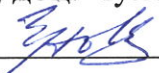


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЦИНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

УДК 621.37

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри
комп'ютерних технологій у
медицині та телекомунікаціях
к.т.н., доц. Чухов В.В.

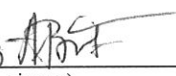

« 19 » 12 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Дослідження антенного трекера FPV дрона

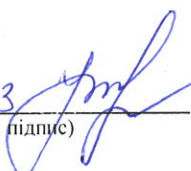
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
освітній ступінь «магістр»

Виконавець роботи
студентка 2 курсу, гр. ЗТРм-22-1

19.12.2023 
(дата, підпис)

Коваль М. В.

Керівник роботи
к.т.н., доц.

19.12.2023 
(дата, підпис)

Дубина О.Ф./
Нікітчук

Житомир
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЦИНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему

Дослідження антенного трекера FPV дрона

Виконала: студентка 2 курсу,
групи ЗТРм-22-1 спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Коваль М.

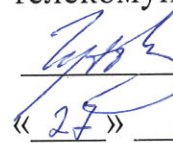
Керівник Дубина О.В./

Нікітчук Т.М.

Рецензент Андреев О.В.

«Затверджено»

Завідувач кафедри комп'ютерних
технологій у медицині та
телекомунікаціях

 Владислав ЧУХОВ
« 27 » 10 2022 р.

Завдання на кваліфікаційну магістерську роботу

Коваль Марія Василівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження антенного трекера FPV дрона

затверджено наказом по університету від «__» _____ 202_ р. № _____

2. Мета дослідження Розроблення та виготовлення діючого макету антенного трекера безпілотного літального апарату FPV

3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.)
Тип БПЛА: Серія DJI Phantom, серія DJI Mavic, FPV БПЛА з відеолінком діапазону 5.8 ГГц

4. Основні задачі дослідження

1. Розроблення структурної та функціональної схем трекера

2. Обґрунтування вибору функціональних елементів трекера

3. Розрахунок приймальної антени трекера

4. Розроблення алгоритму та ПЗ для функціонування трекера

5. Побудова діючого макету трекера

6. Проведення експериментального дослідження трекера

5. Термін подання роботи до захисту грудень 2023 р.

6. Дата видачі завдання « 27 » 10 2022 р.

Науковий керівник

Завдання прийняв
до виконання

(підпис)

(підпис)

Дубина О.Ф./Нікітчук

(прізвище, ініціали)

Коваль М.В.

(прізвище, ініціали)

Як пристрій керування *обґрунтовано* вибір плати прототипування Arduino Uno. Напруги, що пропорційні RSSI в кожному з двох приймальних каналів подаються на два канали АЦП плати Arduino Uno. Отримані цифрові значення RSSI порівнюються та виробляється сигнал керування, що передається на сервопривод з вбудованого в Arduino Uno генератора сигналу з широтно-імпульсною модуляцією.

Антенна система, що закріплена на платформі, складається з двох приймальних антен, взаємне розміщення яких відповідає вимогам побудови пеленгатора за методом порівняння амплітуд – суміщені фазові та рознесені горизонтально на ширину діаграми спрямованості амплітудні центри.

Вибір типу приймальних антен залежить від виду поляризації, характеристик спрямованості, забезпечення робочого діапазону частот. До таких антен можуть бути віднесені спіральні, директорні, патч-антени.

Для побудови антенної системи антенного трекера FPV-БпЛА *обґрунтовано* вибір фабричних приймальних патч-антен, що задовольняють вказані вище вимоги. Крім того, патч-антені властива міцність та компактність конструкції, що дає додаткові переваги їх використання в складі мобільного наземного пункту керування в польових умовах.

Слід відмітити, що наведена структура антенного трекера актуальна для роботи на дальностях до дрона, що суттєво перевищують висоту його польоту. Для менших дальностей необхідно додати кутомісцевий канал пеленгації, що не відрізняється ані апаратно, ані програмно від азимутального. Це дозволить організувати трекінг FPV-БпЛА у всій верхній полусфері на любых доступних до пеленгації дальностях дії БпЛА.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна магістерська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку посилань, додатку. Сторінок основного тексту 40, 17 рисунків, 2 таблиці, 4 сторінки додатків. Перелік посилань містить 10 найменувань.

У першому розділі розроблені структурна та функціональна схеми антенного трекера, а також обґрунтовано вибір методу пеленгації.

Другій розділ присвячено розрахунку та моделюванню антени трекера.

У третьому розділі синтезовано алгоритм роботи антенного трекера та розроблений програмний код блоку обчислення координат та управління.

У четвертому розділі показані особливості побудови макету трекера та проведено аналіз результатів його експериментальних досліджень.

ЗМІСТ

1 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМ ТРЕКЕРА.....	11
1.1 Розроблення структурної схеми трекера.....	11
1.2 Обґрунтування вибору методу пеленгації	12
1.3 Обґрунтування вибору апаратних складових структурних елементів трекера.....	16
1.3.1 Обґрунтування вибору типу виконуючого силового приводу	16
1.3.2 Обґрунтування вибору типу блоку обчислення координат та управління	20
1.3.3 Обґрунтування вибору типу приймальної антени	22
1.4 Розроблення функціональної схеми трекера.....	24
2 РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ АНТЕНИ ТРЕКЕРА	27
2.1 Розрахунок антени трекера.....	27
2.2 Моделювання антени у середовищі електромагнітної симуляції FEKO.....	30
2.2.1 Основний функціонал програмного середовища FEKO	30
2.2.2 Аналіз результатів моделювання розрахованої антени.....	31
3 АЛГОРИТМ РОБОТИ АНТЕННОГО ТРЕКЕРА ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЛОКУ ОБЧИСЛЕННЯ КООРДИНАТ ТА УПРАВЛІННЯ	35
3.1 Розроблення алгоритму роботи трекера.....	35
3.2 Аналіз необхідних бібліотек та прикладів програм середовища розробки Arduino IDE та розроблення програмного забезпечення БОКУ.....	37
4 ПОБУДОВА МАКЕТУ АНТЕННОГО ТРЕКЕРА ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЙОГО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	40
ВИСНОВКИ.....	44
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	45
ДОДАТОК – Текст коду програмного забезпечення БОКУ.....	46

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АЦП – аналого-цифровий перетворювач/перетворювання
- БОКУ – блок обчислення координат та управління
- БпАК – безпілотний авіаційний комплекс
- БпЛА – безпілотний літальний апарат
- ДВ – джерело випромінювання
- ДС – діаграма спрямованості
- ЕПР – ефективна поверхня розсіювання
- ЗГС – за годинниковою стрілкою
- КППО – колова поляризація правого обертання
- КПЛО – колова поляризація лівого обертання
- НВЧ – надвисокі частоти
- ООС – операція об'єднаних сил
- ОПП – опорно-поворотна платформа
- РПрП – радіоприймальний пристрій
- РЕБ – радіоелектронна боротьба
- РТЗ – радіотехнічний засіб
- ШИМ – широтно-імпульсна модуляція
- FPV – First Person View (вид від першої особи)
- IDE – Integrated Development Environment (інтегроване середовище розробки)
- RSSI – received signal strength indicator (показник рівня прийнятого сигналу)

ВСТУП

Сьогодні спостерігається зростання потреб у безпілотних літальних апаратах (БпЛА) з різними можливостями як для цивільного, так і для військового застосування. Існує значний інтерес до розробки нових БпЛА, що можуть пересуватись автономно в різних умовах та виконувати різноманітні місії. В останні десять років широкому спектру застосування дронів приділялась суттєва увага, що призвело до винайдення різних типів БпЛА з різними розмірами та масою. Все різноманіття існуючих дронів сьогодні класифіковане [1] за зоною польотів (в приміщенні, поза приміщенням), відношенні до військової справи (військові, цивільні). Військові та цивільні відповідно поділені за задачами, що вони виконують. Також БпЛА класифіковані за дальністю дії, масогабаритними параметрами, типом двигуна.

Розвиток технологій побудови дронів відбувається в тому числі і в напрямку вдосконалення використовуваних ними бортових та наземних радіотехнічних засобів (РТЗ) – радіозв'язку, радіонавігації, радіолокації та ін., що разом із БпЛА формують безпілотний авіаційний комплекс (БпАК). В залежності від призначення, параметри РТЗ безпосередньо впливають на загальні характеристики та тактичні параметри БпАК.

БпЛА зазвичай обладнані системою відеопілотування (FPV). На дроні встановлюється курсова камера, відео з якої транслюється з бортового передавача на наземний приймач пілота. Пілот керує БпЛА у реальному масштабі часу, спостерігаючи відео на моніторі або у FPV-окулярах.

Антенна дрона неспрямована, оскільки його положення відносно пілота може постійно змінюватись.

Цю особливість системи відеопілотування можливо використати для виявлення, пеленгації та супроводження БпЛА – трекінга. Трекінг БпЛА дозволяє автоматично орієнтувати спрямовані наземні приймальні антени в бік БпЛА, що дозволяє суттєво збільшити дальність зв'язку та підвищити його стабільність. Крім того, у випадку трекінга небезпечного БпЛА, можливо організувати заходи протидії, наприклад, орієнтувати спрямовану антену

засобу радіоелектронної боротьби. Отже, тема роботи, присвячена розробці пеленгатора-автоматичного антенного трекара є актуальною.

Метою роботи є створення діючого макету трекара (пристрою пеленгації та автоматичного супроводження) безпілотних літальних апаратів, що оснащені системою відеопілотування.

Об'єкт дослідження – відеолінк FPV БпЛА.

Предмет дослідження – пеленгація FPV БпЛА за сигналами відеолінку.

Для досягнення вказаної мети необхідно розв'язати наступні завдання:

1. Розроблення структурної та функціональної схеми трекара, обґрунтування вибору функціональних елементів.
2. Розрахунок приймальної антени трекара.
3. Розроблення алгоритму роботи трекара та програмного забезпечення для його функціонування.
4. Виготовлення діючого макету та його експериментальне дослідження.

