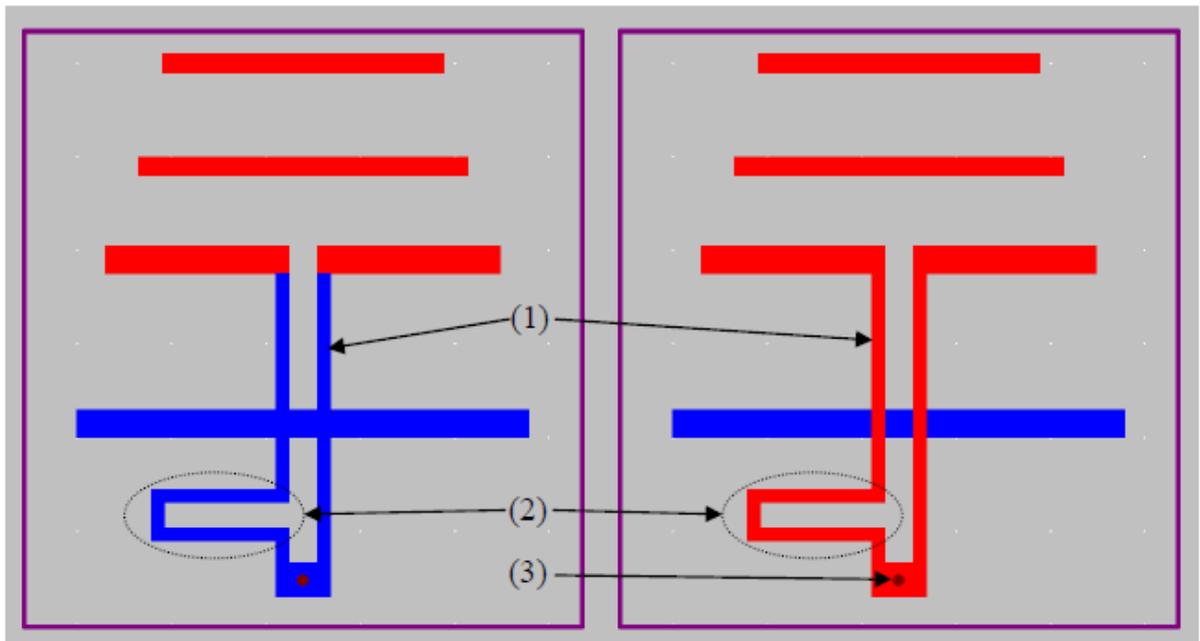


Рисунок 2.14 – Антена з мікросмужковим балуном 1. Синій – верхній шар, червоний – нижній шар (1) мікросмужкова лінія, (2) балун, (3) точка живлення

Темніші (сині) частини цієї антенни/балуна є нижнім шаром друкованої плати, а яскравіші (червоні) частини — верхнім шаром. Ідея подібного балуна полягає у використанні лише внутрішнього провідника коаксіального кабелю для живлення керованого елемента. Екран підключений до нижнього шару плати і працює як заземлювач. Балун у цій схемі має довжину половини довжини хвилі, що призводить до того, що сигнал у лівій частині диполя буде затримуватись на половину довжини хвилі. Ця компоновка працювала тихо, щоб підтримувати КСХ на стабільно низькому рівні, але на діаграму спрямованості це вплинуло погано, а також загасання в мікросмужкових лініях було занадто високим. Тож це був невдалий варіант.

Подібна версія балуна цього типу, показана на рис. 2.15, також була протестована, основна відмінність від балуна, описаного вище, полягає в тому, що мікросмужкові лінії вкорочені або фактично видалені. Це допомагає позбутися втрат, спричинених мікросмужковими лініями. Ця схема працювала краще, ніж наведена вище (але не дуже добре) щодо діаграми спрямованості та втрат, але КСХ був дуже чутливим до близько розташованих об'єктів.

Інші компоновання та типи мікросмужкових балунів також були протестовані, але без хороших результатів.

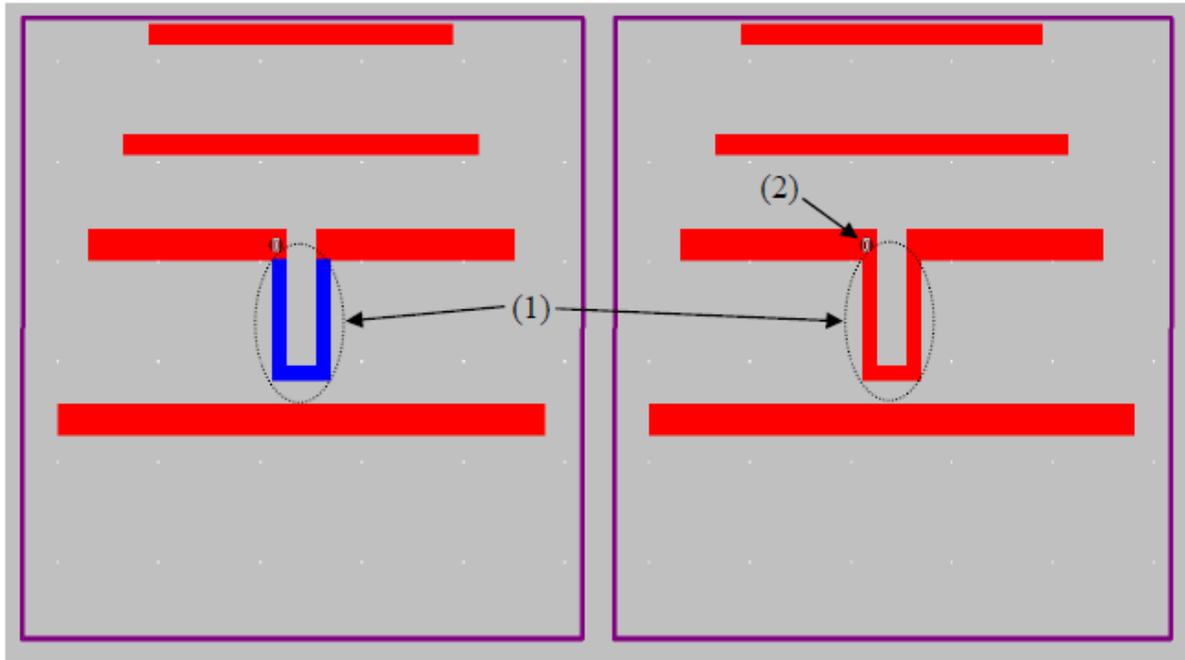


Рисунок 2.15 – Розташування антени, балун 2. Синій верхній шар, червоний нижній шар. (1) Балун, (2) Точка живлення

Балун, який працював найкраще з описаних вище, був типу «базука» або «рукав». З цим балуном. КСХ утримувалися на стабільному рівні близько 1,2, що відповідало специфікаціям, див. Додаток А для графіків Network Analyzer [16]. Ці виміряні значення КСХ, на жаль, не є КСХ антен, оскільки коаксіальні кабелі, що з'єднують їх, мають втрати. Втрати в кабелі були виміряні за допомогою мережевого аналізатора шляхом підключення шматка кабелю між портами один і два на аналізаторі, а потім виміряні втрати на S12 (між портами 1 і 2). З довжиною кабелю близько 250 мм демпфування становило 0,8 дБ на частоті 2410 МГц. Довжина кабелю, який з'єднує антени з детекторами потужності, приблизно в три рази більша, що означає, що втрата в кожному кабелі становить 2,4 дБ. Коли КСХ вимірюється за допомогою мережевого аналізатора, сигнали повинні проходити "вгору-вниз" по кабелю, тому сигнал проходить 1500 мм ($6 * 250$ мм). Це означає, що втрати, які потрібно взяти до розрахунку, становлять 4,8 дБ ($6 * 0,8$ дБ), що

відповідає втраті 2/3 потужності сигналу. (Використані кабелі не підходять для цих частот, але це були єдині кабелі, які були в наявності при проектуванні) .

Для розрахунку реального КСВ. використовувалися формули 2.4 і 2.5 [3].

$$|\rho_{\text{measured}}| = \frac{\text{SWR} - 1}{\text{SWR} + 1} \quad (2.4)$$

$$\rho_{\text{real}}^2 \cdot (1 - \text{loss}) = \rho_{\text{measured}}^2 \quad (2.5)$$

При вимірюваному КСХ зі значенням 1,2, КСХ антени без втрат у кабелі виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned} |\rho_{\text{measured}}| &= \frac{\text{SWR} - 1}{\text{SWR} + 1} = \frac{1.2 - 1}{1.2 + 1} = \frac{0.2}{2.2} = 0.09 \\ \rho_{\text{measured}}^2 &= 0.09^2 = 0.0081 \\ \text{loss} &= \frac{2}{3} \\ \rho_{\text{real}}^2 &= 3 \cdot 0.0081 = 0.024 \\ \rho_{\text{real}} &\approx 0.155 \\ \text{SWR}_{\text{antenna}} &= \frac{1 + 0.155}{1 - 0.155} = 1.37 \end{aligned}$$

При КСХ 1,37 характеристики антени були виконані. Також була покращена діаграма спрямованості антени. Одна дивина в Е-площині сталася приблизно на 225 градусах (див. рис. 2.16); це може залежати від коаксіального кабелю, який заважає діаграмі спрямованості, або певної асиметрії в антені. На жаль, співвідношення передньої та задньої сторони не є однаковим (але повинно бути) на цих рисунках, це пов'язано з тим, що передавальна антена не була точно вирівняна з нашою антеною.

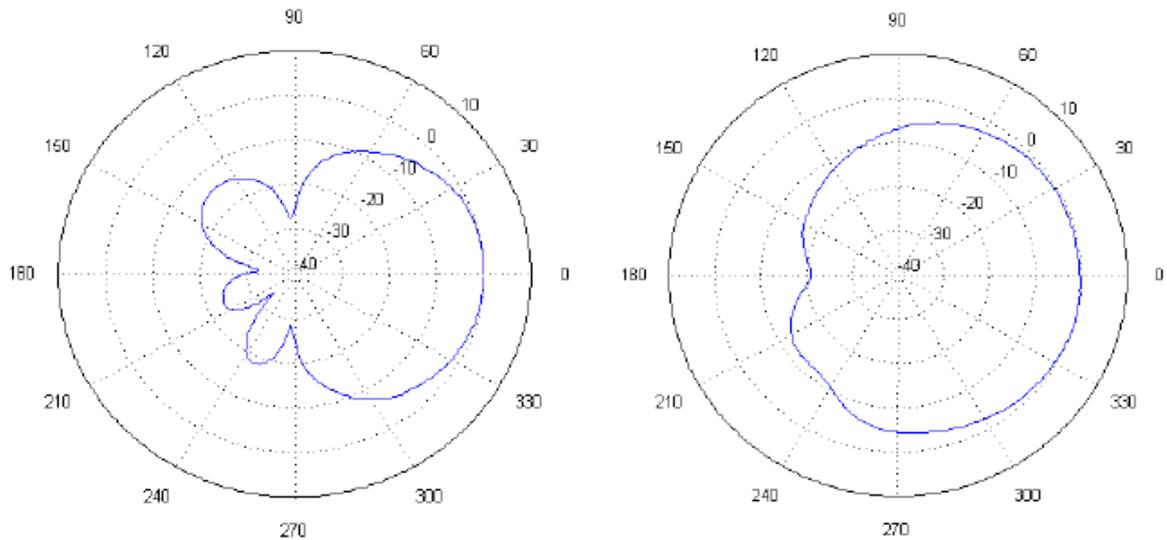


Рисунок 2.16 – Діаграма спрямованості Ягі (площина Е ліворуч)

2.5 Мікросхема детектора живлення

Linear Technology LT5534 — це високоефективний логарифмічний радіочастотний детектор потужності. Він має широкий частотний діапазон від 50 МГц до 3 ГГц і має динамічний діапазон сигналу 60 дБ. Із запропонованим зв'язком у описі даних детектор потужності працюватиме в діапазоні від -3 дБм до -63 дБм, іншими словами від 0,501 мВт до 0,501 нВт. Оскільки детектор потужності не має відомого обмежувача потужності або функцій, які б блокували сильні сигнали, слід бути обережним.

