

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Удосконалення параметрів FPV-дрону, шляхом оптимізації тракту прийому - передачі в реальному часі»

Виконав: студент 4 курсу, групи 401-ТТ
спеціальності 172 «Телекомунікації та
радіотехніка»
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Сухоробрий О.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Шефер О.В.


(прізвище та ініціали)

Рецензент Лактіонов О.І.

(прізвище та ініціали)

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та
робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти Бакалавр
Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри автоматки,
електроніки та телекомунікацій

 О.В. Шефер

«01» квітня 2024 р.

ЗАВДАННЯ **НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРУ** **СТУДЕНТУ**

Сухороброму Олександр Володимировичу

1. Тема роботи «Удосконалення параметрів FPV-дрону, шляхом оптимізації тракту прийому - передачі в реальному часі»

керівник роботи Шефер Олександр Віталійович, д.т.н., професор
затверджена наказом вищого навчального закладу від 08.12.2023 року
№ 1481/1-фа

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10.06.2024 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Технічна документація на аналоговий комплект FPV-дрона. Провести оптимізацію тракту прийому-передачі FPV-системи. Перевірити оптимізований аналоговий комплект FPV-дрона на якість та стійкість сигналу зв'язку.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ: Актуальність та мета дослідження системи зв'язку FPV-дронів. Розділ 1. Види FPV-дронів, основні елементи та технології. Розділ 2. Основи FPV-систем, їх типи, властивості та параметри. Розділ 3. Методи оптимізації тракту прийому-передачі FPV-систем. Розділ 4. Налаштування та оптимізація системи зв'язку FPV-дрона. Аналіз результатів. Висновки. Оформлення кваліфікаційної роботи та підготовка графічних матеріалів. Формування додатків.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):

- 1) види FPV-дронів;
- 2) огляд FPV-систем;
- 3) діаграма частот 5,8 ГГц в аналогових і цифрових системах FPV;
- 4) діаграма поляризації радіхвиль в FPV-антенах;

- 5) діаграми направленості FPV-антен;
- 6) блок-схема системи зв'язку FPV-комплекту;
- 7) налаштування комплекту FPV-дрону за допомогою ПЗ
- 8) будова FPV антени Cloverleaf;
- 9) будова FPV антени Patch Microstrip Circular;
- 10) тестування оптимізованого FPV-комплекту;
- 11) висновки.

Дата видачі завдання «01» квітня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор №	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Дата	Категорія	Відсоток	
1	Вступ: Актуальність та мета дослідження системи зв'язку FPV-дронів	25.04.24		10%	Пл.1
2	Розділ 1. Види FPV-дронів, основні елементи та технології	25.04.24	I	20%	Пл.2
3	Розділ 2. Основи FPV-систем, їх типи, властивості та параметри	23.05.24		50 %	Пл.3
4	Розділ 3. Методи оптимізації тракту прийому-передачі FPV-систем	23.05.24	II	60%	Пл.4,5,6
5	Розділ 4. Налаштування та оптимізація системи зв'язку FPV-дрона. Аналіз результатів	19.06.24		90%	Пл.7,8,9,10, 11
6	Висновки. Оформлення кваліфікаційної роботи та підготовка графічних матеріалів. Формування додатків.	19.06.24	III	100 %	Пл.12

Студент



(підпис)

Сухоробрий О. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

Шефер О. В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи бакалавра «Удосконалення параметрів FPV-дрону, шляхом оптимізації тракту прийому - передачі в реальному часі»

Робота містить 90 с., 31 рисунок, 2 формули, 6 додатків, 22 джерела.

Ключові слова: FPV, відеопередавач, відеоприймач, патч, ELRS, поляризація, АЦП фільтр, packet rate, телеметрія, diversity.

Предметом дослідження кваліфікаційної роботи є комплект FPV-дрона. Об'єктом дослідження є система прийому-передачі даних FPV-дрону.

Метою роботи є удосконалення параметрів FPV-дрону шляхом оптимізації тракту прийому-передачі в реальному часі, що включає підвищення якості та стійкості сигналу зв'язку.

Оптимізована система зв'язку комплекту FPV-дрона дозволяє не тільки забезпечити потрібні параметри сигналу, а також якісно підвищити надійність функціонування як окремих елементів системи зв'язку, так і комплекту FPV-дрона в цілому.

ABSTRACT

bachelor's thesis "Improving the parameters of FPV-drone by optimizing the real-time reception and transmission path"

The work contains 90 pages, 31 figures, 2 formulas, 6 appendices, 22 sources.

Keywords: FPV, VTX, VRX, patch, ELRS, polarization, ADC filter, packet rate, telem ratio, diversity.

The subject of the qualification work is an FPV drone kit. The object of study is the data transmission system of the FPV drone.

The purpose of the work is to improve the parameters of the FPV drone by optimizing the real-time transmission and reception path, including improving the quality and stability of the communication signal.