Для виконання поставлених завдань прийняті наступні умови та обмеження:

1. Тип сигналу, що випромінюється джерелом – аналоговий неперервний частотно-модульований сигнал стандартної системи відеопілотування в діапазоні 5.8 ГГц (5645...5945 МГц) .
2. Кутові координати джерела випромінювання, що підлягають вимірюванню – азимут. Вважати, що віддалення дрону від позиції пеленгатора – значне. Це обумовлює невеликі можливі межі зміни кута місця дрону.

РОЗДІЛ 1

РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМ ТРЕКЕРА

1.1 Розроблення структурної схеми трекера

Структура пристрою повинна починатись з приймальної антенної системи, що здатна реалізувати обраний метод пеленгації із заданою точністю.

Очевидно, сигнал з антени повинен бути прийнятий. Одже, наступним елементом структури повинен бути радіоприймальний пристрій.

В роботі поставлене завдання розроблення автоматизованого антенного трекера, що передбачає обертання спрямованої антени у напрямку джерела радіовипромінювання (ДРВ). Тому, сигнал з радіоприймального пристрою повинен надаватись на деякий блок обчислення координат та управління (БОКУ). На цей блок покладемо задачу обчислення/вимірювання кутових координат ДРВ за обраним методом пеленгації. Крім того, БОКУ повинен виконувати функцію управління виконуючим механізмом опорно-повертальної платформи (ОПП) для повертання антенної системи у напрямку ДРВ. Згідно із обмеженням, прийнятим в роботі, пеленгатор має визначити тільки азимут ДРВ, а трекер спрямувати за цим азимутом приймальну антенну систему.

Отже, останнім елементом структури має бути сама антенно-поворотна платформа, на якій встановлена антенна система.

Легко зрозуміти, що структура пеленгатора-трекера замкнена, тобто володіє зворотним зв'язком для вирішення задачі автоматичного обертання антени у напрямку ДРВ. Так, антена виконує функцію просторової селекції ДРВ, сигнал з антени поступає на радіоприймальний пристрій в якому підсилюється та перетворюється у вигляд, потрібний БОКУ для обчислення або вимірювання азимуту. Далі БОКУ подає команду управління на виконавчий силовий привід опорно-поворотної платформи, що в свою чергу спрямовує антенну систему у напрямку ДРВ.

Таким чином, структурна схема трекера набуває вигляду, наведеного на рис. 1.1

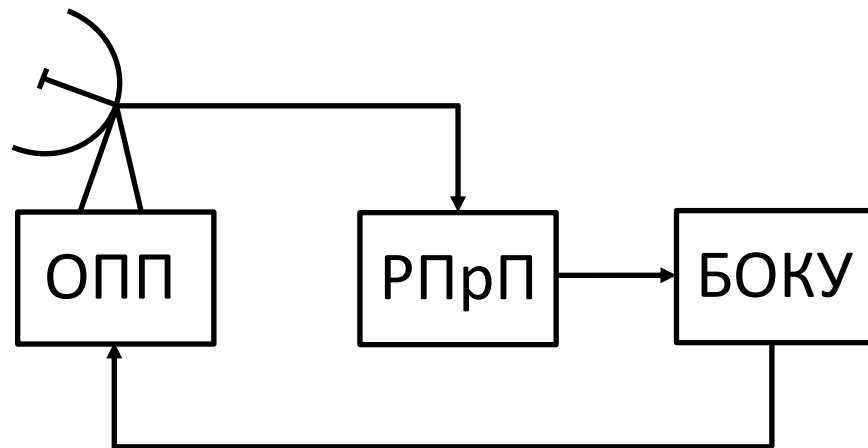


Рисунок 1.1 – Структурна схема антенного трекера ДРВ сигналів систем відеопілотування

Наступним кроком у розробленні трекера є визначення методу пеленгації, що визначить особливості функціонування та подальший вибір складових структурних елементів.

1.2 Обґрунтування вибору методу пеленгації

Вище було показано, що для визначення координат дрону, що є джерелом випромінювання радіосигналів відеолінку доцільно використовувати пасивний метод пеленгації. Додатковою тактичною перевагою такого методу є скритність функціонування на відміну від активної радіолокації, оскільки радіолокатор сам є джерелом радіовипромінювання та може бути викритий за знищений.

Відомі методи пеленгації класифікуються за кількістю каналів та параметром сигналу, в якому закладено інформацію про кутові координати джерела радіовипромінювання [2]:

амплітудні (одноканальні, двоканальні та багатоканальні);

фазові (двоканальні та багатоканальні).

Комбіновані методи:

амплітудно-фазові (багатоканальні);

амплітудно-частотні (двоканальні);

фазово-частотні (багатоканальні).

Коротка характеристика методів, та врахування умов та обмежень прийнятих у завданні на виконання роботи дозволять обґрунтувати вибір методу пеленгації.

Амплітудний одноканальний метод пеленгації інакше називають методом максимуму. Принцип визначення координат полягає у організації огляду сектора простору (або колового огляду) шляхом механічного обертання спрямованої антени в межах цього сектору та виміру амплітуди прийнятих сигналів. Максимум амплітуди, зафіксований за певним напрямком дозволить визначити кутову координату джерела радіовипромінювання.

До переваги цього методу відносять його умовну простоту реалізації, а недоліком є значна помилка визначення кутової координати, обумовлена низькою крутизною пеленгаційної характеристики в районі напрямку на максимум діаграми спрямованості (ДС) антени [2].

Суттєво підвищити точність пеленгації амплітудним методом можливо, застосувавши другий незалежний канал прийому, що ідентичний першому. Фазові центри ідентичних приймальних антен повинні бути суміщені, а амплітудні – рознесені на певний кут. Зазвичай цей кут дорівнює ширині ДС однієї антени.

За двоканальною схемою реалізують такі різновиди амплітудних методів:

метод мінімуму;

сумарно-різницевий метод;

метод порівняння амплітуд.

Якщо розглядати вказані методи через призму поставленого завдання, то метод мінімуму, очевидно, підходить найменше, оскільки на виході такого

пеленгатора в момент найбільш точного визначення кутової координати сигнал відеолінку відсутній.

Сумарно-різнецевий метод, як відомо, потребує для реалізації більших апаратурних витрат, ніж метод порівняння амплітуд за подібних характеристик точності.

Фазовий двоканальний метод пеленгації заснований на вимірюванні різниці фаз двох сигналів з виходів двох ідентичних каналів прийому. Антени фазового пеленгатора – ідентичні та рознесені на величину бази. Амплітудні центри антен фазового пеленгатора суміщені у дальній зоні, а фазові – рознесені. Різниця фаз прийнятих сигналів однозначно пов'язана з напрямком приходу сигналу від ДРВ.

До недоліків фазових пеленгаторів відносять виникнення неоднозначності визначення кутової координати у випадку, якщо відношення бази до довжини хвилі більше 0.5. Для розв'язання цієї неоднозначності застосовують вимірювання на різних шкалах, тобто для різних відношень бази до довжини хвилі. Це призводить до апаратурних ускладнень.

Багатоканальні фазові вимірювачі кутових координат володіють найкращими характеристиками точності, мають можливість бути застосованими із різноманітними алгоритмами, у тому числі адаптивними, реалізовувати електронне сканування ДС. Однак, їх розроблення пов'язане з суттєвими складностями та апаратурними витратами, тому виходить за рамки цієї роботи.

Таким чином, найбільш прийнятним методом пеленгації для розв'язання поставленого завдання виглядає метод порівняння амплітуд, або рівносигнальний метод.

Покажемо далі, що цей метод можливо реалізувати за допомогою широко розповсюджених радіоприймальних пристроїв (РПрП) FPV.

Аналіз ринку FPV радіоприймачів [3, 4] показав наявність фабричних двоканальних РПрП.

Вдалим прикладом є FPV приймач RC540R компанії QUANUM. РПрП обладнаний двома незалежними каналами, двома SMA конекторами для

підключення антен, двома 3.5 мм AV-виходами, роз'ємом живлення, мініатюрним LCD-екраном та багатопозиційною кнопкою для керування (рис. 1.2) [5].



Рисунок 1.2 – Радіоприймальний пристрій сигналів систем Відеопілотування QUANUM RC540R

Технічні характеристики приймача RC540R наведені у таблиці 1.1 [5].

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики РПрП QUANUM RC540R

Характеристика	Значення
Кількість частотних каналів прийому	40
Діапазон робочих частот	5645...5945 МГц
Режими роботи	Diversity, незалежний, аналізатор спектру
Підтримка форматів відео	PAL, NTSC
Напруга живлення	6...18 В постійної напруги
Споживання електроенергії	120 мА за 12 В

Чутливість приймального каналу	95 дБм
Габарити	75x62x17 мм
Маса	100 г

Два незалежних канали прийому використовуються для роботи у режимі Diversity, в якому демодульоване відео на вихід пристрою поступає з того каналу, рівень сигналу в якому вищий. Крім того, приймач може працювати у режимі незалежного приймання сигналів двома різними каналами. Саме цей режим роботи є цікавим для розв'язання поставленої в роботі задачі, оскільки приймач володіє алгоритмом визначення рівня сигналу, на вході кожного з двох каналів. Інформація про рівні сигналу в каналах прийому (RSSI – received signal strength indicator) є ключовою для застосування методу порівняння амплітуд з метою визначення напрямку приходу сигналу.

Таким чином, для розв'язання задачі пеленгації методом порівняння амплітуд, використаємо фабричний примач QUANUM RC540R.

Наступними кроками оберемо тип виконуючого силового приводу у складі опорно-поворотного пристрою, тип блоку обчислення координат та управління а також тип антени, що входить до складу двоканальної антенної системи пеленгатора. Обґрунтований вибір цих елементів надасть можливість побудувати функціональну схему пеленгатора.

1.3 Обґрунтування вибору апаратних складових структурних елементів трекера

1.3.1 Обґрунтування вибору типу виконуючого силового приводу

Як виконуючий пристрій системи управління антени розглянемо крокові електродвигуни та сервоприводи.

Кроковий електродвигун – це синхронний безщітковий двигун з декількома обмотками, в якому струм, що подається в одну з обмоток,

викликає фіксацію ротора. Послідовна активація обмоток викликає дискретні кутові переміщення (кроки) ротора.

До переваг крокових електродвигунів слід віднести можливість точного позиціонування без організації додаткового зворотного зв'язку, а відповідно – меншу вартість ніж у сервоприводів.