Вхідний радіочастотний сигнал від антени безпосередньо перетворюється зі шкали в децибелах на лінійну вихідну напругу постійного струму. Для досягнення динамічного діапазону 60 дБ кілька детекторів і обмежувачів об'єднані в каскад; дивіться блок-схему на малюнку 2.17. Їхні вихідні сигнали підсумовуються для отримання точного логарифмічного лінійного рівня постійного струму, пропорційного вхідному сигналу в дБ. Вихідний сигнал буферизується драйвером з низьким вихідним опором і реагує протягом 40 нс на зміну вхідного радіочастотного сигналу.

Як згадувалося, LT5534 має дуже високу чутливість, виявляючи сигнали розміром до -63 дБм, але цей нижчий рівень сигналу можна регулювати вгору або

вниз, іншими словами, динамічний діапазон можна перемістити. Щоб отримати сигнали вищого діапазону, перед ВЧ-входом просто вставляється аттенюатор. Щоб зменшити динамічний діапазон і отримати кращу чутливість, можна використовувати вузькосмугову мережу узгодження L-C. Залежно від того, для чого використовується мікросхема, чутливість детектора можна налаштувати в межах від -75 дБм до -62 дБм.

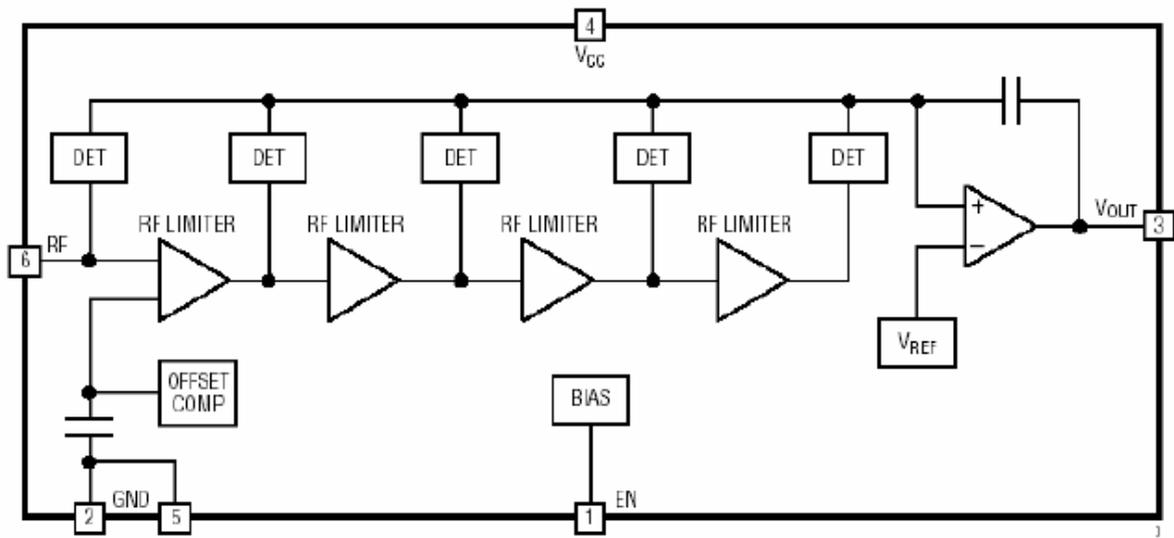


Рисунок 2.17 – Блок-схема мікросхеми детектора потужності LT5534

2.6 Фільтр

Фільтр — це пристрій, який вибірково фільтрує сигнали залежно від продуктивності фільтра, пропускаючи одні діапазони частот і послаблюючи інші. Існує багато різних фільтрів (наприклад, низькочастотних, високочастотних, смугових і смугозахисних), усі з різними характеристиками. Фільтри можна легко побудувати як з активними, так і з пасивними компонентами, такими як котушки індуктивності, провідники, резистори та операційні підсилювачі.

Існує також велика кількість готових фільтрів (наприклад, порожнинних фільтрів, кристалічних фільтрів і керамічних фільтрів). Який тип фільтра вибрати, залежить від програми.

2.6.1 Керамічні фільтри

Керамічні компоненти виготовлені з високостабільної п'єзоелектричної кераміки, яка функціонує як механічний резонатор. Частота первинно регулюється розміром і товщиною керамічного елемента.

Тип фільтра, який використовувався в цьому проекті, був керамічним трисекційним смуговим фільтром MuRata® з однокристальним поверхневим монтажем. Фільтр має центральну частоту 2450 МГц і смугу пропускання 100 МГц (див. рис. 2.18).



Рисунок 2.18 – Фільтр VP MuRata 2,45 ГГц

Цей фільтр обрано з наступних міркувань:

- складність реалізації власного фільтра на частоті 2,4 ГГц;
- малий розмір, що полегшує інтеграцію компонента з іншими невеликими компонентами.

Фільтр забезпечує добре ослаблення приблизно на 20 дБ при зміщенні 280 МГц від центральної частоти. Розмір фільтра 2,0*2,5*0,9 мм, передатну функцію можна побачити на рис. 2.19.

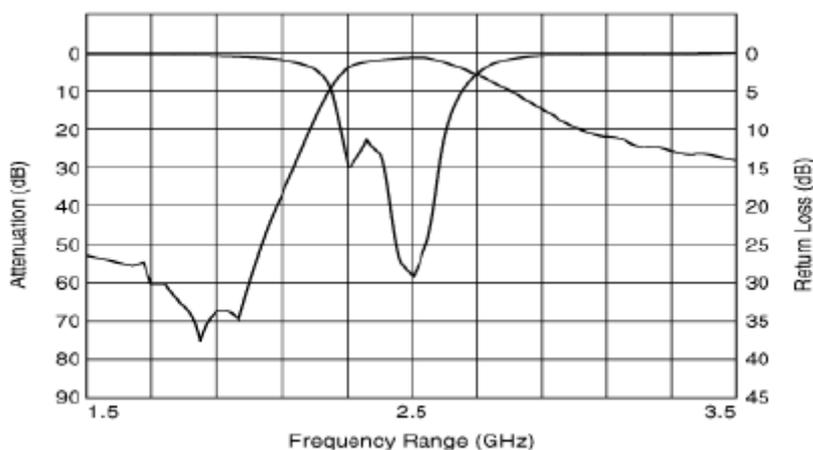


Рисунок 2.19 – Частотна характеристика фільтра Mur і VP

3 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

3.1 Плати детектора

Використання мікросхеми LT5534 мало вирішальне значення для реалізації детектування сигналу. Але оскільки LT5534 має діапазон частот від 50 МГц до 3 ГГц, фільтрація також має велике значення. Нарешті, дуже важливо виготовити дві друковані плати (PCB) з високою точністю. Принаймні отримати дві максимально схожі пари детекторів, щоб пара детекторів для кожної площини мала однакові характеристики. Тому на одній двосторонній друкованій платі було включено два детектори потужності, щоб полегшити монтаж на кінцевому застосуванні та отримати менше деталей для роботи. Метою доріжки 50 Ом було покращити індивідуальне узгодження з коаксіальним кабелем (50 Ом) і входом детектора потужності.

Розробка плат детектування живлення була виконана в TraxMaker®, який є частиною Microcode Circuit Maker® (див. рис. 3.1).

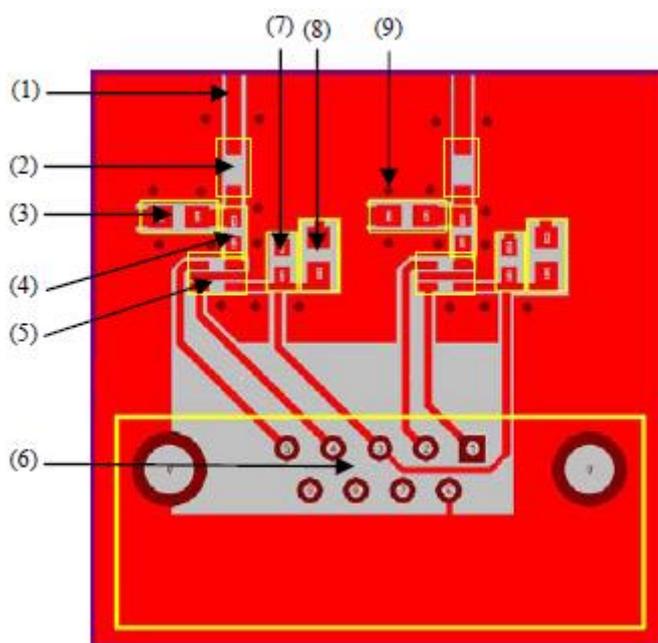


Рисунок 3.1 – Плата детектора потужності,

- (1) лінія передачі 50 Ом; (2) фільтр MuRata BP; (3) резистор 47 Ом;
 (4) конденсатор 1 нФ; (5) детектор потужності LT5534; (6) 9-контактний роз'єм; (7)
 конденсатор 100 пФ; (8) конденсатор 10 нФ; (9): наскрізний отвір.

Конструкція та компонування плати мають велике значення для придушення перешкод, особливо навколо доріжок радіочастотного сигналу (1) на рис. 3.1. Також важливо добре узгодження між сигнальним кабелем і платою та детектором потужності. Це було зроблено шляхом виготовлення заземленого копланарного хвилеводу (GCPW) [17] (див. рис. 3.2) з характеристиками 50 Ом для 2,41 ГГц. Використані формули див. у формулі 3.1.

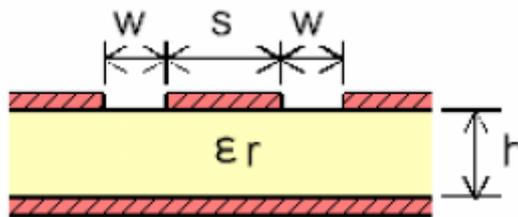


Рисунок 3.2 – Копланарний хвилевід із заземленою площиною

$$Z_0 = \frac{120 \cdot \pi}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \cdot \frac{1}{\frac{k}{k'} + \frac{k1}{k1'}}$$

де

$$k = \frac{s}{s + 2 \cdot w} ; \quad k' = \sqrt{1 - k^2} ; \quad k1' = \sqrt{1 - k1^2}$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{1 + \epsilon_r \cdot \frac{k'}{k} \cdot \frac{k1}{k1'}}{1 + \frac{k'}{k} \cdot \frac{k1}{k1'}} ; \quad k1 = \frac{\tanh\left(\frac{\pi \cdot s}{4 \cdot h}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi \cdot (s + 2 \cdot w)}{4 \cdot h}\right)}$$
(3.1)

Z_0 було встановлено на 50 Ом, а ширина доріжки була встановлена на 1 мм. За допомогою цих значень ми можемо визначити відстань навколо доріжки, щоб отримати правильний розмір для гарного збігу. Плата FR-4 має такі характеристики:.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики плати FR4

Товщина (h)	ϵ_r	Товщина міді
1,59 мм	4,2 (при 2,4	36 мкм

MatLab використовувався для визначення w (відстань) з імпедансом 50 Ом і шириною доріжки (s) 1 мм, відстань дорівнює 0,17 мм з кожного боку доріжки. Через обмеження наявного обладнання ці точні вимірювання неможливо виконати. Найтонша відстань, яку може відфрезерувати фрезерна машина, становить 0,2 мм, і з цим розміром було перераховано Z_0 в MatLab. Кінцевий вхідний опір плати детектора потужності тоді становить 51,9 Ом замість 50 Ом з $s = 1$ мм і $w = 0,2$ мм, що все ще достатньо. Як доповнення до цих розрахунків, для підтвердження результатів використовувався копланарний хвилевідний калькулятор від I-Laboratory [5].

Прохідні отвори використовуються для електричного з'єднання заземленої поверхні з оточуючими провідниками на верхньому шарі плати. Основна функція для цього полягала в тому, щоб переконатися, що потенціал залишається однаковим по всій друкованій платі, і таким чином зробити плату менш чутливою до сигналів перешкод і шуму.

Дві плати були відфрезеровані на друкованій платі, а компоненти ретельно припаяні на місце (див. рис. 3.3).