До недоліків крокових електродвигунів відносять:

суттєве зниження моменту при підвищенні швидкості обертання ротора;

можливість проковзування ротора при перевищенні навантаження, або невірно налаштованій програмі управління.

Сервопривод – це пристрій, що має у своєму складі датчик кута повороту вихідного валу та схему управління, що забезпечує обертання валу на потрібний кут. Інакше кажучи, сервопривод є автоматичним точним виконавцем. Отримуючи на вхід значення параметра управління (кут обертання), він прагне створити та підтримати це значення на виході виконуючого елемента.

Склад сервопривода:

електромотор з редуктором;

датчик обертання вихідного валу;

схема управління.

Для керування сервоприводами, як правило, використовують мікроконтролер, що формує сигнал керування у вигляді сишгналу з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

Перевагами сервоприводів перед кроковими двигунами є:

відсутність особливих вимог до редукторів – вони можуть бути практично любого типу та потужності, на відміну від крокових двигунів, що є низькошвидкісними та малопотужними;

автоматична компенсація люфтів та поступового зносу привода, теплового розширення привода;

більша можлива швидкість переміщення привода.

Недоліками сервоприводів є:

наявність додаткового елемента – датчика;

складність блоку управління;

вища за крокові двигуни вартість.

Враховуючи сказане вище, як виконуючий елемент пристрою управління антеною, доцільно обрати сервопривод.

Для побудови макету пеленгатора обрано серійний сервопривод DS3115MG. Вказаний сервопривод володеє наступними технічними характеристиками (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики сервоприводу

Характеристика	Значення
Механічний кут обертання, град.	360
Кут керованого обертання, град	180
Тип управління	сигнал з ШІМ
Частота імпульсів управління, Гц	50...330
Діапазон ширини імпульсів для керування, мкс	500...2500
Значення ширини імпульсів для середнього положення валу, мкс	1500
Робоча напруга, В	4.8 ... 7.2
Швидкість обертання, об/хв за живлення 4.8 В за живлення 6.0 В	750 857
Обертаючий момент, кгс×см за живлення 4.8 В за живлення 6.0 В за живлення 7.2 В	13.5 15 17
Габарити, мм	40.5×20.2×38
Маса, г	65

З таблиці 1.2 видно, що для керування сервоприводом використовується сигнал з широтно-імпульсною модуляцією.

Принцип роботи сервоприводів серії DSXXXXMG полягає у наступному. На контакт керування подаються імпульси із заданою амплітудою до 5 В, частотою 50...330 Гц та шириною 500...2500 мкс. Крім того, на сервопривод подається електроживлення. В залежності від ширини імпульсів, вал сервопривода повертається на пропорційний кут. Синхронно з валом всередині сервопривода обертається вал датчика повороту – доти, доки значення ширини імпульсів на виході датчика не зрівняється зі значенням ширини імпульсів на вході контакту керування сервопривода.

Таким чином, для вказаного сервопривода кути обертання пов'язані з шириною імпульсів вхідного сигналу. Так, наприклад, для азимутального DS3115MG, нульовому положенню валу (нулю за азимутом) відповідає ширина імпульсів 500 мкс, 90° – 1500 мкс, 180° – 2500 мкс.

Зовнішній вигляд обраного сервопривода показаний на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Сервопривод DS3115MG

Отже, в ході подальшої роботи оберемо тип блоку управління сервоприводом DS3115MG.

1.3.2 Обґрунтування вибору типу блоку обчислення координат та управління

Блок обчислення координат повинен виконувати дві основних функції:

1. Порівняння двох амплітуд сигналів, що надходять з двох каналів РПрП.
2. Формування сигналу керування сервоприводом для обертання антенної системи у бік “слабшого” сигналу.

Вибір пристрою здійснимо, враховуючи властивості обраного виконавчого пристрою – сервоприводу з керуванням за допомогою ШІМ.

Вище було сказано, що управління сервоприводами здійснюється зазвичай за допомогою мікроконтролерів.

Серед відомих програмно-апаратних платформ прототипування найкраще описаною, вивченою, поширеною та зручною є платформа Arduino.

Arduino – це електронна платформа, заснована на легкому у використанні програмному та апаратному забезпеченні. Плата Arduino може зчитувати інформацію на вході та перетворювати її у інформацію на виході. Для цього платі необхідно передати певні інструкції на мікроконтролер, що входить до її складу. Допоміжним інструментом у цьому є інтегроване середовище розробки – Arduino IDE на базі C-подібної мови програмування Wiring [6].

Необхідними інтерфейсами для розв’язання поставленої задачі володіє плата Arduino UNO – поширений представник сімейства плат Arduino (рис. 1.4).

Виходи вбудованого
генератора ШІМ

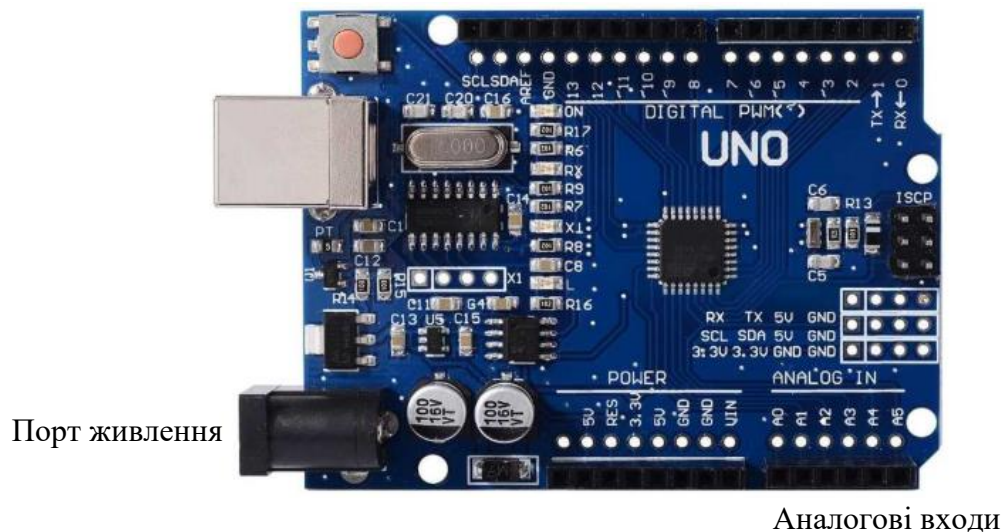


Рисунок 1.4 – Плата Arduino UNO r3

По перше – плата обладнана декількома аналоговими входами та аналого-цифровими перетворювачами (АЦП). Це дозволяє отримати оцифровані напруги, що пропорційні рівням (RSSI) прийнятих обома каналами приймача сигналів з відповідних виходів приймача. Подальше програмне порівняння RSSI, дозволяє сформувати команду управління сервоприводом для обертання антенної системи.

По друге – плата обладнана вбудованими генераторами сигналів з ШІМ, що дозволяє керувати сервоприводом.

По третє – середовище розробки Arduino IDE має бібліотечні функції для керування сервоприводом [6].

По четверте – середовище розробки має у складі обширну базу прикладів програм, до яких входить також приклад програми керування сервоприводом, а також приклад програми з організації примання на аналогові входи напруг та подальшого їх оцифровування. Наявність такої бази суттєво полегшує розробку необхідних програм у середовищі Arduino IDE.

1.3.3 Обґрунтування вибіру типу приймальної антени

Вище було сказано, що антенна система амплітудного рівносигнального пеленгатора повинна складатись з двох ідентичних спрямованих антен.

Вибір типу антени обумовлюється декількома чинниками:

діапазоном частот;

смугою робочих частот;

характером перешкодової обстановки;

простотою та надійністю конструкції.

У діапазоні 5.8 ГГц сигнал може відбиватись від місцевих предметів (бідівлі, дерева, земля та ін.). Це зумовлює багатошляховість його поширення та ускладнює перешкодову обстановку.

Традиційно антена дрона – неспрямована, з лінійною поляризацією (дипольна, штирєва), або коловою (лист клевера, пагода).

Відмінності між принципами розповсюдження радіохвиль з лінійною та коловою поляризаціями наведені на рис. 1.5.

Штирєва антена – найдешевша та найнадійніша, але лінійна поляризація радіохвилі – не є найкращім варіантом у FPV, оскільки приймальна антена з лінійною поляризацією приймає як прямий сигнал з дрону так і усі відбиті від місцевих предметів сигнали. Крім того, маневрування дрону може призвести до втрат сигналу, якщо площини поляризацій передавальної та приймальної антен не будуть паралельними.

Разом з тим, на відкритому просторі без фізичних перешкод антени з лінійною поляризацією забезпечує найбільшу дальність, оскільки вся енергія радіохвиль буде розміщена в одній площині.

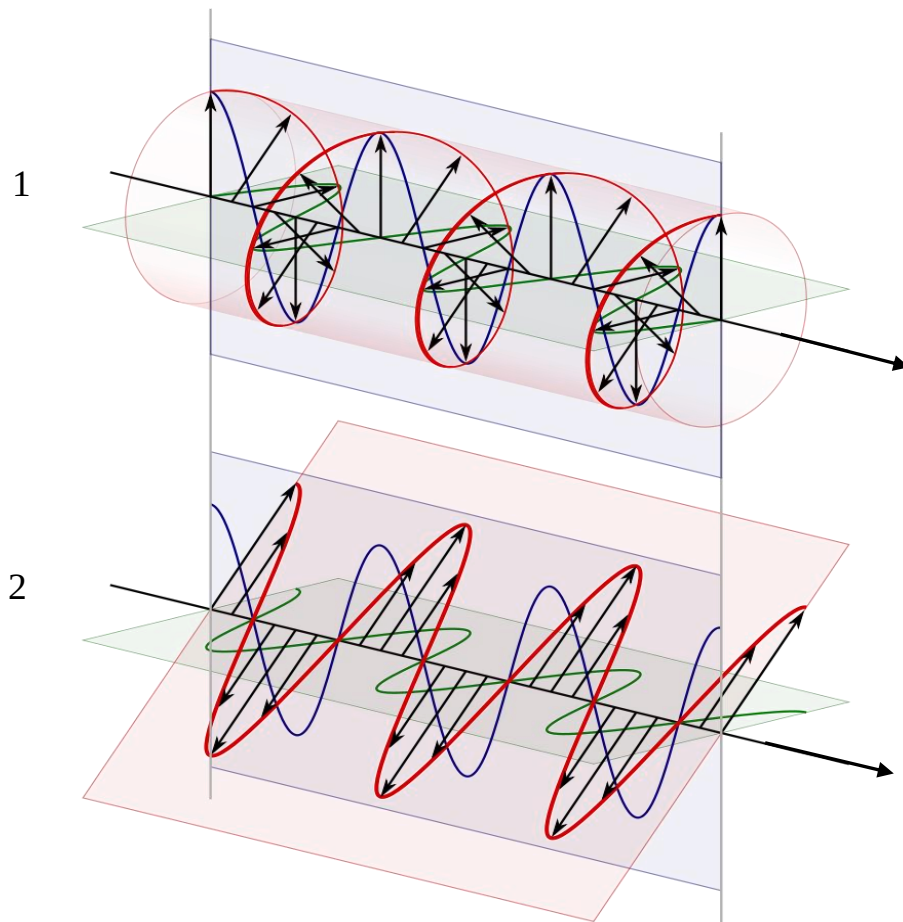


Рисунок 1.5 – Колова (1) та лінійна (2) поляризація радіохвилі

Антени з коловою поляризацією характеризуються напрямком обертання вектора напруженості електричного поля за напрямком поширення радіохвилі – антени колової поляризації правого обертання та лівого обертання (КППО, КПЛО).

Приймальна та передавальна антени колової поляризації повинні мати однакові напрямки обертання поляризації.

Антени з коловою поляризацією володіють наступною перевагою – вони “відсікають” відбитий сигнал. Це дозволяє успішно долати багатошляховість поширення сигналу від дрона до наземного приймача, приймаючи лише прямий сигнал від дрона та фільтруючі решту сигналів, відбитих від місцевих предметів.

До спрямованих антен колової поляризації відносять:
спіральні;

патч-антени.

Антени типу “лист клевера” – є неспрямованими, а антени типу ”пагода” – слабкоспрямованими.

Зовнішній вигляд патч-антени та спіральної антени для FPV, що присутні на ринку [3, 4] наведний на рис. 1.6.



Патч антена $G=8\text{дБ}$

Спиральна антена $G=16\text{дБ}$



Рисунок 1.6 – Патч та спіральна антени для FPV на 5.8 ГГц
з коефіцієнтами підсилення 8 дБ та 16 дБ відповідно

Серед розглянутих типів антен спіральна має перевагу у простоті виготовлення та настроювання.

Таким чином, в антенній системі амплітудного рівносигнального пеленгатора застосовано спіральні антени.

1.4 Розроблення функціональної схеми антенного трекера

Функціонування трекера відбувається наступним чином:

1. З двох ідентичних спіральних антен, рознесених горизонтально на ширину ДС, сигнали поступають на входи двох незалежних каналів FPV приймача.

2. В кожному каналі приймача вимірюється рівень прийнятого сигналу. У відповідності до рівня сигналу у кожному каналі формується напруга, що подається на відповідний вихід РПрП.

3. З вказаних двох виходів напруга подається на два аналогові входи плати Arduino UNO.

4. Плата Arduino UNO за допомогою вбудованих АЦП оцифровує виміряні напруги, порівнює отримані значення та формує параметри сигналу з ШІМ з шириною імпульсів, що відповідає куту та напрямку обертання валу сервопривода.

5. Далі вбудований у Arduino генератор сигналу ШІМ передає на сервопривод сигнал на повертання валу у сторону меншого рівня сигналу.

Таким чином відбувається автоматичний пошук рівносигнального напрямку, а антенна система повертається у напрямку джерела випромінювання.

Описані дії, сигнали та напруги покажемо на функціональній схемі, складеній у середовищі Fritzing для більшої наочності (рис. 1.7).

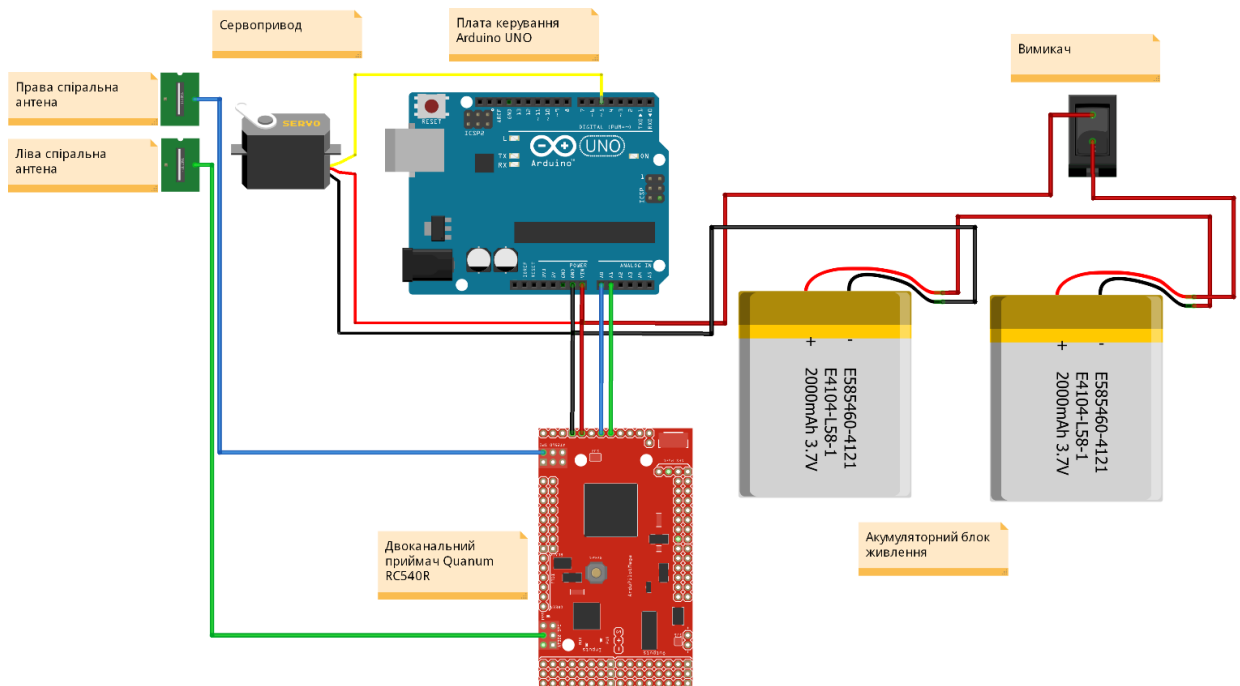


Рисунок 1.7 – функціональна схема пеленгатора

Вказана схема доповнена акумуляторним блоком живлення та вимикачем.

В наступному розділі роботи виконано розрахунок обраної спіральної антени для вирішення поставленого в роботі завдання.

Висновки до розділу

В першому розділі *розроблена* структура антенного трекера.

В ході роботи *обґрунтовано* вибір амплітудного рівносигнального методу пеленгації, виходячи з якого, *обрано* фабричний двоканальний радіоприймальний пристрій для приймання сигналів систем FPV – приймач QUANUM RC540R.

Обґрунтовано вибір складових пеленгатора – антенної системи, блоку обчислення координат та управління, виконуючого силового приводу. Обрані конкретні промислові серійні моделі, виходячи із завдання та логіки роботи трекера.

Розроблено функціональну схему антенного трекера, *обґрунтовано* вибір функціональних елементів.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ АНТЕНИ ТРЕКЕРА

2.1 Розрахунок антени трекера

Принципи побудови спіральних антен та теоретичні засади їх функціонування достатньо повно опрацьовані в літературі [10, 11].

Спіральна антена виготовена з провідника, або металевої стрічки у вигляді циліндричної спіралі, один кінець якої вільний, а інший під'єднаний до центрального провідника коаксиального кабелю. Зовнішній провідник коаксиального кабелю під'єднується до металевого диску, що призначений для послаблення зворотного випромінювання [7, 8].

Спіральні антени бувають:

циліндричні регулярні;

конічні;

багатозаходові.

Циліндричні регулярні антени звичайно мають максимально 12 вітків та володіють коефіцієнтом перекриття за частотою

$$K_{\Pi} = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} \approx 1.7$$

та шириною ДС

$$\Delta\theta_{0.5P} = 30^\circ \dots 40^\circ [7, 8].$$

Конічні спіральні антени володіють більшим коефіцієнтом перекриття $K_{\Pi} \approx 2 \dots 3$, але менш спрямовані за регулярні [7, 8].

Багатозаходові спіральні антени володіють ще більшим коефіцієнтом перекриття [7, 8].

За умов поставленого завдання, пеленгатор повинен ефективно працювати в діапазоні 5.8 ГГц (5645...5945 МГц). Саме таким діапазоном робочих частот володіє обраний у другому розділі FPV приймач QUANUM RC540R. Отже, необхідно забезпечити діапазон перекриття за частотою

$$K_{\Pi} = \frac{5945 \text{ МГц}}{5645 \text{ МГц}} \approx 1.05.$$

Розрахований діапазон перекриття можливо забезпечити регулярною спіральною антеною. Зовнішній вигляд такої антени та її конструктивні параметри наведені на рис. 2.1.

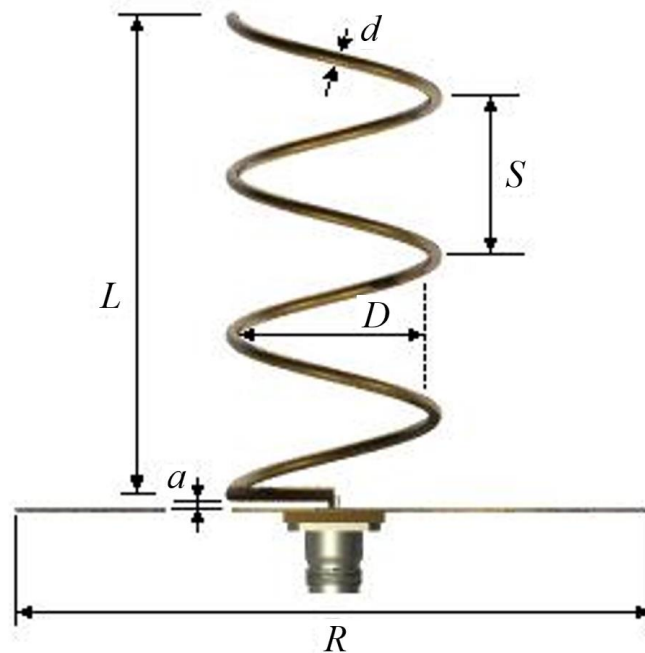


Рисунок 2.1 – Регулярна спіральна антена та її конструктивні параметри:

N – кількість вітків;

L – довжина спіралі;

R – діаметр екрану;

D – діаметр витка;

S – крок витка;

d – діаметр провідника

a – відстань від спіралі до екрану,

обумовлена з'єднанням з конектором

З [7, 8] відомий вплив конструктивних параметрів на характеристики та параметри антени.