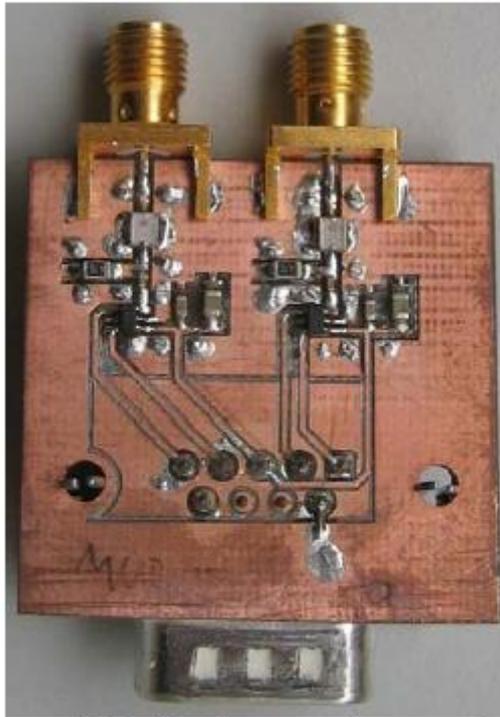


Рисунок 3.3 – Плата детектора кінцевої потужності

На наступному графіку показано характеристики двох плат детекторів потужності, вимірювання проводилося за допомогою генератора сигналів, де було виконано два вимірювання (частотна характеристика та логарифмічна характеристика потужності).

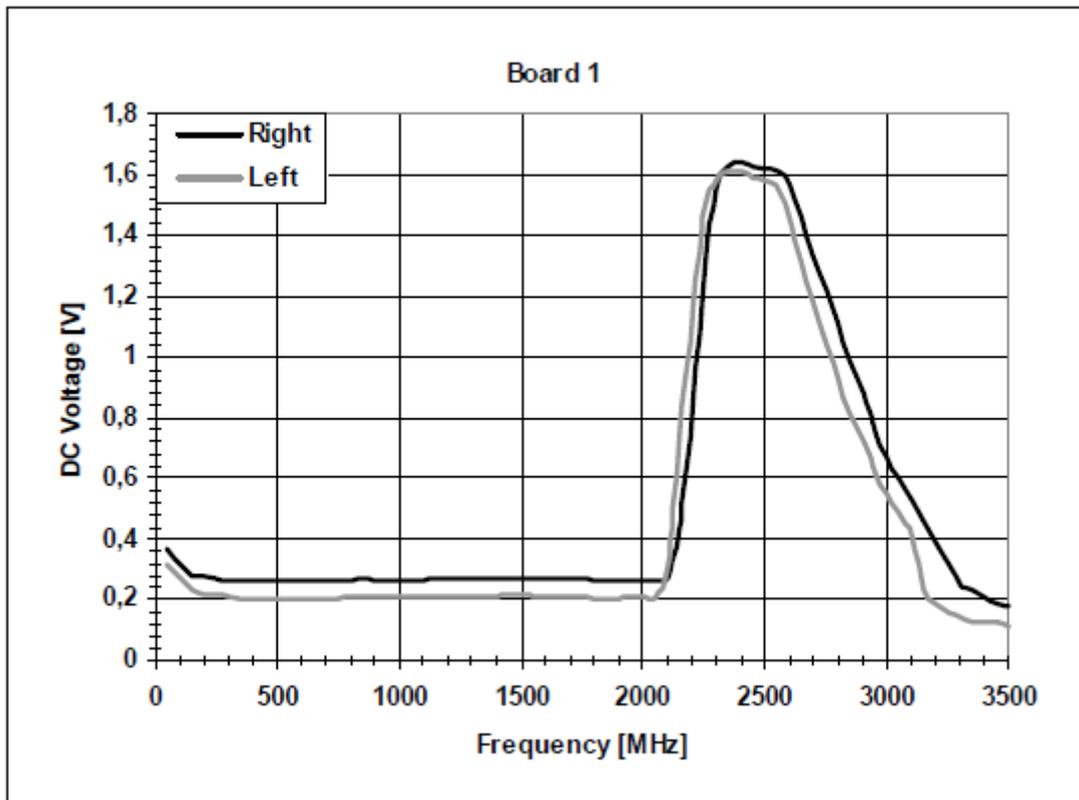


Рисунок 3.4 – Залежність вихідної напруги плати 1 від частоти (вхідний сигнал -20 дБм)

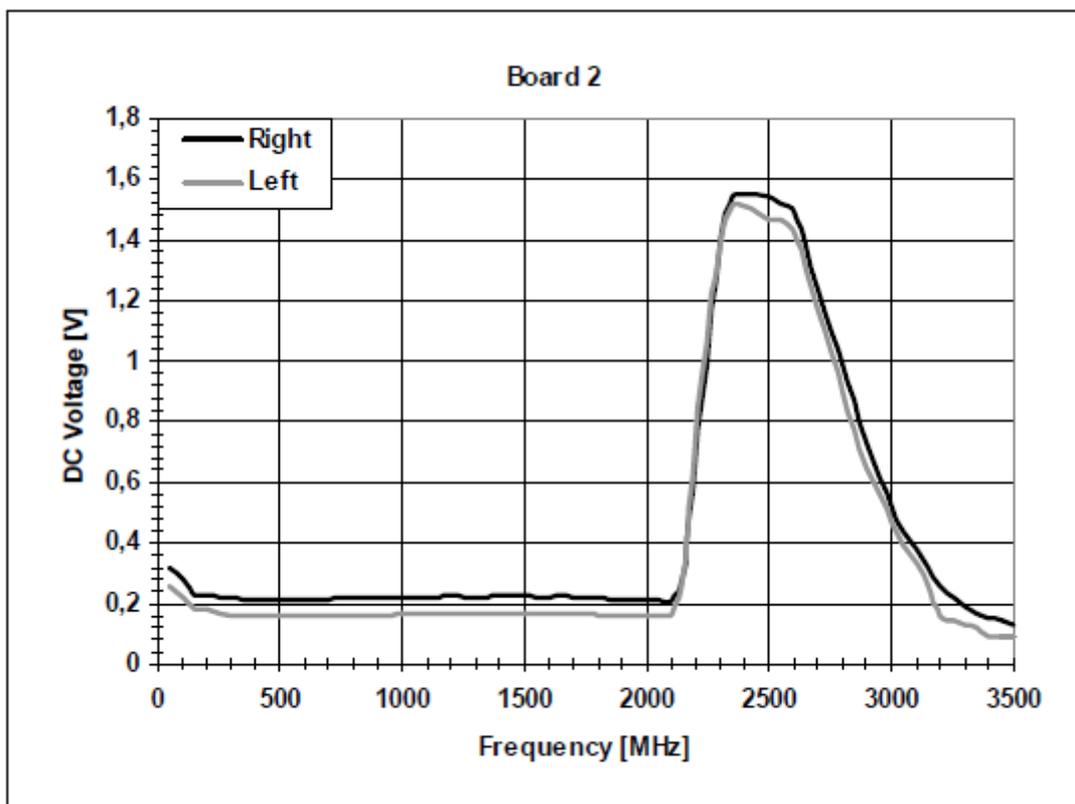


Рисунок 3.5 – Залежність вихідної напруги плати 2 від частоти (вхідний сигнал -20 дБм)

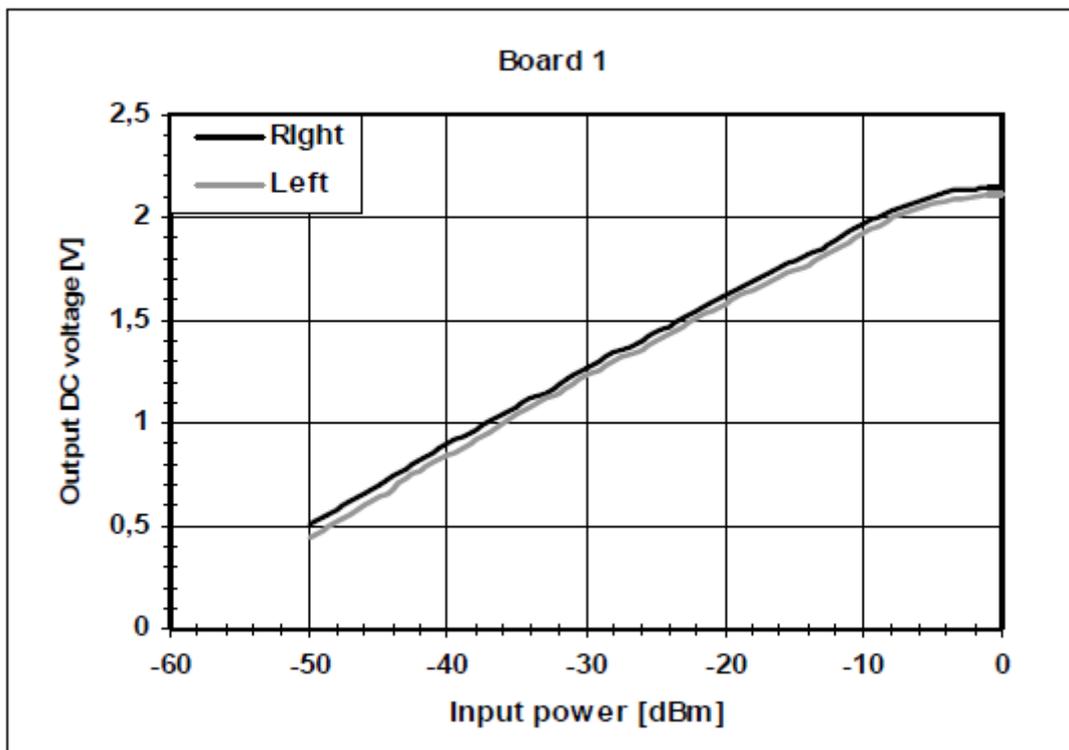


Рисунок 3.6 – Вихідна напруга плати 1 від вхідної радіочастотної потужності (вхід 2,4 ГГц)

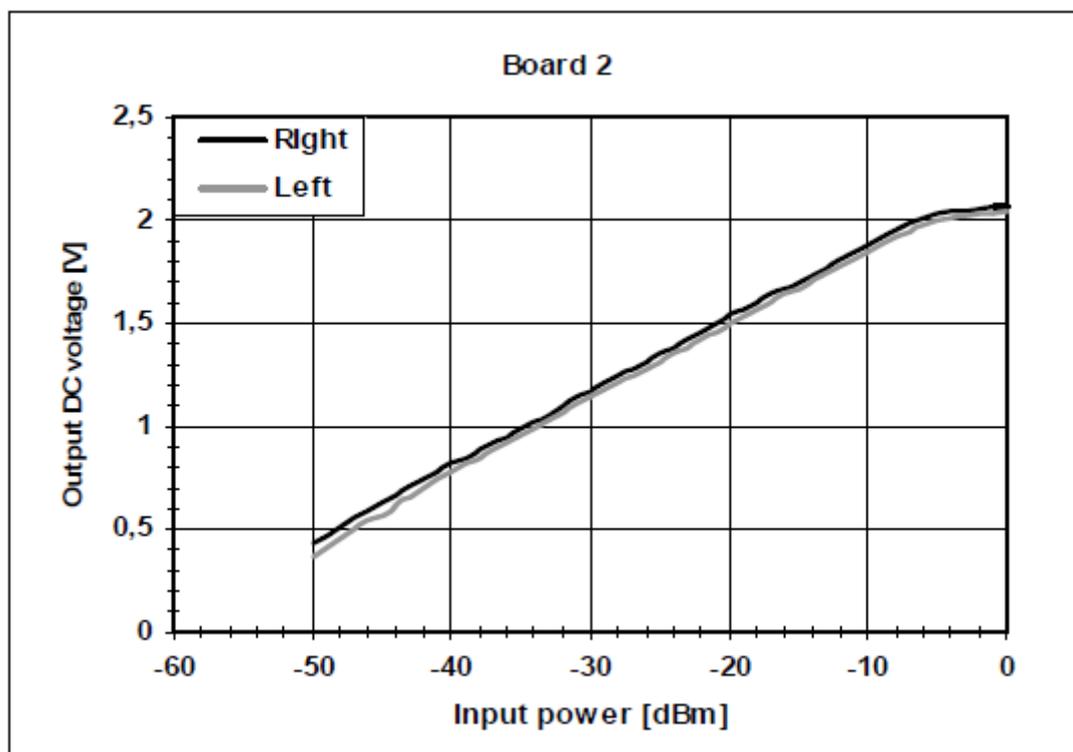


Рисунок 3.7 – Вихідна напруга плати 2 від вхідної радіочастотної потужності (вхід 2,4 ГГц)

Існують невеликі відмінності між платами та двома детекторами на кожній платі, як видно на рис. 3.4-3.7. Але відмінності досить малі, щоб компенсувати їх у програмному забезпеченні після аналого-цифрового перетворення.