Ширина ДС регулярної циліндричної спіральної антени може бути визначена за виразом [8]:

$$\Delta\theta_{0.5P} = \frac{52^\circ}{\frac{\pi D}{\lambda} \sqrt{\frac{N \cdot S}{\lambda}}} \quad (2.1)$$

Відомо, що для забезпечення вісьового випромінювання (вздовж спіралі) необхідно обрати діаметр витка [8].

Крок витка обирається таким, щоби кут нахилу витка до поперечної площини спіралі становив $12^\circ \dots 16^\circ$ [8].

Нехай кількість вітків

$$N = 5;$$

нехай також

$$D = 0.35\lambda = 18.1 \text{ мм};$$

кут нахилу спіралі оберемо 15° , тоді

$$S = 11.8 \text{ мм}.$$

Розраховане значення ширини ДС дорівнюватиме

$$\Delta\theta_{0.5P} = 44.3^\circ;$$

довжина спіралі дорівнюватиме

$$L = N \cdot S = 5 \cdot 11.8 \text{ мм} = 59 \text{ мм};$$

діаметр провідника для виготовлення антени оберемо рівним

$$d = 1 \text{ мм};$$

діаметр круглого екрану дорівнюватиме

$$R \approx 0.62\lambda = 32 \text{ мм}.$$

Таким чином, розраховані конструктивні параметри спіральної регулярної циліндричної антени цілком можуть бути використані для побудови діючого макету антенного трекара.

Однак, для більш повного дослідження антени необхідно провести дослідження її моделі у смізі частот 5645...5945 МГц.

2.2 Моделювання антени у середовищі електромагнітної симуляції FEKO

2.2.1 Основний функціонал програмного середовища FEKO

Програма FEKO має потужну систему креслення складних тривимірних конструкцій надвисоких частот (НВЧ) та розрахунк їх декількома методами [9]:

- базовий метод моментів;
- методи геометричної та фізичної оптики;
- метод кінцевих елементів;
- мультипольовий метод.

Програма складається з декількох частин.

Перша частина – CADFEKO – система автоматичного проектування антен та конструкцій НВЧ з широким функціоналом, що включає:

- креслення за допомогою 3D примітивів;
- креслення двомірних форм;
- креслення викривлених форм;
- перевірку коректності геометрії антени;
- застосування властивостей матеріалів та середовища;
- моделювання джерел та їх потужності;
- моделювання землі та її впливу;
- розрахунок поля у ближній та дальній зонах;
- розрахунок поглинання у середовищі.

Друга частина – POSTFEKO – програма постпроцесорної обробки даних, що дозволяє:

- досліджувати модель у смузі частот;
- створювати 2D та 3D візуалізацію різних характеристик антен;
- створювати анімацію 2D та 3D даних.

Третя частина – програма оптимізації – дозволяє проводити автоматичну зміну геометрії НВЧ-структури на користь обраного параметру.

2.2.2 Аналіз результатів моделювання розрахованої антени

Розраховані вище конструктивні параметри спіральної антени були використані для побудови її моделі за допомогою середовища CADFEKO. Для побудови спіралі було використано графічний 3D примітив “Спіраль” із заданим кроком, діаметром, довжиною, кількістю вітків та товщиною провідника. До спіралі додано круглий металевий екран відповідних розмірів. Також в моделі задано місце підключення спіралі до коаксиального кабелю та параметри кабелю. Для застосування розрахунку поля у дальній зоні до моделі було застосовано операцію розбиття на елементарні чарунки.

Зовнішній вигляд вікна CADFEKO показаний на рис. 2.2, а на рис. 2.3 наведена модель у збільшеному масштабі.

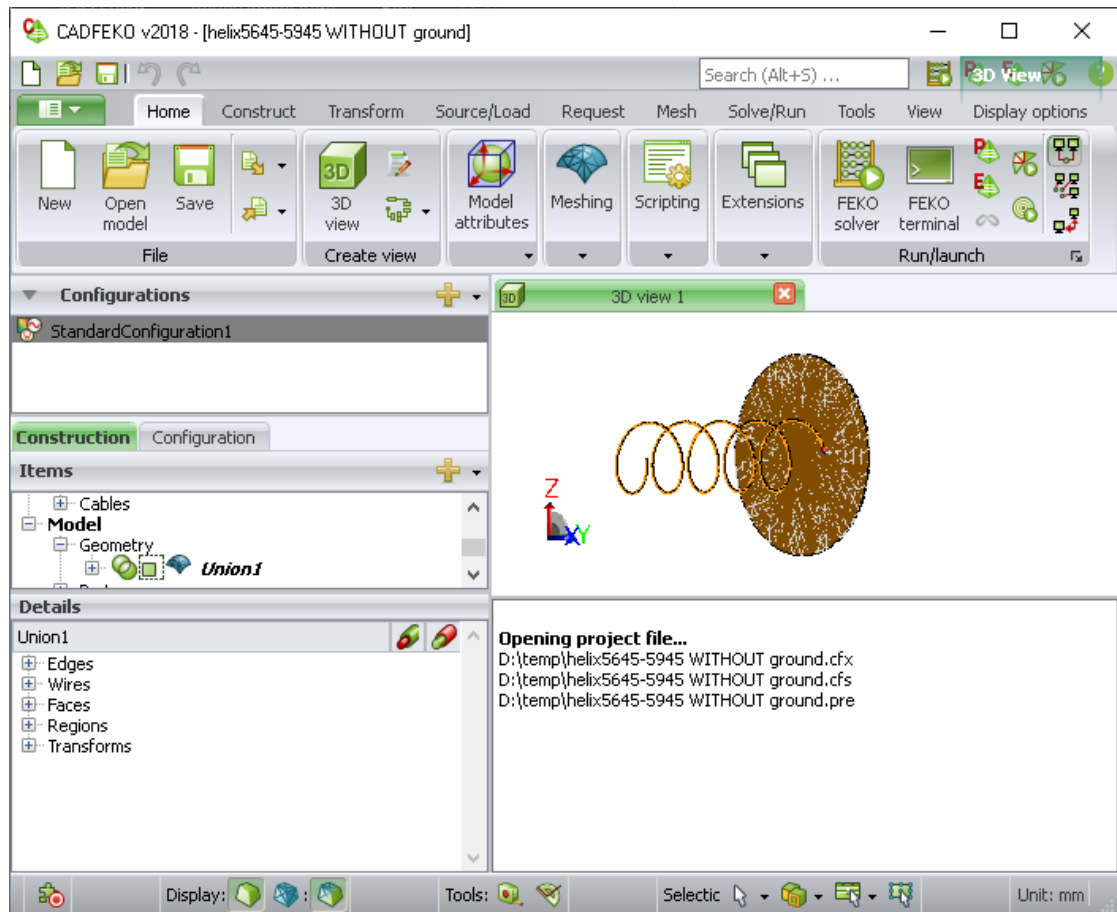


Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд моделі розрахованої у вікні CADFEKO

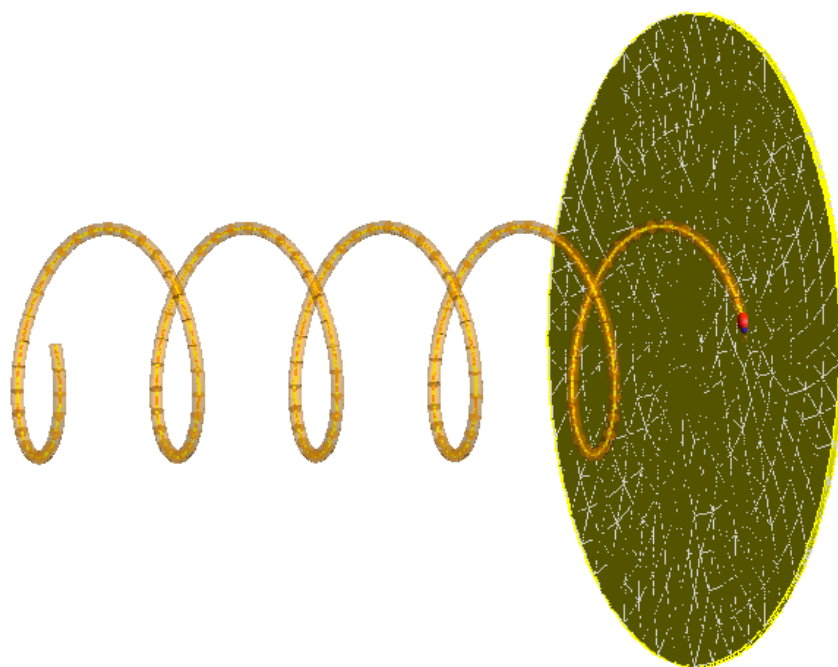


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд моделі розрахованої антени

Після розрахунку моделі за допомогою інструментів CADFEKO стає доступною постпроцесорна обробка результатів обчислення у програмі POSTFEKO.

На рис. 2.4. наведені діаграми спрямованості модельованої спіральної антени без урахування та з урахуванням впливу землі.

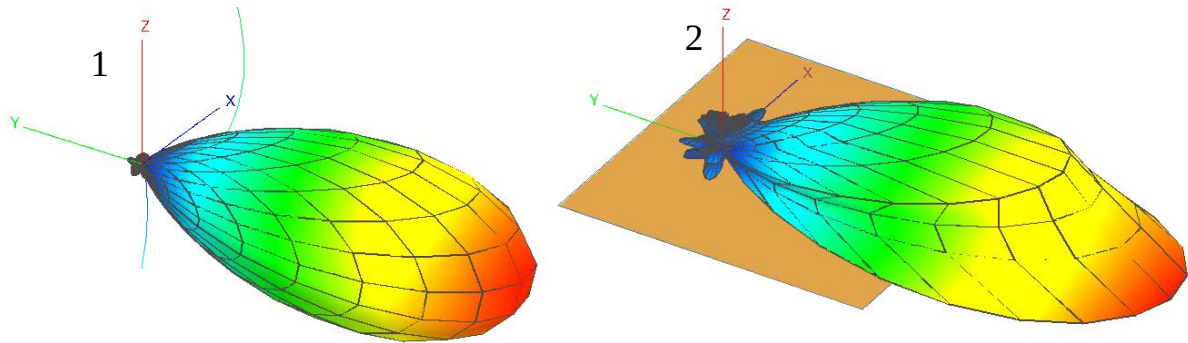


Рисунок 2.4 – Тривимірний вигляд ДС моделі спіральної антени у вільному просторі (1) та з урахуванням впливу землі (2)

Як видно з рис. 2.3, антена має праву колову поляризацію. На рис. 2.5 показані ДС по відношенню до приймання хвиль правої та лівої поляризації.

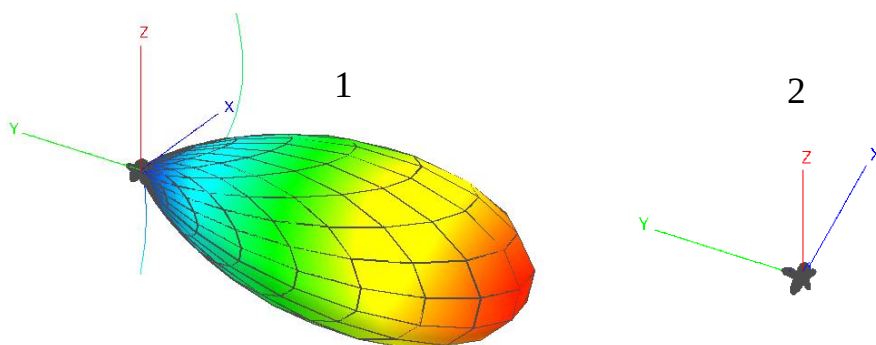


Рисунок 3.5 – ДС моделі спіральної антени, що приймає хвилю правої кругової поляризації (1) та лівої кругової поляризації (2)

З рис. 3.5 видно, що розрахована спіральна антена “відсікає” радіохвилі лівої поляризації, що свідчить про правильність розрахунків та прийнятих технічних рішень.

За допомогою POSTFEKO визначене значення коефіцієнта підсилення модельованої антени на рівні 12.5 дБ, що не суперечить теоретичним відомостям. Ширина ДС моделі склала близько 45° , що також корелюється з розрахованим вище значенням.

Висновки до розділу

У другому розділі за відомою методикою *розраховано* конструкцію обраної спіральної антени, що входить до складу антенної системи трекера.

Для підтвердження теоретичних розрахунків, а також розширеного дослідження розрахованої антени *проведено її моделювання* у середовищі електромагнітної симуляції FEKO.

Розглянуті основні можливості програми FEKO, а також *проаналізовані* результати моделювання.

Показано, що параметри та характеристики моделі цілком відповідають розрахованим.

РОЗДІЛ 3

АЛГОРИТМ РОБОТИ АНТЕННОГО ТРЕКЕРА ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЛОКУ ОБЧИСЛЕННЯ КООРДИНАТ ТА УПРАВЛІННЯ

3.1 Розроблення алгоритму роботи антенного трекера

Алгоритм роботи антенного трекера, виходячи з міркування, що фактично трекер керується за допомогою БОКУ, можливо визначити наступними кроками.

Перший крок: паркування антени за увімкнення живлення. Паркування передбачає повертання антени у початкове кутове положення. Зручним початковим кутовим положенням антени є напрямок на північ, $\alpha = 0^\circ$.

Другий крок: здійснення пошуку сигналів відеолінку у смузі частот.

Третій крок: подання напруг, пропорційних виміряним приймачем RC540R рівням прийнятих сигналів RSSI з обох каналів на аналогові входи плати Arduino UNO.

Четвертий крок: виконання аналогово-цифрового перетворення напруг.

П'ятий крок: порівняння значень напруг.

Шостий крок – перевірка умови $RSSI_{\text{лівого каналу}} < RSSI_{\text{правого каналу}}$.

Якщо умова виконується – сформувати команду повертання валу сервоприводу за годинниковою стрілкою (ЗГС) на 1° ,

інакше – сформувати команду повертання валу сервоприводу за годинниковою стрілкою на 1° .

Сьомий крок: запам'ятати поточне значення азимуту.

Восьмий крок: передача сформованої команди сервоприводу.

Наступний крок: передача наступних значень виміряних FPV приймачем значень RSSI у плату Arduino UNO, тобто, тут цикл роботи повинен бути замкнений.

Робота трекера продовжується у циклі доти, поки на нього подане живлення.

Блок-схема алгоритму роботи наведена на рис. 3.1.

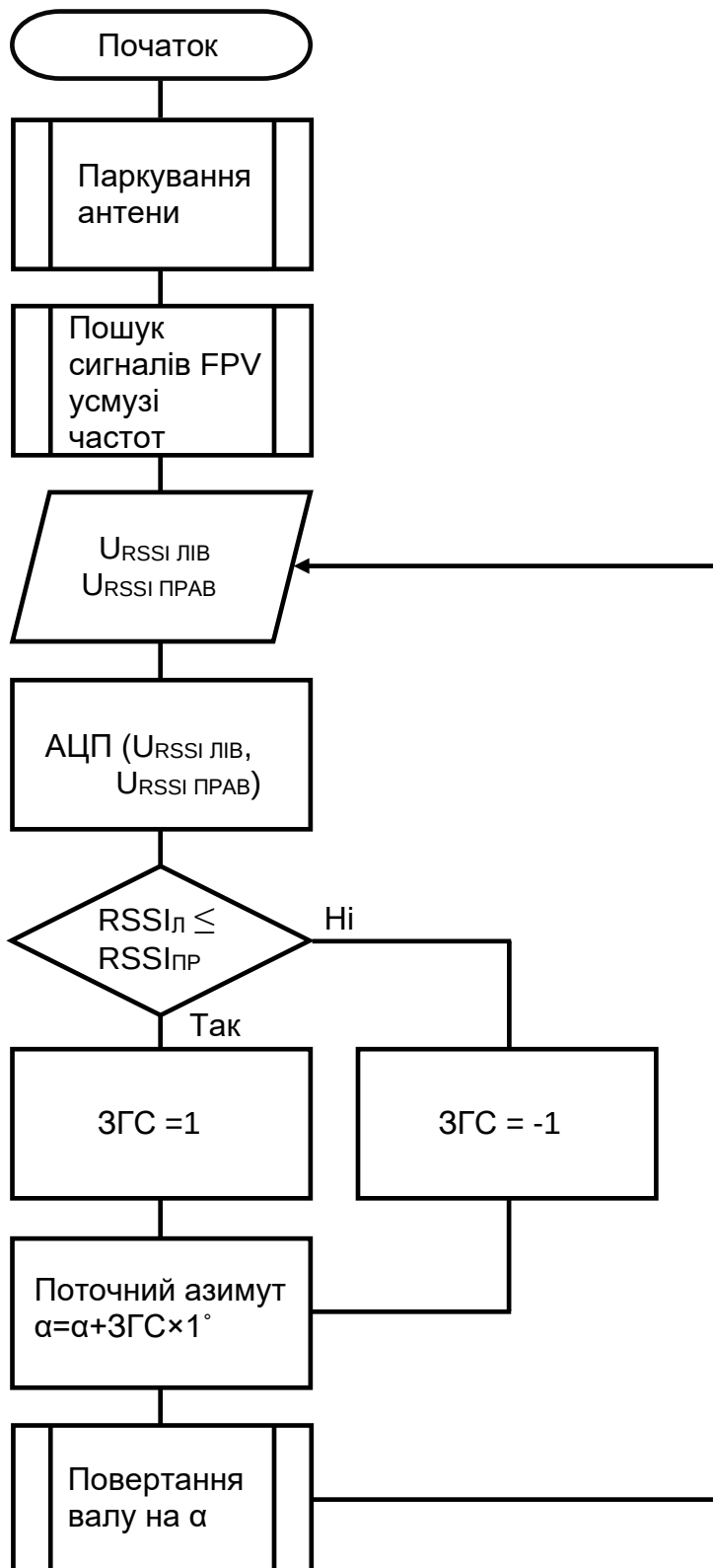


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму роботи антенного трекера

Особливістю алгоритму є відсутність на блок-схемі блоку “кінець”, так як закінчення роботи пеленгатора відбувається після відключення живлення.

3.2 Аналіз необхідних бібліотек та прикладів програм середовища розробки Arduino IDE та розроблення програмного забезпечення БОКУ

Принцип програмування у C-подібних програмних середовищах, до яких відноситься Arduino IDE полягає у використанні бібліотечних функцій, що надаються розробником. Програмний код бібліотечних функцій розміщений на жорсткому диску у папці Library та включається у основне тіло програми компілятором автоматично на етапі компіляції. Описи синтаксису таких функцій знаходиться у заголовкових файлах та включаються у програму на етапі редагування коду самим програмістом за допомогою оператора include.

Решта функцій, що не є стандартними, створюються безпосередньо програмістом у редакторі коду середовища Arduino IDE.

Для роботи з сервоприводом Arduino IDE має стандартну бібліотеку, функції якої описані у заголовковому файлі Servo.h:

attach() – закріплення сервопривода за певним цифровим виходом плати;
write() – запис значення кута на сервопривод, що активує обертання валу на заданий кут;

read() – зчитування значення кута з сервопривода.

detach() – відкріплення сервоприводу від певного цифрового виходу;

writeMicroseconds() – запис значення ширини імпульсів сигналу ШІМ на сервопривод, що активує обертання валу на відповідний кут.