3.2 Екранування

Однією з проблем цих плат детекторів потужності було те, що вони приймали сигнали без підключеної антени. Виміряна потужність сигналу, отриманого від самих плат, була близько 1Вт, що відповідає -34 дБм. Це було, коли сигнал 10 дБм передавався в безеховій камері з посиленням антени передавача 10 дБ. Цю проблему не можна було залишити поза увагою, оскільки вона може призвести до неправильного виведення на мікроконтролер. Щоб вирішити цю проблему, детектори потужності були розміщені на іншій, невідбиваючій стороні диска відбивача. Вони також були захищені від інших сигналів, таких як WLAN та іншого обладнання, що створює перешкоди. Дві невеликі заземлені алюмінієві коробки були виготовлені для утримання плат детекторів потужності. Це електромагнітно екранує плати, і єдиний сигнал, який приймається – антени Yagi. Коробки були зроблені в майстерні, і у нас було три роз'єми з коробок. Два входи для прийому сигналів плюс один вихід, який підключається до мікроконтролера через 9-контактний роз'єм (див. рис. 3.8).



Рисунок 3.8 – Екран для плати детектора потужності

3.3 Розміщення фідерних антен

Цю проблему можна вирішити багатьма способами, але є два фактори, яких не вдалося уникнути. Якщо живильні антени розташовані близько до фокусної точки, система може почати автоколиватися через обмеження двигунів постійного струму (роздільна здатність). Якщо антени розташовані дуже далеко одна від одної, БПЛА може пролетіти надто далеко від головного променя рефлекторної антени, і отриманий сигнал може бути занадто слабким. Ще одна проблема із занадто великою відстанню між антенами полягає в тому, що він може виявити бічні пелюстки диска відбивача, що змусить пристрій відстеження спрямовувати в неправильному напрямку. На рис. 2.3 діаграма спрямованості диска рефлектора показує, на скільки градусів від фокальної точки розташовані бічні пелюстки. Використовуючи діаграму спрямованості як орієнтир, ми вирішуємо розмістити дві горизонтальні фідерні антени трохи за межами ширини горизонтального променя рефлекторних антен, точніше під кутом $4,3^\circ$ (або 30 мм) від точки фокусу. Відповідно до графіків діаграми спрямованості рівень сигналу на цій відстані ослаб на 3,5 дБ.

Для антен з вертикальним фідером існувало фізичне обмеження через розміри центральної антени Yagi у фокусній точці (див. рис. 3.9). Центральна антена має ширину 50 мм, що унеможливило розміщення вертикальних фідерних антен ближче ніж 50 мм від фокусної точки без перешкод для діаграм спрямованості. Вертикальні фідерні антени були розміщені під кутом $7,1^\circ$ від фокальної точки з ослабленням 5 дБ. У такому положенні бічні пелюстки не були перешкодою у вертикальній площині, але рівень сигналу ослаблений трохи більше, ніж у горизонтальній площині.

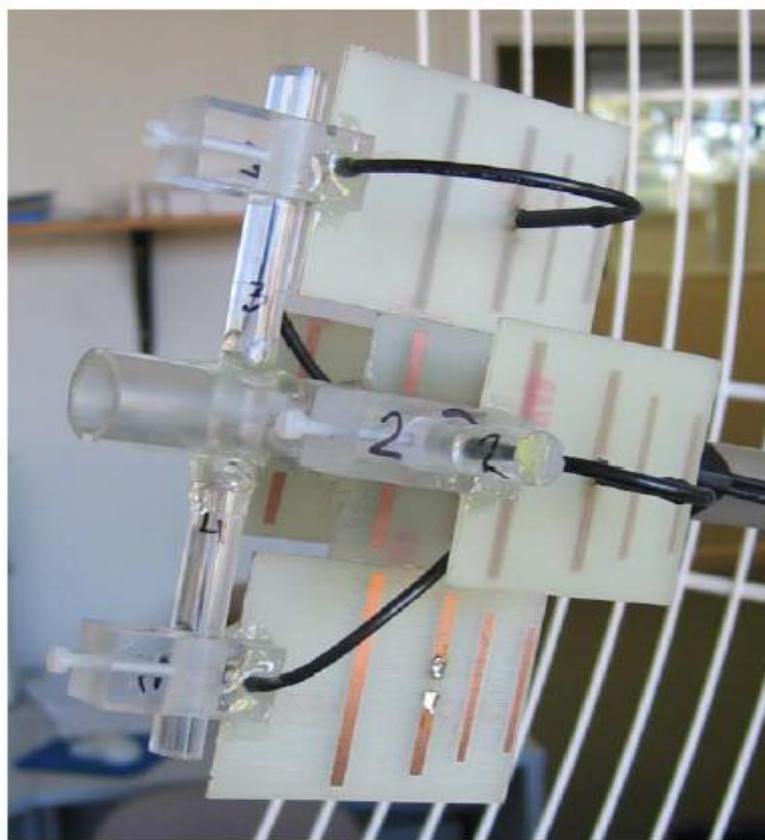


Рисунок 3.9 – Остаточна збірка Yagi

При ослабленні 5 дБ посилення на антенах з вертикальним фідером зменшується до 17,79 дБ. Завдяки цьому новому посиленню нову максимальну відстань можна розрахувати за формулою Фрііса (2.2).

$$20\log(R) = P_T + G_T + G_R - P_R - 20\log(f_{\text{MHz}}) - 32.44$$

$$\Rightarrow R = 343 \text{ m}$$

Це потужність отриманого сигналу, коли антена спрямована прямо на БПЛА. Коли передавач починає рухатися, наприклад, праворуч, головний промінь рухається в протилежному напрямку, і ліва антена Yagi, якщо дивитися ззаду, виявить сильніший сигнал. Таким чином, навіть якщо детектори не можуть виявити сигнали, коли система знаходиться в збалансованому стані, вони виявлять сильніший сигнал від однієї з фідерних антен, коли БПЛА вилітає з «головного променя». Через це максимальна відстань стеження не зменшиться так сильно, як у розрахунках вище.

Як видно на рис. 3.10, розмір апертури диска відбивача стає трохи меншим, коли промені входять під кутом (БПЛА на виході з головної пелюстки).

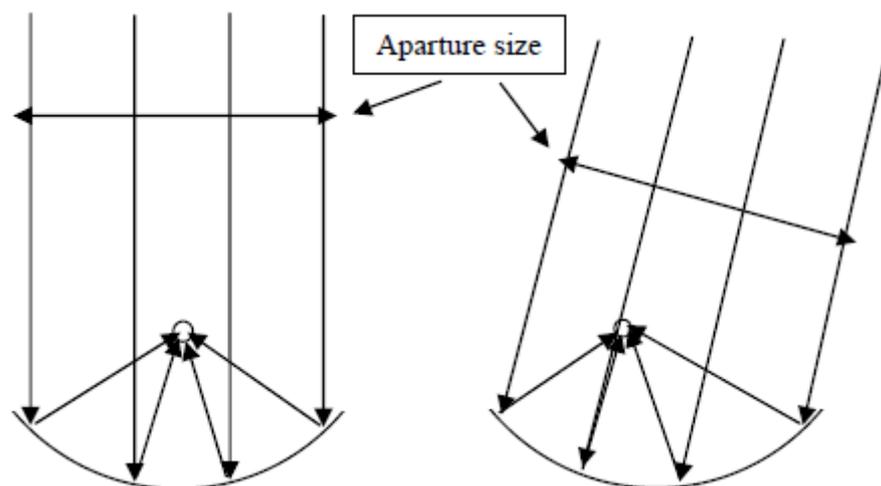


Рисунок 3.10 – Відображення рефлектора

3.4 Виконавча система

3.4.1 Двигуни постійного струму та редуктори

Двигуни, які використовуються, це два старі двигуни склоочисників. Двигуни могли бути не ідеальними для своєї мети в цьому проекті, але оскільки не було бюджету, щоб купити пару нових двигунів, довелося використовувати те що було в наявності.

Максимальна швидкість на виході з редуктора була виміряна і становить 32 об/хв, шляхом розрахунку передавального числа коробки передач можна було визначити початкову швидкість двигуна. Як видно на рис.3.11 вони приводять у рух третє ще більше колесо для кінцевої передачі (не показано на малюнку). Для розрахунку зачеплення ми порахували зуби на колесах і крок зачеплення на черв'ячній передачі.

Зачеплення від черв'ячної передачі до першого колеса визначали за такими розрахунками:

$$\frac{C_{\text{gear}}}{W_{\text{pitch}}} = \frac{31.05 \cdot \pi}{3} \approx 32 \quad (3.2)$$

де C_{gear} — це окружність зубчастого колеса, а W_{pitch} — крок черв'ячної передачі (і зубчастого колеса).

Передача між наступними двома зубчастими колесами визначається лише вимірюванням діаметра коліс. Велике колесо має діаметр 48 мм, а мале 15,7 мм, що означає передачу 48:15,7, тобто приблизно 3:1. Таким чином, ми маємо загальну передачу 96:1 (32*3:1), що означає, що кінцевий драйвер обертається в 96 разів повільніше, ніж двигун.

З передачею 96:1 максимальна швидкість двигуна при 12 Вольт становить ~3100 об/хв (-32 об/хв * 96). З урахуванням цих фактів ми також розрахували загальну передачу від двигуна постійного струму до фактичного веденого колеса для кожної площини. Для горизонтального руху є гумове колесо діаметром 35 мм, яке приводить у рух великий горизонтальний диск безпосередньо на відстані 240 мм від його центру. Це дає додаткову передачу 13,7:1, див. формулу 3.3.

$$\frac{\text{Diameter}_{\text{Horizontal disc}}}{\text{Diameter}_{\text{driver}}} = \frac{240 \cdot 2}{35} = 13.7 \quad (3.3)$$

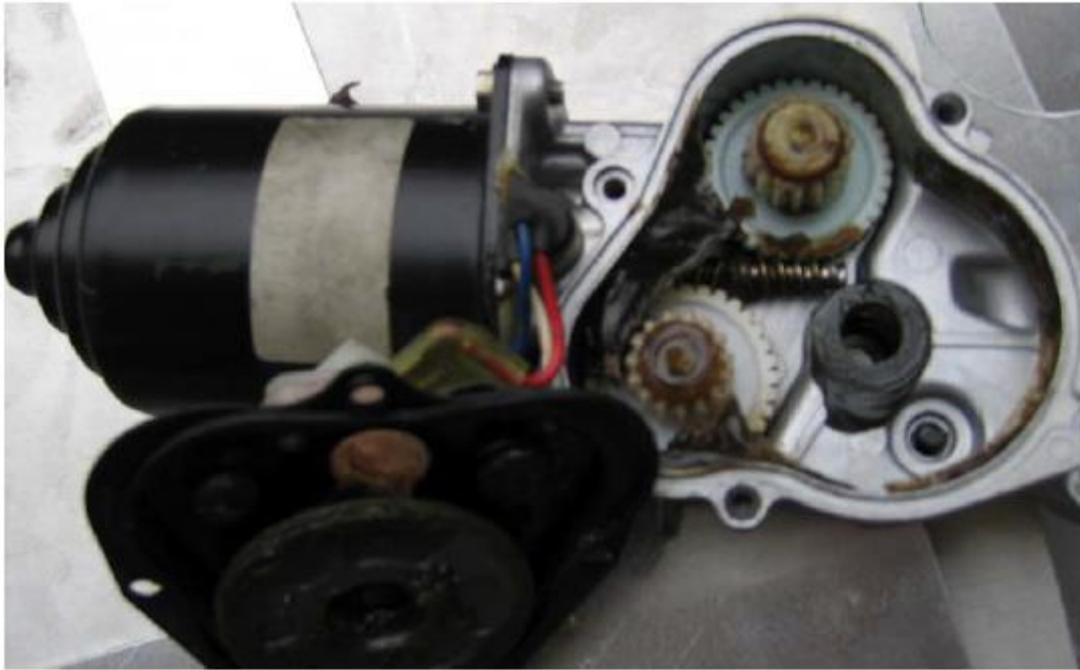


Рисунок 3.11 – Двигун постійного струму з редуктором

Для вертикальної площини використовується та ж формула (3.4) для визначення її додаткового зачеплення. Тут ведуче колесо має діаметр 13 мм і приводить в рух більше колесо діаметром 180 мм. Фактична передача між двома колесами здійснюється за допомогою пасової передачі, а додаткова передача для вертикальної площини становить 13,85:1.

$$\frac{\text{Diameter}_{\text{vertical disc}}}{\text{Diameter}_{\text{driver}}} = \frac{180}{13} = 13.85 \quad (3.4)$$

Загальна передача від двигуна постійного струму до фактичного приводу для кожного літака закінчується таким чином:

- по горизонталі: $96 \cdot 13,7 = 1315:1$
- по вертикалі: $96 \cdot 13,85 = 1329:1$

Крутний момент, необхідний для керування стійкою антени, можна приблизно розрахувати за формулами 3.5 і 3.6 (формули взяті з Physics Handbook [6]). Це може не відповідати реальному необхідному крутному моменту, але дає уявлення про те, що буде потрібно.

$$\tau = I \cdot \alpha \quad (3.5)$$

$$\tau = F \cdot r \quad (3.6)$$

де I = інерція обертання, α = кутове прискорення, F = сила і r = радіус.