Розглянемо стандартний приклад управління сервоприводом:

```
#include <Servo.h> - включення бібліотечного файлу до коду програми
Servo myservo; // створення об'єкту myservo
int pos = 0; // змінна для збереження позиції сервопривода
void setup() // стандартна функція мови Wiring. Визначає початкові
налаштування
{
    myservo.attach(9); // закріплення сервопривода myservo за цифровим
виходом №9
```

```

}
void loop() // стандартна функція мови Wiring. Основний цикл програми
{
  for(pos = 0; pos <= 180; pos += 1) // зміна позиції від 0° до 180° з кроком 1°
  {
    myservo.write(pos); // повертання валу сервопривода на вказану позицію
    delay(15); // Очікування 15 мс. для відпрацюв. сервоприводом
    повороту
  }
  for(pos = 180; pos >= 0; pos -= 1) // зміна позиції від 0° до 180° з кроком 1°
  {
    myservo.write(pos); // повертання валу сервопривода на вказану позицію
    delay(15); // Очікування 15 мілісекунд для відпрацювання сервоприводом
    повороту
  }
}

```

У цьому прикладі вал сервопривода безперервно обертається від 0° до 180° та у зворотному напрямку. Під'єднаний до плати та до блока живлення сервопривод активується після подання живлення на плату Arduino та деактивується при припиненні живлення плати.

На основі розглянутих функцій та прикладів була розроблена програма для функціонування БОКУ за розробленим алгоритмом.

Код програми наведений у додатку.

Висновки до розділу

В третьому розділі *синтезовано* та *пояснено* алгоритм роботи трекера. Алгоритм передбачає:

- передачу до БОКУ напруг, пропорційних прийнятим сигналам у двох каналах прийому;

- формування у БОКУ сигналу на обертання валу сервопривода в залежності від співвідношення цих напруг;

виконання сервоприводом повороту валу відповідно до сигналу від БОКУ.

Розглянуті основні принципи програмування у інтегрованому середовищі розробки Arduino IDE.

На основі розробленого алгоритму за допомогою Arduino IDE *розроблено* програмний код для плати Arduino UNO.

РОЗДІЛ 4

ПОБУДОВА МАКЕТУ АНТЕННОГО ТРЕКЕРА ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЙОГО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Макет трекера було побудовано в два етапи.

На першому етапі макет було вирішено обладнати рухомими (поворотними) антенами, що дозволило змінювати кут взаємного розстроювання антен від рівносигнального напрямку.

За допомогою системи твердотільного 3D моделювання Tinkercad [10] були створені 3D моделі корпусу та елементів кріплення (рис. 4.1), які в подальшому були виготовлені на 3D принтері. Такий спосіб виготовлення корпусу та кріплення антен є достатньо точним, щоби знизити похибку експериментальних вимірювань, обумовлених недосконалою геометрією конструкції.

Прийняте технічне рішення дозволило експериментально визначити оптимальний кут між антенами, для забезпечення компромісу між чутливістю, точністю пеленгації та початковим кутом огляду. Оптимальним виявилось значення кута у 45° , що не суперечить теоретичним відомостям.

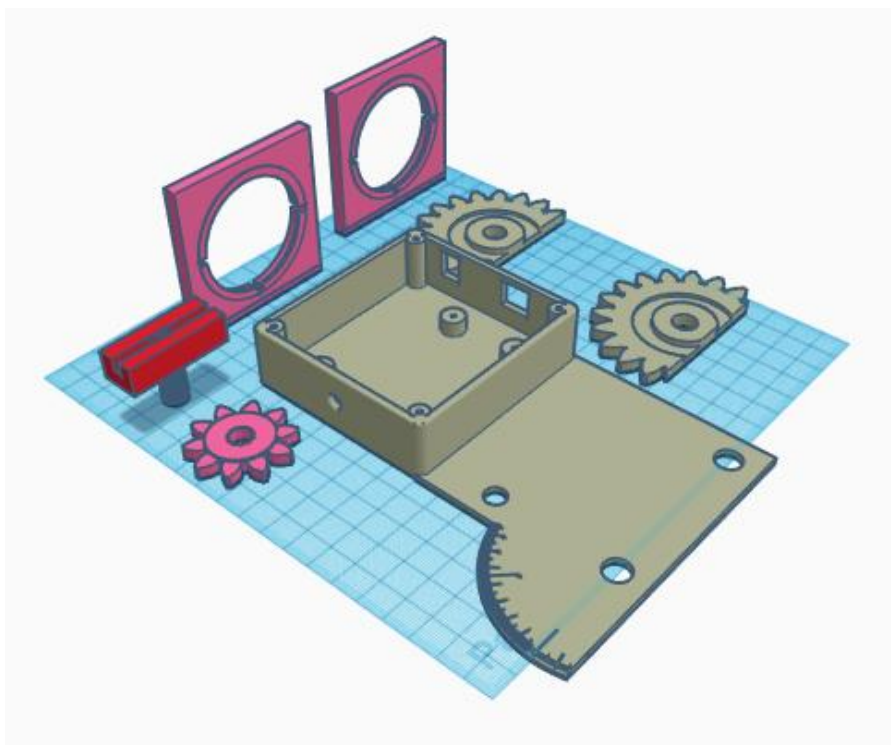


Рисунок 4.1 – 3D модель макету першого етапу

На рис. 4.2 наведено вигляд діючого макету першого етапу.

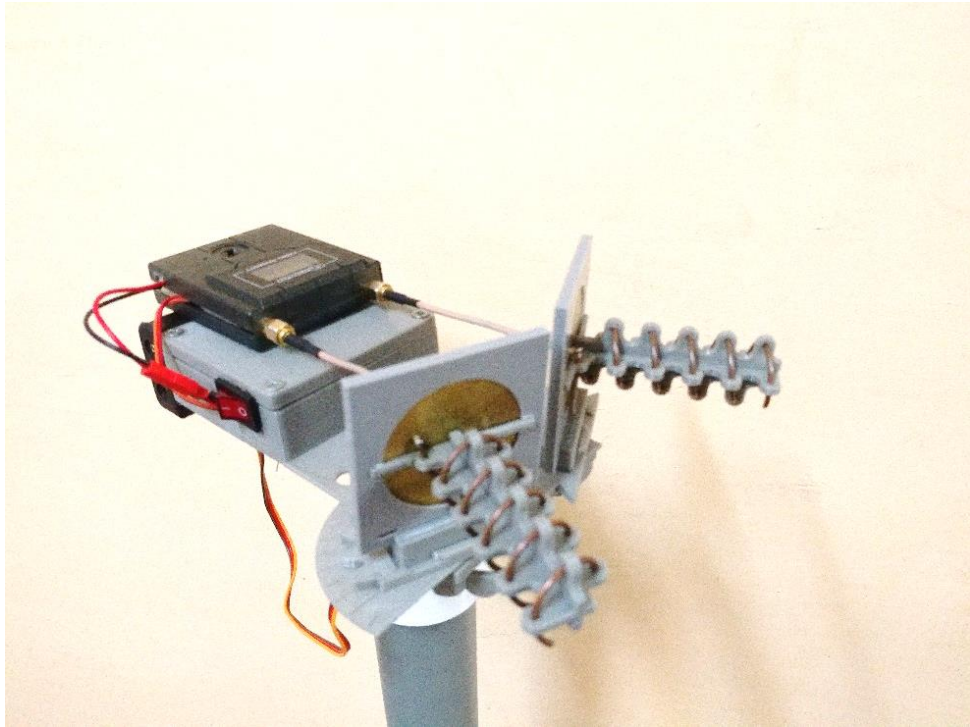


Рисунок 4.2 – Діючий макет першого етапу

На другому етапі було створено 3D модель з жорстким розташуванням антен та більш досконалим закритим корпусом (рис. 4.3).

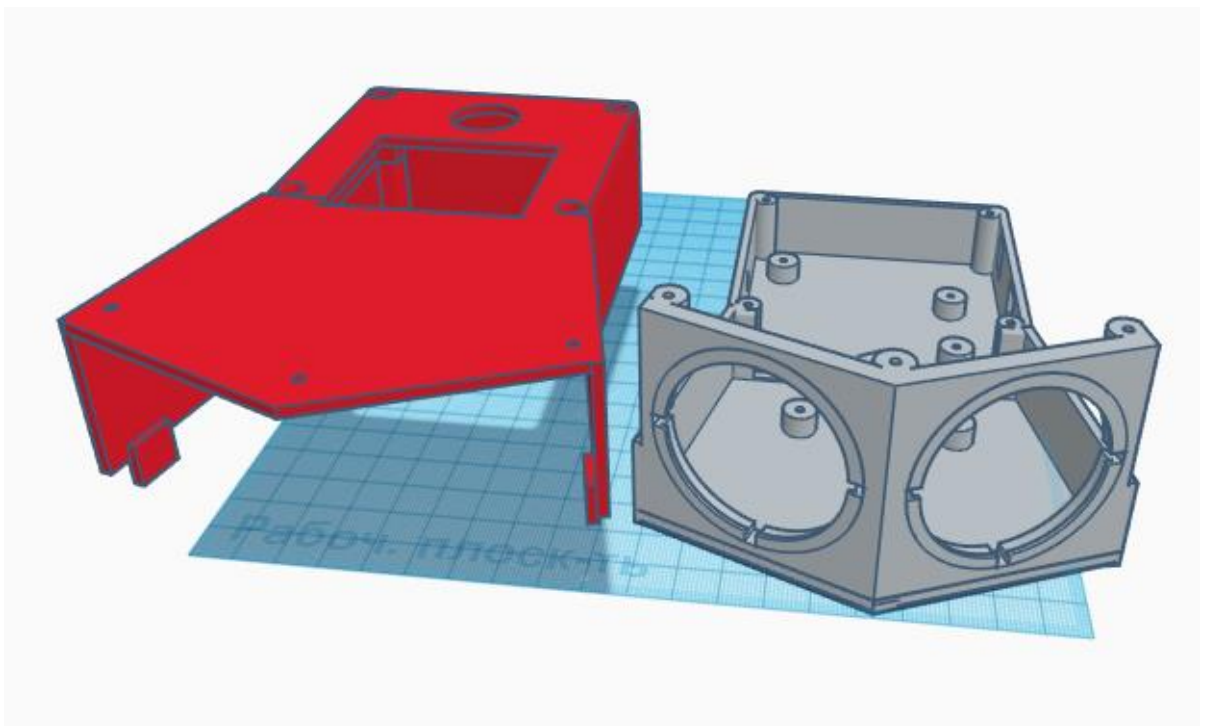


Рисунок 4.3 – 3D модель макету другого етапу

За розробленою 3D моделлю за допомогою 3D принтера було виготовлено діючий макет другого етапу у більш досконалому та жорсткому корпусі з жорстким закріпленням антен (рис. 4.4).