Для знаходження моменту інерції використовується таке рівняння:

$$I = m \cdot r_1^2 \quad (3.7)$$

Де r_1 — середня відстань від центру до обертової ваги. Цю відстань важко виміряти через досить складну конструкцію. Використовувалась приблизна відстань 200 мм. При цій відстані та масі 14 кг можна використати формулу 6.6 для обчислення моменту інерції:

$$I = 14 \cdot 0.2^2 = 0.560 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

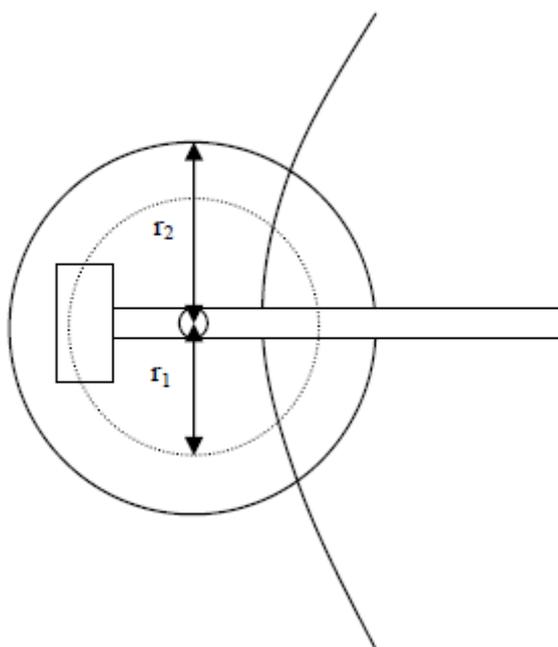


Рисунок 3.12 – Спрощений вид пристрою відстеження зверху

Щоб розрахувати крутний момент, також потрібно знати кутове прискорення. Це обчислюється за такими формулами:

$$\alpha = \frac{\omega}{t} \text{ rad/s}^2 \quad (3.8)$$

Де знаходиться максимальна кутова швидкість, отримана з максимальної швидкості, яку може обертати пристрій стеження.

$$\omega = \frac{\theta}{t_{\theta}} = \frac{2\pi}{25.5} = 0.247 \text{ rad/s}$$

t – це час, необхідний для прискорення з місця на місці до максимальної швидкості, яка встановлюється на 1 секунду. Це дає кутове прискорення:

$$\alpha = \frac{0.247}{1} = 0.247 \text{ rad/s}^2$$

Тепер крутний момент можна розрахувати за формулою 6.4.

$$\tau = 0.560 \cdot 0.247 = 0.138 \text{ Nm}$$

Сила, яку необхідно прикласти на відстані R_2 , визначається незначною зміною формули 6.5:

$$F = \frac{\tau}{r_2} = \frac{0.138}{0.23} = 0.601 \text{ N}$$

До цієї сили також слід додати сили тертя та сили, спричинені вітром, але після того, як ми випробували двигуни лобового скла, ми зрозуміли, що вони більш ніж потужні. Тому не було витрачено часу на вимірювання крутного моменту двигунів.

3.4.2 Регулятори швидкості

Через низьку вихідну потужність мікроконтролера неможливо забезпечити електродвигуни постійного струму без додаткового джерела живлення. Тому необхідний регулятор швидкості або привід двигуна постійного струму (H-міст), який приводить в дію двигуни. Комерційні контролери швидкості RC прості у використанні разом з мікропроцесорами, такими як PIC16F877, і вони використовують техніку під назвою широтно-імпульсна модуляція; ШІМ. Змінюючи ширину імпульсу ШІМ-сигналу, середню вихідну потужність можна зменшити за рахунок меншої ширини імпульсу або збільшити за рахунок більшої ширини імпульсу (або навпаки, залежно від конструкції регулятора швидкості).

Використовується стандарт Радиоконтролю (RC). Контролер швидкості, використаний у цьому проекті, був Marine ESC-50, який є регулятором швидкості, призначеним для моделей човнів (див. рис. 3.13)



Рисунок 3.13 – Контролер швидкості Marine ESC-50

Стандарт RC використовує сигнал 50 Гц із шириною імпульсу, що змінюється від 1 до 2 мс. Нейтральний керуючий імпульс визначається як сигнал, який першим

потрібен регулятору швидкості, коли він запускається, ширина імпульсу для нейтралі становить 1,5 мс. Якщо під час запуску програми буде присутній неправильний сигнал, регулятор швидкості не реагує.

Таблиця 3.2 – Характеристики ширини імпульсу

Ширина імпульсу	Напрямок
1.5 мс	Нейтральний / Стоп
1.0 - 1.5 мс	За годинниковою стрілкою (+)
1.5-2.0 мс	Проти годинникової стрілки (-)

Marine ESC-50 здатний подавати до 50 А постійного струму двигуна в одному напрямку. У протилежному напрямку він може забезпечити лише до 20 А постійного струму двигуна. Це одна з проблем моделі регулятора швидкості човна, оскільки він змушує пристрій стеження рухатися швидше в одному напрямку. У наших вимогах до того, як швидко рефлексорний диск повинен слідувати повільнішому напрямку, використовується як еталон. Регулятори швидкості легко вмикаються та вимикаються за допомогою перемикача живлення, функцією якого є припинення живлення двигуна постійного струму.

4 РОЗРОБКА ПРОГРАМИ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ВІДСТЕЖЕННЯ БПЛА ТА ТЕСТУВАННЯ

4.1 Модуль керування

В основі блоку управління лежить мікроконтролер PIC16F877 фірми Microchip. Платою розробки була використана плата прототипу PIC-P40B-20MHz від OLIMEX. Ця плата постачається зі схемою живлення, кварцевим генератором, портом RS232 послідовного зв'язку та портом ICSP/ICD.

На PIC16F877 було записано завантажувач, тому можна було легко перепрограмувати через послідовний порт зв'язку. Середовищем розробки програмного забезпечення використовувалося MPLAB від Microchip з компілятором HiTechs PICC.

Мікроконтролер PIC16F877 є автономним пристроєм, оптимізованим для програм керування. Це потужний контролер із багатьма функціями та відносно дешевий. Для нашого застосування цей мікропроцесор більш ніж достатньо потужний.

PIC16F877 має 8К флеш-пам'яті для програм, 10-розрядні аналого-цифрові перетворювачі, 33 контакти введення/виведення та багато інших функцій у 40-контактному корпусі DIP (див. рис. 4.1).

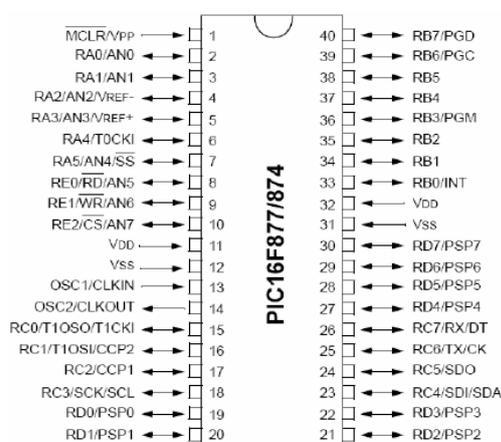


Рисунок 4.1 – Розташування контактів корпусу мікроконтролера PIC16F877

Порти, які використовуються на мікропроцесорі, це в основному порт А і порт Е, інші порти також використовуються, але вони не такі важливі для продуктивності, як порт А і порт Е (див. табл. 4.1). Усі порти є двонаправленими портами введення/виведення, і залежно від того, як ініціалізовано регістр для кожного порту, оголошення для кожного виводу можна встановити як вхід або вихід.

Порт А використовується для перетворення рівня постійного струму від системи виявлення сигналу в цифрове значення. Роздільна здатність А/D може бути встановлена до 10 біт, але в цій програмі використовуються лише 8 біт. Це відбувається через мерехтливий вихідний сигнал від детекторів потужності, тому два молодших біта (LSB) після аналого-цифрового перетворення будуть відкинуті. Роздільна здатність все ще достатньо хороша, щоб програма виявила різницю між рівнями напруги від детекторів потужності.

Чутливість АЦП:

$$\begin{aligned} \text{Resolution} &= \frac{V_{\text{ref}}}{256} \\ \text{Resolution} &= \frac{5 \text{ V}}{256} = 19.53 \text{ mV/bit} \end{aligned} \tag{4.1}$$

Через те, що максимальна напруга від детекторів потужності становить 2,4 В, діапазон аналого-цифрового сигналу є непотрібно високим. Це можна покращити, просто підключивши два послідовно з'єднаних резистора 100 кОм через напругу живлення від мікропроцесора до землі та з'єднавши контакт RA3 між двома резисторами. Завдяки цьому опорна напруга зменшується вдвічі (2,5 В), а роздільна здатність АЦП збільшується. Нова роздільна здатність становить 9,76 мВ/біт замість 19,53 мВ/біт, як показано у формулі нижче.

$$\text{New Resolution} = \frac{2.5 \text{ V}}{256} = 9.76 \text{ mV/bit}$$

Основною функцією порту E: було надсилання правильних сигналів ШІМ на контролери швидкості залежно від напруги постійного струму на аналогових входах порту A: s. Вивід RE1 є вихідним керуючим сигналом для азимутальної площини, а висновок RE2 генерує керуючий сигнал для площини місця. Як цей ШІМ-сигнал був реалізований для роботи на 50 Гц, пояснюється в розділі 7.2. Третій контакт на порту E, RE0, використовується як вхід для визначення, з якого боку від орієнтира 0° розташована антена (а також БПЛА) (докладніше про це в розділі 7.2.5).

Таблиця 4.1 – Опис використаних контактів мікроконтролера та їх застосування у схемі керування

ПОРТ	Номер контакту	функція
ПОРТ А	RA0	Аналоговий вхідний детектор потужності 1
	RA1	Аналоговий детектор вхідної потужності 2
	RA2	Аналоговий детектор вхідної потужності 3
	RA3	Еталонна напруга
	RA5	Аналоговий детектор вхідної потужності 4
ПОРТ В	RBO	Ручне горизонтальне керування +
	RB1	Ручне горизонтальне керування -
	RB2	Ручне вертикальне рульове керування +
	RB3	Ручне вертикальне рульове керування -
ПОРТ С	RC6	Отримати серійні дані
	RC7	Послідовна передача даних
ПОРТ D	RD0	Перемикач ручного/автоматичного керування
	RD1	Ручний/автоматичний діод
	RD2	Вертикальний балансовий діод
	RD3	Горизонтальний в балансі діод
	RD4	Увімкнути/вимкнути вертикальний детектор
	RD5	Увімкнути/вимкнути горизонтальний детектор потужності
ПОРТ E	RE0	Датчик вертикального положення
	RE1	Горизонтальний вихід PWM
	RE2	Вертикальний вихід ШІМ

4.2 Програмне забезпечення

Програмне забезпечення в цій програмі написано мовою C і скомпільовано за допомогою Hi Techs PICC Light Compiler. Компілятор є безкоштовним для використання, але обмежує використання пам'яті до 2 КБ, проте він працює добре, оскільки написана програма в цьому додатку відносно мала. Попередній досвід роботи з HT PICC також був причиною використання цього компілятора.