Рисунок 4.4 – Діючий макет другого етапу

Експериментальне дослідження розробленого та виготовленого макету пеленгатора-антенного трекера проводилось у таких польових умовах:

джерелом сигналів системи відеопілотування обрано курсову камеру з радіопередавачем потужністю 25 мВт. Частотно-модульований сигнал випромінювався неспрямованою антеною типу “лист клевера”, що забезпечувала розповсюдження радіохвилі колової поляризації з правим обертанням.

Поширення сигналу відбувалось умовах середньої застройки.

Переміщення ДРВ відбувалось в межах доступної відкритої місцевості за допомогою асистента, що можливо прирівняти до екстремально низького польоту дрону. Така модель ситуації нехарактерна реальному застосуванню

дронів, але дозволяє в певній мірі оцінити здатність трекера виконувати покладені на нього функції.

Експериментальне дослідження в указаних умовах показало наступні результати:

1. Максимальна дальність дії трекера виявлена не була через обмеження наявної відкритої площадки. Але пеленгатор показав надійну роботу та здійснював автоматичний трекінг ДРВ на відстані близько 100 м. Слід зауважити, що дальність дії суттєво залежить від потужності передавача. Потужність передавача сучасних дронів, що здатні долати 3-5 км без втрати зв'язку становить 600 мВт, що у 24 рази більше потужності передавача, застосованого у експерименті.

2. Виміряна похибка визначення азимуту склала $2.5^{\circ} \dots 3^{\circ}$. Зауважимо, що ця похибка суттєво залежить від рівня сигналу, ідентичності та стабільності приймальних каналів.

3. Швидкість реакції трекера (повороту антени) достатня для неперервного автоматичного трекінга ДРВ.

Таким чином, результати експерименту в цілому підтвердили можливість застосування розробленого пристрою для пеленгації та автоматичного трекінгу джерел радіовипромінювання сигналів систем відеопілотування.

Висновки до розділу

У четвертому розділі *визначені* способи та особливості побудови діючого макету антенного трекера.

Показані переваги застосування комп'ютерного твердотілого 3D моделювання з подальшим виготовленням деталей моделі на 3D принтері.

Результати експерименту показали працездатність розробленого пристрою, що *дозволяє зробити висновок* про правильність прийнятих технічних рішень.

ВИСНОВКИ

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язані наступні задачі.

1. *Розроблено* структурну схему антенного трекера, що включає антенну систему та опорно-поворотний пристрій, радіоприймальний пристрій та блок обчислення координат та управління.

2. *Обґрунтовано* метод пеленгації джерел радіовипромінювання сигналів відеолінку FPV БпЛА – амплітудний метод порівняння амплітуд. Вказаний метод пеленгації володіє компромісними апаратурними витратами та достатньою точністю для виконання автоматичного супроводження БпЛА (антенного трекінгу).

3. *Проведено розрахунок та дослідження* моделі приймальної антени трекера.

4. *Розроблено* функціональну схему антенного трекера.

5. *Обґрунтовано* вибір функціональних елементів трекера. Обрано фабричний двоканальний радіоприймальний пристрій, що володіє функціоналом визначення рівня прийнятого сигналу в кожному з приймальних каналів. Як пристрій обчислення координат та управління обґрунтовано вибір плати прототипування з екостеми Arduino. Як виконуючий силовий привод в складі опорно-поворотного пристрою обґрунтовано вибір сервопривода.

6. *Розроблено* алгоритм та програма роботи блоку обчислення координат та управління. Програма базується на бібліотечних функціях Arduino IDE з курування сервоприводом.

7. *Виготовлено* діючий макет антенного трекера FPV БпЛА. Корпус трекера виготовлено шляхом підготовки 3D-макету у середовищі твердотілого моделювання Tinkercad та подальшим друком на 3D-принтері.

8. *Проведено аналіз* результатів експериментального дослідження макету трекера. Аналіз підтвердив теоретичні засади функціонування таких пристроїв та правильність прийнятих технічних рішень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. M. Hassanalian Classifications, applications and design challenges of drones: A review / M. Hassanalian, A. Abdelkefi // Progress in Aerospace Sciences. – 2017. – №91. – С. 99-131.
2. Радіотехнічні системи (Основи проектування. Частина 1) : навч. посіб. / В. М. Кичак, А. Ю. Воловик, М. А. Шутило, О. П. Червак – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 122 с.
3. Fpv receiver. Buy fpv receiver with free shipping [Електронний ресурс] / Banggood Shopping. Banggood – Режим доступу: <https://www.banggood.com/search/fpv-receiver.html> – 16.12.2023 р. - Загол. з екрану.
4. FPV [Електронний ресурс] / Hobbyking – Режим доступу: https://hobbyking.com/en_us/fpv.html – 16.12.2023 р. - Загол. з екрану.
5. Qanum RC540R 5.8GHz 40CH Race Band FPV Diversity Receiver [Електронний ресурс] / Hobbyking – Режим доступу: https://hobbyking.com/en_us/5-8ghz-32ch-8-race-channels-diversity-vrx.html?__store=en_us – 16.12.2023 р. - Загол. з екрану.
6. What is Arduino? Arduino - Home [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction> – 16.12.2023 р. - Загол. з екрану.
7. The ARRL Antenna Book for Radio Communications, 22 Edition, 203 с.,
8. Ільницький Л.Я., Савченко О.Я., Сібрук Л.В. «Антени та пристрої надвисоких частот»: Підручник для ВНЗ/ За ред. Л.Я. Ільницького. – К: Укртелеком, 2003. – 496с.
9. Altair FEKO 2021. User Guide [Електронний ресурс] / Altair – Режим доступу: https://2021.help.altair.com/2021/feko/pdfs/Altair_Feko_User_Guide.pdf – 16.12.2023 р. - Загол. з екрану.
10. Tinkercad | From mind to design in minutes [Електронний ресурс] / Tinkercad – Режим доступу: <https://www.tinkercad.com> – 16.12.2023 р. - Загол. з екрану.

Додаток

Текст програмного коду БОКУ

```

#include <Servo.h>
#include <Timer.h>

#define SIG
#define SIG_SL      1
#define SIG_OFF     4
#define L_RSSI_PIN  0
#define R_RSSI_PIN  1
#define P_SERVO_PIN 5
#define RSSI_OFF_R   0
#define RSSI_OFF_L   0
#define SIGNAL_MAX   400
#define SIGNAL_MIN   120
#define SER_MAX      180
#define SER_MIN       0
#define SER_MAX_ST    5
#define SER_MIN_ST    0.09
#define DBAND         5
#define SERVO_DIR     1
#define FILTER_SIZE   10
#define LAST  FILTER_SIZE - 1

uint16_t rssi_l_array[FILTER_SIZE];
uint16_t rssi_r_array[FILTER_SIZE];

float angleAzimuth = 90;

Timer timer;
Servo servoAzimuth;

void setup() {
    servoAzimuth.attach(P_SERVO_PIN);
    servoAzimuth.write(90);

    // очищення архіву
    for (int i = 0; i < FILTER_SIZE; i++) {
        rssi_l_array[i] = 0;
        rssi_r_array[i] = 0;
    }

    timer.every(50, mainLoop);
    timer.every(5, measureRSSI);
}

void loop() {

    timer.update();

}

void mainLoop() {

    uint16_t avgRight = max(avg(rssi_r_array, FILTER_SIZE) + RSSI_OFF_R, SIGNAL_MIN);
    uint16_t avgLeft  = max(avg(rssi_l_array, FILTER_SIZE) + RSSI_OFF_L, SIGNAL_MIN);
    uint8_t  dynDband = (float)(avgRight+avgLeft)/2-SIGNAL_MIN)/(SIGNAL_MAX-SIGNAL_MIN)*DBAND;

```

```

if (abs(avgRight - avgLeft) < dyndband) {
    return;
}

float ang = 0;

if (avgRight > avgLeft) {

    float x = float(avgRight - avgLeft) / 10;
    x = SER_MAX_ST / (1+ exp(-SIG_SL * x + SIG_OFF));
    ang = x * SERVO_DIR * -1;

}
else {

    float x = float(avgLeft - avgRight) / 10;
    x = SER_MAX_ST / (1+ exp(-SIG_SL * x + SIG_OFF));
    ang = x * SERVO_DIR;

}

// максимальний та мінімальний крок
// кута обертання сервопривода
ang = (abs(ang) > SER_MAX_ST ? SER_MAX_ST * ang/abs(ang) : ang);
ang = (abs(ang) < SER_MIN_ST ? 0 : ang);

// рух сервопривода на кут ang
moveAzimuthBy(ang);
}

void moveAzimuthBy(float angle) {

    angleAzimuth += angle;
    angleAzimuth = limit(SER_MIN, SER_MAX, angleAzimuth);
    servoAzimuth.write(angleAzimuth);
}

void measureRSSI() {

    advanceArray(rssi_l_array, FILTER_SIZE);
    advanceArray(rssi_r_array, FILTER_SIZE);

    rssi_l_array[LAST] = analogRead(L_RSSI_PIN);
    rssi_r_array[LAST] = analogRead(R_RSSI_PIN);
}

uint16_t avg(uint16_t samples[], uint8_t n) {

    uint32_t summ = 0;
    for (uint8_t i = 0; i < n; i++) {
        summ += samples[i];
    }

    return uint16_t(summ / n);
}

```

```
void advanceArray(uint16_t *samples, uint8_t n) {  
  
    for (uint8_t i = 0; i < n - 1; i++) {  
        samples[i] = samples[i + 1];  
    }  
}  
  
float limit(float lowerLimit, float upperLimit, float var) {  
  
    return min(max(var, lowerLimit), upperLimit);  
}
```