Основне завдання програмного забезпечення — зчитувати аналогові значення з детекторів потужності, порівнювати їх і встановлювати тривалість імпульсу ШІМ так, щоб двигуни спрямовували антену на ціль і, отже, зменшували різницю між детекторами потужності. Коли різниця в напрузі постійного струму між парою детекторів потужності знаходиться в межах заданого ліміту, тривалість імпульсу конкретного ШІМ-сигналу встановлюється на 1,5 мс. Це означає, що двигуни будуть стояти. Діод вмикається, коли ціль знаходиться в рівновазі, щоб повідомити про це користувача. Послідовний зв'язок також доступний, якщо потрібно контролювати рівні постійного струму на аналогових входах процесора. Щоб зменшити навантаження на процесор, значення постійного струму передаються лише після кожних 30 аналогових зчитувань. Удосконаленням цієї системи є додавання дисплея, який показує рівні постійного струму та іншу корисну інформацію, але на це не було виділено часу.

4.2.1 Блок-схеми програми

Програма складається з одного головного циклу, який багаторазово перевіряє, чи настав час читати нові аналогові значення, чи є новий символ у буфері USART2 або чи система налаштована на ручний режим, див. Малюнок 7.2 для діаграми «Як».

Також потрібно подбати про три переривання. Два переривання генеруються внутрішніми таймерами TMR1 і TMR2. Ці таймери генерують сигнал PWM для контролерів швидкості. Обробники переривань для цих переривань контролюють, чи повинні бути встановлені на виводах PWM (RE1 і RE2) високий або низький

рівень. Останнє переривання генерується, якщо в буфері читання USART знайдено новий символ, процедура переривання встановлює змінний біт високого рівня, щоб символ можна було прочитати пізніше. Чому символ не зчитується негайно в програмі переривання, це зробити процедуру переривання якомога коротшою та швидкою.

Коли нове аналогове значення зчитується з виходів детектора потужності, також потрібно виконати деякі порівняння та обчислення, перш ніж можна буде встановити правильний сигнал ШІМ, див. блок-схему цієї процедури на рис. 4.3. Якщо аналоговий вхід надто високий, детектори живлення вимикаються, а контрольні діоди на головному блоці починають блимати. Це зроблено з міркувань безпеки, щоб зберегти детектори потужності для надто сильного радіочастотного сигналу, який може їх знищити. Єдиний спосіб перезапустити детектори живлення – видалити надто сильний радіочастотний сигнал і перезавантажити головний блок.

Оскільки система може рухатися на 180 градусів у вертикальній площині, горизонтальні Ягі-антени будуть «мінятися місцем», ліва стає правою і навпаки. Оптичний датчик показує, з якого боку від позначки «0» розташована антена. Програмне забезпечення також має компенсувати невеликі відмінності в силі сигналу від детекторів потужності (як показано на рис. 3.4–3.7). Після цього аналогові вхідні значення порівнюються, а ШІМ встановлюється так, щоб пристрій стеження рухався до БПЛА. Рівні постійного струму передаються через послідовний інтерфейс кожні 30 аналогових зчитувань.

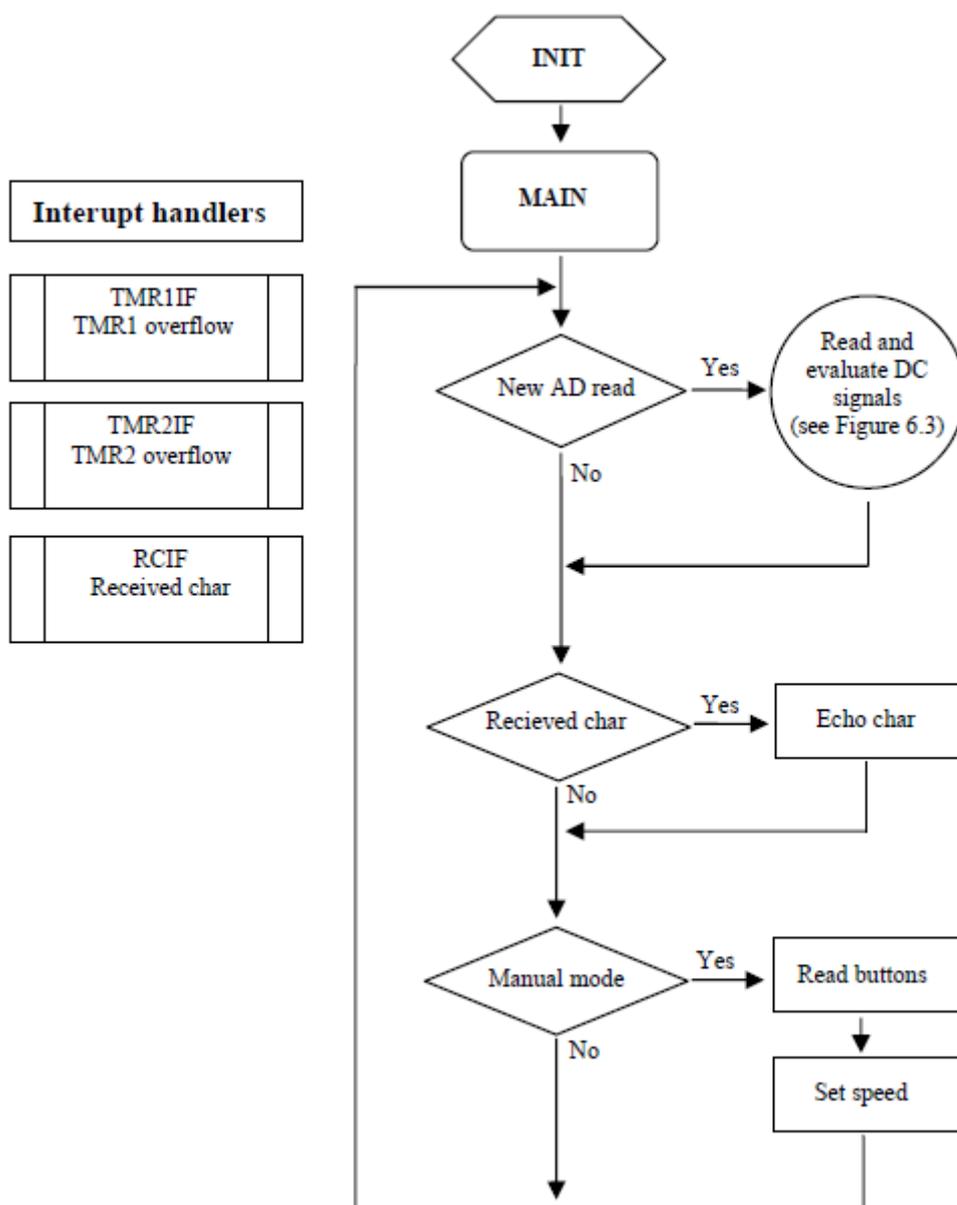


Рисунок 4.2 – Блок-схема програми

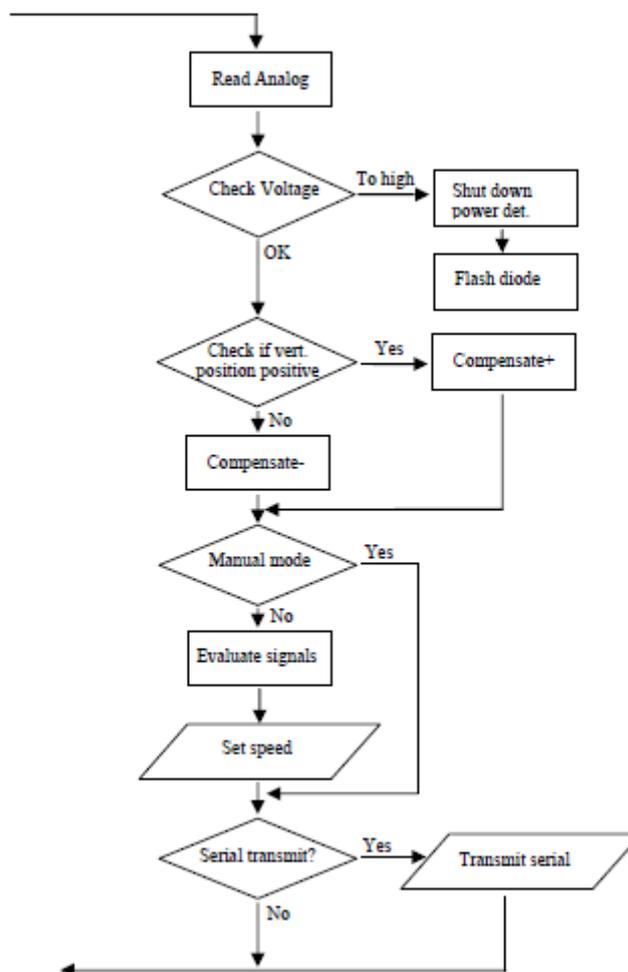


Рисунок 4.3 – Блок-схема аналогового зчитування та порівняння

4.2.2 ШІМ

Широтно-імпульсна модуляція — це техніка, яка може використовуватися для контролю потужності навантаження без втрати будь-якої значної потужності драйвера. Рівень постійного струму пульсує із заданою частотою шляхом зміни тривалості імпульсу; можна контролювати середню потужність.

У нашому додатку необхідне вторинне джерело живлення через високі струми, що проходять через двигун постійного струму. Це джерело живлення (регулятор швидкості) потребує ШІМ-сигналу 50 Гц із тривалістю імпульсу, що змінюється від 1 до 2 мс

Microchip PIC16F877 має внутрішній «готовий» ШІМ-модуль, але він має обмеження, він не може [7] створювати такі низькі частотні сигнали, як 50 Гц. Тож

потрібно було розробити власну процедуру ШІМ. Це було використано за допомогою внутрішніх таймерів процесора (TMR1 і TMR2).

Таймер 1 був налаштований на генерування внутрішнього переривання кожні 10 мс (100 Гц), а за допомогою біта управління два виходи, контакти RE1 і RE2, можуть генерувати сигнал на частоті 50 Гц. Timer2 використовувався для контролю ширини імпульсу двох виходів, щоб робочий цикл міг змінюватися з часом. Той самий керуючий біт, що й у Timer1, використовується для керування тим, який вихід змінюється.

Timer1 може працювати в двох різних режимах, як таймер і лічильник, обидва з роздільною здатністю 16 біт. Для встановлення правильного режиму «біт вибору годинника» TMR1CS (T1CON<1>) або встановлюється, або очищається. У цій програмі timer1 використовується як таймер, тому біт T1CON очищається. Таймер вмикається встановленням біта ввімкнення/вимкнення TMRION (T1CON <0>). Функціональне використання timer1, як згадувалося раніше, полягає у генеруванні переривання кожні 10 мс, тому можна генерувати два незалежних сигнали ШІМ.

Timer1 починає відлік із заданого значення (0 - 216), і коли відбувається переповнення (на 216), генерується переривання [7]. Щоб знати, яким має бути це початкове значення для генерації сигналу 100 Гц, необхідно знати частоту генератора. У нашій заявці використовувався кристал 20 МГц (F_{osc}).

$$T_{limit} = 4 \cdot \frac{1}{F_{osc}} \cdot T_{1pre} \cdot \text{Number_of_inst_cycles} \quad (4.2)$$

Де T_{limit} — необхідний час між перериваннями, а T_{1pre} — значення prescaler4. Переставивши формулу (4.2), можна визначити кількість циклів інструкцій. Тоді формула виглядає так:

$$\text{Number_of_inst_cycles} = \frac{T_{limit}}{T_{pre}} \cdot \frac{F_{osc}}{4}$$

У нашому випадку:

$$\text{Number_of_inst_cycles} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{1} \cdot \frac{20 \cdot 10^6}{4} = 50000$$

Це означає, що timer1 має збільшитися в 50 000 разів, перш ніж відбудеться переповнення та переривання. Це значення віднімається від 216 і записується в регістри TMR1RESETHIGH і TMR1 RESET_LOW.

Таймер 2 — це 8-розрядний таймер, який має як попередній, так і постділяльний блок [7], і в цій програмі він використовується для встановлення правильної ширини імпульсу для ШІМ. Через специфікації регуляторів швидкості, які потребують ширина імпульсу між 1-2 мс, постделитель і попередній делитель встановлюються в залежності від того, наскільки швидко таймер повинен збільшитися.

Щоб отримати правильний інтервал переривання з кристалом 20 МГц, біти керування попередніми дільниками T2CKPS1 і T2CKPS0 (T2CON<1:0>) встановлюються на високий рівень, щоб отримати попередній дільник 1:16. Постделікатор встановлюється на 1:3 шляхом встановлення керуючих бітів 3-6 у регістрі T2CON на 0010. З цими параметрами Timer2 збільшується лише кожні 48 (16*3) циклів команд. Таймер 2 генерує переривання, коли воно збільшилося до того самого значення, що й 8-бітовий регістр PR2 (дивіться блок-схему таймера 2 на рис 4.4). Формула генерації переривання Timer2 виглядає так:

$$T_{2int} = \frac{4}{F_{osc}} \cdot PR2 \cdot T_{2pre} \cdot T_{2post} \quad (4.3)$$

За допомогою формули 6.3 можна розрахувати інтервал переривань:

$$T_{2int} = 200 \cdot 10^{-9} \cdot [0 \rightarrow 255] \cdot 16 \cdot 3 = [0 \rightarrow 2.448] \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

Час, необхідний Timer2 для генерації переривання, залежить від регістра PR2. Регістр PR2 оновлюється після кожного аналого-цифрового перетворення та порівняння 4 фідерних антен. Оскільки для роботи регуляторів швидкості потрібна

ініціалізована ширина імпульсу 1,5 мс, PR2 встановлено на 155, що відповідає ширині імпульсу 1,5 мс.

Під час роботи PR2 встановлюється на 155 плюс/мінус різниця рівнів постійного струму від детекторів потужності, щоразу в горизонтальній і вертикальній площинах. Як згадувалося раніше, контрольний біт використовується для відстеження того, який вихід ШІМ має змінитися.

Процедура виглядає так: для кожного переривання, яке генерує таймер 1, встановлюється регістр PR2 (залежно від останнього аналогового зчитування), на відповідному вихідному виводі (RE1 або RE2) встановлюється високий рівень, а таймер2 запускається шляхом встановлення високого рівня TMR20N. Потім вихідний регістр TMR2 Timer2 збільшується, доки він не збігається з PR2 і генерує переривання. Коли це відбувається, TMR2 перезавантажується та встановлює на визначений вихідний контакт (RE1 або RE2) низький рівень (і зчитуються нові аналогові значення). Це повторюється кожні 10 мс (100 Гц) (дивіться рис. 4.5 з часовою діаграмою ШІМ).

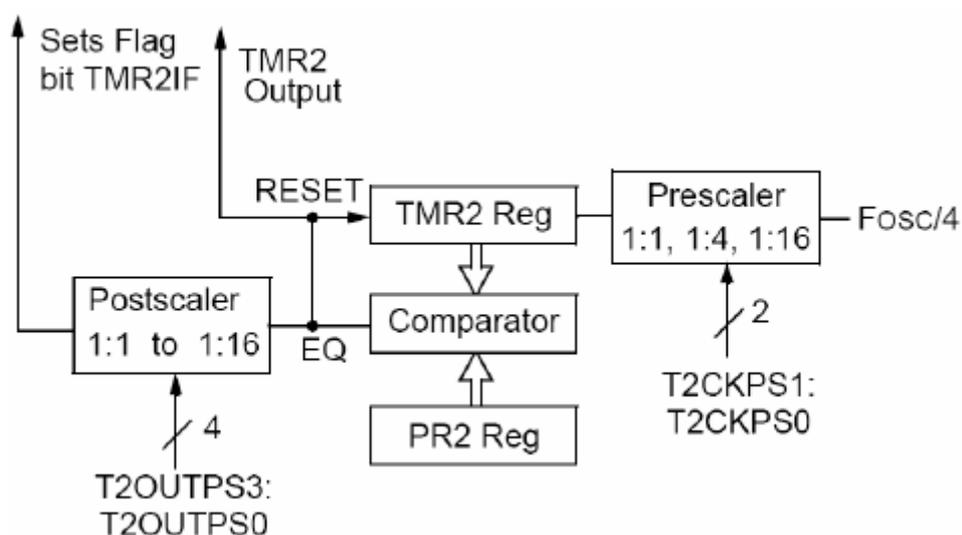


Рисунок 4.4 – Блок-схема Timer2

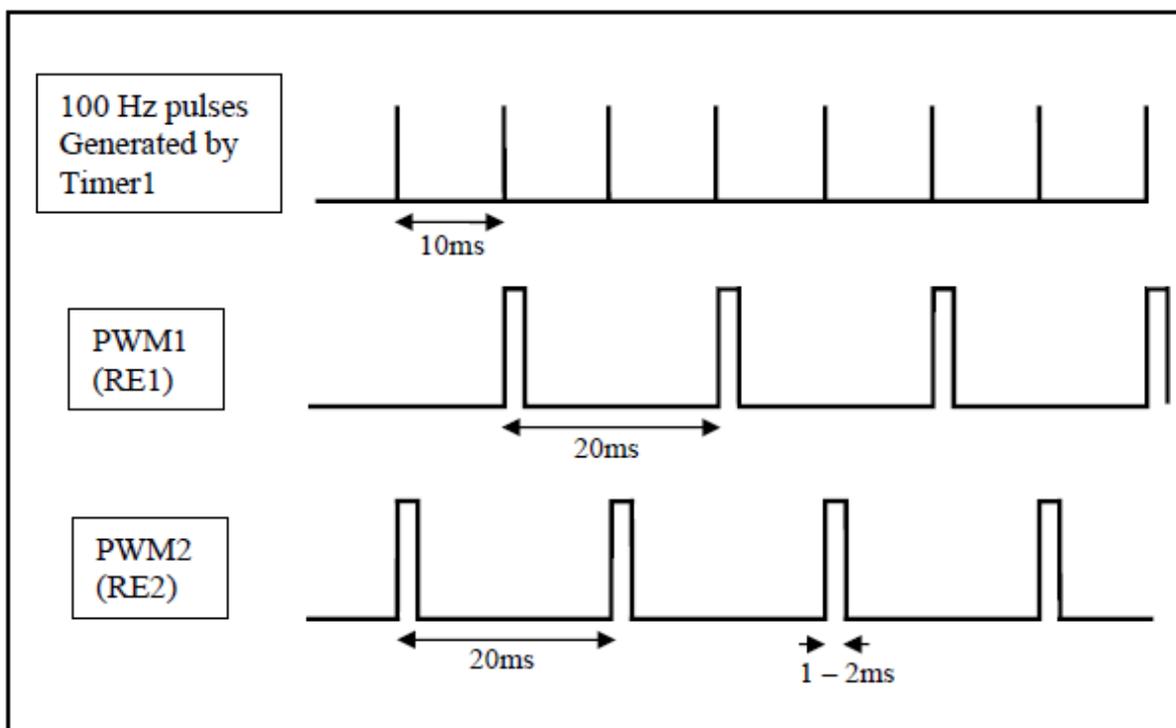


Рисунок 4.5 – Часова діаграма ШІМ

4.2.3 Процедура аналогово-цифрового перетворення

PIC16F877 має 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач з 8 контактами, який можна налаштувати як цифрові входи/виходи, аналогові опорні або аналогові входи. У цьому проекті чотири з цих входів використовувалися як аналогові входи і один як аналоговий опорний. Аналогове опорне значення встановлюється на рівень напруги, який має бути максимальною напругою, яку можуть досягти аналогові входи. З формули (4.1) було використано опорну напругу 2,5 В, оскільки максимальна напруга, до якої можуть піднятися детектори потужності, становить - 2,4 В. Використовуючи нижчу опорну напругу, можна досягти вищої роздільної здатності, оскільки аналого-цифрове перетворення лише перетворює від 0 до 2,5 В замість 0 до 5 Вольт.

Як пояснювалося раніше, програма аналогово-цифрового перетворення у цьому проекті запускала лише у 8-бітному режимі, оскільки 10-бітний режим був зайвим у цій програмі.

Аналого-цифрове перетворення повторюється після кожного разу, коли Timer2 генерує переривання. Оскільки було використано чотири детектори потужності, необхідно виконати чотири аналого-цифрові перетворення. Пізніше ці значення порівнюються, віднімаються і записуються в регістр PR2 для встановлення ширини імпульсу.

4.2.4 Компенсація

Через відмінності між чотирма детекторами потужності була потрібна певна компенсація. На рис. 3.6 і 3.7 показано, що похибки для двох пар детекторів є постійними, не залежать від потужності вхідного сигналу. Щоб отримати точну різницю, стенд помістили в безехову камеру, щоб переконатися, що навколишні сигнали не заважають. При повній відсутності вхідного сигналу чіпи детектора потужності дали такий вихід, як видно з-за стійки антени:

- мікросхема детектора верхньої антени ~11 мВ;
- мікросхема детектора нижньої антени ~17 мВ;
- мікросхема детектора правої антени ~13 мВ;
- мікросхема детектора лівої антени ~10 мВ.

З цими значеннями компенсації для вертикальних і горизонтальних чіпів становили відповідно 6 мВ та 3 мВ. Компенсації були зроблені в програмному забезпеченні, де вихід найслабшого детектора був збільшений, щоб відповідати його парному детектору.

4.2.5 Датчик вертикального розташування

Щоб змусити систему правильно керувати, потрібно врахувати одну річ. Завдяки тому, як горизонтальні фідерні антени розміщені на антенній штанзі, мікропроцесор порівнює два рівні постійного струму від плат детекторів потужності, щоб керувати в правильному напрямку. Це означає, що якщо лівий Yagi, якщо дивитися ззаду, має найсильніший рівень сигналу, двигун повинен

направити антену вправо, щоб знову отримати баланс між двома вертикальними антенами Yagi. Як тільки рефлекторний диск проходить повз вертикальну позначку 0° , горизонтальні фідерні антени змінюють місце, правий Yagi стає лівим і навпаки. Це було вирішено за допомогою оптичного датчика, який може бути високим або низьким залежно від місця вертикального руху (див. рис. 4.6).

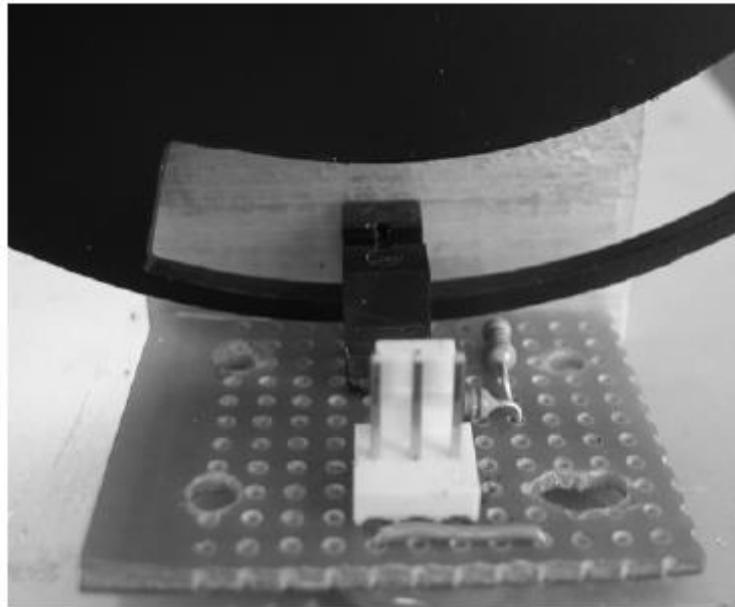


Рисунок 4.6 – Оптичний датчик

Чорний диск має відкритий простір на 95° і починається саме тоді, коли вертикальне положення диска відбивача знаходиться на мітці 0° . Решта чорного диска суцільна, через що оптичний датчик змінює стан залежно від місця розташування. Цей стан постійно перевіряється мікропроцесором, щоб визначити, де знаходиться антена у вертикальній площині. Коли стан оптичного датчика змінюється, мікроконтролер вносить необхідні зміни для порівняння між двома горизонтальними антенами Yagi.

Це змушує стійку антени завжди рухатися в правильному напрямку руху.

4.3 Контроль безпеки

Через механічні обмеження у вертикальній площині знадобилася екстрена перерва. Це було вирішено не виконувати як завдання для мікропроцесора, а замість цього два механічні перемикачі були встановлені на підставці антени. Метою цих перемикачів було припинення живлення двигунів постійного струму, коли рефлекторна антена досягає положення далі, ніж -95° та $+95^\circ$ від відносного 0° (де антена спрямована прямо вгору). Це було необхідно, оскільки в іншому випадку двигун постійного струму міг би притиснути диск відбивача до підставки та спричинити пошкодження обладнання. Цей контроль безпеки є захистом на випадок, якщо мікропроцесор потрапить у тупик (або якась інша непередбачена помилка в програмі) і подасть неправильний сигнал керування регуляторам швидкості.

Перемикачі розташовані там, де не повинно бути розміщення антени, оскільки БПЛА не може пролетіти під горизонтом (-90° або 90°). (Це може бути не на 100 % правдою, оскільки БПЛА може летіти в долині, коли пристрій стеження стоїть на пагорбі. В особливому випадку, як цей, пристрій стеження потрібно нахилити, щоб стежити за БПЛА.) Якщо антена буде перебуваючи в будь-якому з цих положень, перемикачі вимкнуть живлення, і єдиний спосіб вийти з цього положення – вручну керувати пристроєм відстеження. Перш ніж це можна буде зробити, блок керування потрібно перемкнути в ручний режим і натиснути перемикач захисного скидання, який перекриває аварійні вимикачі. Цю кнопку було розміщено подалі від блоку ручного керування, тому має «мертву ручку» використовувати для повернення антени на траєкторію. На малюнку 7.7 нижче показано схему цього захисту безпеки.

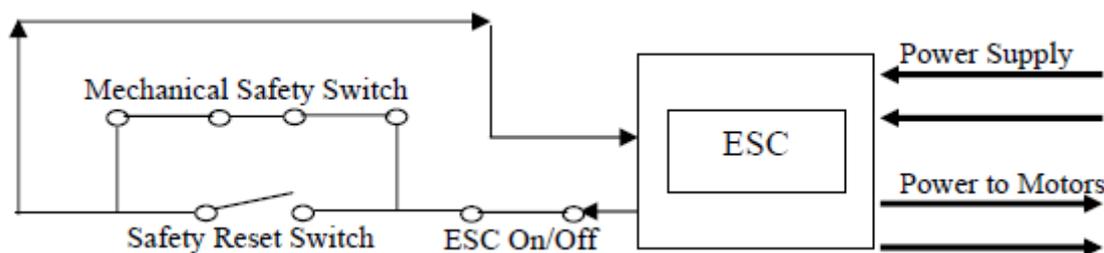


Рисунок 4.7 – Схема контролю безпеки

Як видно на схемі, регулятор швидкості вимикається, якщо контур розмикається, що призведе до розриву живлення двигуна постійного струму. Кнопка ввімкнення/вимкнення регулятора швидкості має бути завжди увімкнена, і залежно від статусу додаткових перемикачів контур розмикається або замикається. Для постійного живлення двигунів постійного струму контур має бути замкнутим. Механічні перемикачі не проводять, коли вони активовані, і функція перемикача безпечного скидання змінюється. Це дає змогу відновити живлення, якщо трапиться ситуація, і керувати ним вручну.

4.4 Тестування

Було проведено два випробування розробленої системи, спочатку в лабораторні, а потім на полі. Випробування в лабораторних умовах проводилися здебільшого для завершення остаточної компенсації, де ми могли проводити випробування лише в азимутальній площині. Управління різними площинами працює більш-менш однаково завдяки схожій передачі з однаковими двигунами постійного струму. Маючи це на увазі, ми адаптували керування площиною місця таким же чином, як і для площини азимута. Одна річ, яку ми не змогли змодельовати в безеховій камері, — це максимальна швидкість, яку БПЛА має на ближчих відстанях. Пізніше це було випробувано в полі, де БПЛА був змонтований з передавальною антеною та відеокамерою.

4.4.1 Лабораторні тестування

Мета випробувань у лабораторних умовах полягала в тому, щоб нагадувати справжні льотні випробування. Стійка антени була розміщена на диску, що обертається, а в якості передавача використовувалася рупорна антена. Поки диск виводив антену з рівноваги, система горизонтального приводу компенсувала різницю, повертаючи антену в протилежному напрямку. Це було зроблено для

горизонтальної площини. У вертикальній площині антену передавача переміщали вручну, але з таким же результатом, як і для горизонтальної площини.

Для нагадування відстані між БПЛА та антеною було використано два антенуатори для зниження потужності рупорної антени. Для розрахунку теоретичної отриманої потужності на 1 км використовувалася формула Фрііса (2.2).

Знаючи передбачувану отриману потужність на відстані 10 км, ми розраховали передану потужність, яка повинна нагадувати те саме середовище в безеховій камері, використовуючи ту саму формулу (4.2) від Friis. Відстань між передавальною та приймальною антеною в безеховій камері становила чотири метри, а приблизний коефіцієнт посилення передавальної антени становив -10 дБі.

4.4.2 Польові випробування

Останній тест полягав у тому, щоб перевірити, чи може система стеження відслідковувати літаючий БПЛА.

Відеопередавач потужністю 1 Вт з частотою 2,4ГГц був розміщений на невеликому легкому БПЛА. Система стеження була спрямована на БПЛА перед зльотом.

Результати тесту виявилися дуже хорошими; система стеження змогла відстежити БПЛА так само, як і планувалося. Антена стеження задовільно слідувала за БПЛА на великих відстанях (приблизно до 6000 метрів), і було отримано хороший відеосигнал. Єдина проблема полягала в тому, що БПЛА летів на більш близьких відстанях (<~80 метрів) і робив різкі повороти в азимутальній площині з великим кутом місця, тоді БПЛА був втрачений. Це було передбачено через низьку швидкість двигунів постійного струму, і проблема вже була взята до уваги.

ВИСНОВКИ

У роботі було проведено розробку системи відстеження БПЛА з бездротовим каналом на частоті 2,4 ГГц. Загалом можна зробити наступний аналіз проведених конструктивних та схемо технічних рішень.

Щоб можна було відстежувати БПЛА під час польотів в рамках роботи ми обмежились передавачами 2,4 ГГц оскільки ця частота є найбільш розповсюдженою (прийомо-передавачі керування, цифровий відеоканал, WiFi, BlueTooth і т.д.). Через нормативи щодо потужності переданого сигналу та той факт, що дуже потужний передавач споживав би багато енергії, під час розробки використовувався передавач потужністю 10 мВт. Для такого слабкого передавача в приймачі потрібна антена з високим коефіцієнтом підсилення (у цьому випадку рефлекторна антена), щоб виявити переданий сигнал на великій відстані. Щоб мати можливість виявити рух БПЛА, чотири маленькі антени Yagi встановлені навколо фокусної точки дискової антени рефлектора. Потужність отриманого сигналу в чотирьох антенах Yagi буде змінюватися в залежності від того, де передавач (БПЛА) розташований відносно пристрою стеження. Порівнюючи потужність цих сигналів за допомогою мікроконтролера, можна обчислити напрямок БПЛА, і, у свою чергу, антену можна змусити стежити за БПЛА.

Для визначення потужності сигналів використовувалися чотири мікросхеми детектора потужності Linear Technology 5534. Ці мікросхеми виробляють лінійну вихідну напругу постійного струму, що відповідає інтенсивності отриманого радіочастотного сигналу. Виходи постійного струму детекторів потужності підключаються до входів мікроконтролера (обрано Microchip PIC16F877). Рівні оцінюються, і двигуни трекера антени повертаються в потрібний бік.

Також в роботі було розроблено саму механічну конструкцію трекера, яку було виконано дуже міцною, а також розбірною з габаритами, що дозволяють вмістити в багажник автомобіля. Усі деталі конструкції трекера були розроблені в IronCAD®.

Рефлекторна дискова антена є гарним вибором для цього проекту. Перш за все, він має високий коефіцієнт підсилення та спрямованості, що добре підходить для зв'язку один на один з БПЛА. По-друге, це, звичайно, сенсорні антени, розташовані навколо фокусної точки, завдяки чому вся ідея з порівнянням різних сигналів у різних площинах працює та забезпечує правильний баланс у правильному положенні. Однією з проблем використовуваної антени є вага, але якщо зберегти той самий розмір апертури та посилення, рефлекторну антену потрібно буде зробити з іншого, більш легкого матеріалу, що, ймовірно, значно збільшить ціну.

Механічне рішення працює добре, як є, але, звичайно, є покращення, які можна зробити.

Недоліком конструкції є вага, при загальній вазі в 23 кілограми впоратися з нею не дуже просто. Але все ж він не може бути занадто легким, оскільки міцна стабільність має велике значення. Декілька простих удосконалень, які можна зробити, це використання легшої нижньої пластини та основного обертового диска. Це можна легко здійснити, видаливши «невикористаний» матеріал цих частин. Але найкращим рішенням було б, щоб ці деталі також були зроблені з алюмінію, оскільки ДСП також дуже чутливі до води, і поганий вибір для зовнішнього використання.

Пристрій працює задовільно, але через втрати чутливість знижується. Це пов'язано з тим, що є втрати в кількох місцях ланцюга (від антени до мікросхеми детектора живлення). По-перше, використовувані кабелі не підходять для частоти 2,41 ГГц, виміряні втрати від кабелю між антеною та платою детектора потужності становлять -2,4 дБ. Іншою втратою, якої неможливо уникнути, є загасання -2 дБ від смугового фільтра, плюс невеликі втрати на доріжці $50 Q$ на платі детектора потужності роблять загальні втрати близько 5 дБ. Ці втрати критичні через зниження чутливості системи визначення потужності від -63 дБм до -58 дБм.

Ще однією частиною, яку можна покращити, є чутливість мікросхеми детектора потужності. Це робиться шляхом зміни пасивного компонента на вході мікросхеми детектора потужності. Через те, що у нас було лише 4 мікросхеми детектора потужності для роботи, ми не хотіли ризикувати робочою схемою,

запропонованою Linear Technology, власною, можливо, кращою чи гіршою. Маючи це на увазі, ми вибрали схему Linear Technology -63 дБм.

Найбільшою проблемою цієї системи є проблема відстеження БПЛА на коротких відстанях через високу передачу двигунів постійного струму. Двигуни разом із регуляторами швидкості, які використовувалися в цьому проекті, були далеко не ідеальними для своєї мети, оскільки діапазон швидкості двигунів був недостатньо великим. Це призводить до ривків, коли БПЛА знаходиться далеко, і на менших відстанях він може не встигати за ним.

Найкоротша відстань від пристрою стеження, на якому БПЛА може пролетіти в перпендикулярному напрямку зі швидкістю 20 м/с, становить приблизно 80 метрів по горизонталі. Це розраховується на основі максимальної швидкості, з якою двигуни можуть обертати пристрій, що також здавалося приблизно правильною відстанню під час реальних тестових польотів.

Ще одна річ, яку можна покращити, це регулятори швидкості. Антена-стійка тепер рухається швидше в одному напрямку. Це тому, що потужність для різних напрямків неоднакова. Напрямок назад має меншу потужність, ніж напрямок вперед; це, мабуть, хороша ідея для моделей човнів, але не ідеальне рішення для пристроїв відстеження.

Програмне забезпечення працює добре, але є місце для вдосконалення. Ймовірно, можна було б зробити багато оптимізацій, щоб заощадити пам'ять, але оскільки програма наразі компілюється менше 2 КБ, не було докладено великих зусиль для зменшення використання пам'яті.

Ймовірно, алгоритм керування також можна було б покращити.

Іншою річчю, яка покращила б функцію пристрою відстеження, був би алгоритм автоматичної компенсації для компенсації помилки логарифмічної реакції в детекторах потужності при дуже слабкому прийомі сигналу (нижче -55 дБм).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1 Rade, Lennart. Westergren, Bertil. (2001). Посібник з математики для науки та техніки ВЕТА. 4: видання. Лунд: Студентська література. ISBN 91-44-00839-2

2 Jenvey, Stewart. Антени та формули поширення, матеріал курсу, LTU course code SME122 (2004).

3 Jenvey, Stewart. (2002). Antennas and Propagation, course material, LTU course code SME122 (2004).

4 Hertley, Rick. RF/Microwave PC Board Design and Layout. URL: <http://www.jlab.org/accel/eecad/pdf/050rfdesign.pdf>

5 I-Laboratory. Coplanar Waveguide with Ground Calculator URL: http://wwwI.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/cpw_g_e.htm

6 Nordling, Carl. Osterman, Jonny. (1980, 1999). Довідник з фізики для науки та техніки. 6-е видання. Lund: Studentlitteratur. ISBN 91-44-00823-6

7 Microchip PIC 16F877 DataSheet URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30292c.pdf>

8 Leslie, Martin. Example Programs. URL: <http://cermics.enpc.fr/~ts/C/EXAMPLES/>

ДОДАТОК А – ПРЕЗЕНТАЦІЯ