The optimized communication system of the FPV drone kit allows not only to provide the required signal parameters but also to qualitatively improve the reliability of the functioning of both individual elements of the communication system and the FPV drone kit as a whole.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

FPV (First Person View) – вид від першої особи, система передачі зображення з камери безпілотною літального апарата в реальному часі

VTX (Video Transmitter) – Відеопередавач, пристрій для передачі відеосигналу з дрона.

VRX (Video Receiver) – Відеоприймач, пристрій для прийому відеосигналу на землі.

PDB (Power Distribution Board) – Плата розподілу живлення, пристрій для розподілу електроенергії до компонентів дрона.

ESC (Electronic Speed Controller) – Електронний регулятор швидкості, пристрій для керування швидкістю обертання моторів.

RHCP (Right Hand Circular Polarization) – Правобічна кругова поляризація, тип поляризації сигналу.

LHCP (Left Hand Circular Polarization) – Лівобічна кругова поляризація, тип поляризації сигналу.

FEC (Forward Error Correction) – Пряме виправлення помилок, метод корекції помилок в переданих даних.

ELRS (ExpressLRS) – Express Long Range System, система для забезпечення надійного зв'язку на великі відстані.

ADC Filter (Analog to Digital Converter Filter) – Фільтр аналогово-цифрового перетворювача.

Packet Rate – Частота пакетів, кількість переданих або прийнятих пакетів даних за одиницю часу.

Telem Ratio (Telemetry Ratio) – Відношення телеметрії, співвідношення між даними телеметрії та іншими переданими даними.

RSSI (Received Signal Strength Indicator) – Індикатор рівня прийнятого сигналу, показник сили отриманого сигналу.

Diversity – використання кількох антен для покращення якості прийому сигналу.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	11
1.1 ВИДИ FPV-ДРОНІВ.....	11
1.1.1 Основні елементи FPV-дронів	12
1.2 ТЕХНОЛОГІЇ FPV-ДРОНІВ	21
1.2.1 Радіолокаційне позиціонування і повернення додому	22
1.2.2 Технологія виявлення перешкод і уникнення зіткнень	22
1.2.3 Патерни руху дронів.....	23
1.2.4 Гіроскопічна стабілізація, ІМУ та польотні контролери.....	24
1.2.5 Створення 3D-карт і моделей.....	24
2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	25
2.1 Система FPV. Властивості та параметри.....	25
2.2 Типи FPV-систем	25
2.3 Радіус дії та проникнення сигналу в FPV-системах	30
2.4 Затримки в FPV-системах	31
2.5 Інтерференція та розпад сигналу в FPV-системах.....	31
3 МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАКТУ ПРИЙОМУ-ПЕРЕДАЧІ FPV-СИСТЕМ.....	34
3.1 Технології зменшення затримки в системах FPV	34
3.2 Оптимізація використання частотного спектра 5,8 ГГц в системах FPV	35
3.3 Усунення електричних перешкод у системі живлення FPV-дронах	36
3.4 Підвищення потужності відеопередавача для збільшення радіусу дії в FPV-системах	37

3.5	Підвищення якості сигналу за рахунок FPV-антен	38
3.6	Розширені технології модуляції у системах FPV.....	42
4	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	44
4.1	Досліджуваний комплект FPV-дрона. Покращення системи зв'язку FPV-дрона	44
4.2	Програмна оптимізація та налаштування FPV комплекту	48
4.2.1	Налаштування контролера FPV-дрона Radiomaster tx12.....	48
4.2.2	Налаштування FPV-дрона GEPRC Cinebot30	50
4.2.3	Налаштування FPV-окуляр Skyzone Cobra SD.....	52
4.3	Апаратна оптимізація та налаштування FPV комплекту.....	52
4.3.1	Розробка Cloverleaf антени для покращення якості зв'язку FPV-дрона	52
4.3.2	Патч антена для покращення прийому сигналу FPV-дрона	53
4.3.3	Оптимальне розміщення антен для мінімізації перешкод і забезпечення найкращої якості сигналу комплекту FPV.	54
4.4	Тестування оптимізованого комплекту FPV-дрона	56
	ВИСНОВКИ	59
	ВИКОРИСТАНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА.....	60
	ДОДАТКИ	62

ВСТУП

У сучасному світі безпілотні літальні апарати (БПЛА), зокрема FPV (First Person View) дрони, відіграють важливу роль у різних сферах діяльності, включаючи зйомку з повітря, спостереження за дорожнім рухом, вантажі, медична допомога, сільське господарство, розваги, хобі, безпека та спостереження, оскільки вони надають багато настроюваних рішень, які поєднують практичність і швидкість.

Технологічне обладнання дронів дозволяє в режимі реального часу контролювати ситуацію в бізнесі будівельної галузі, оперативно аналізувати площу виїмки в гірничодобувній промисловості, точно визначати місця для видобутку та проводити попередню підготовку. В енергетиці та інфраструктурі воно дозволяє визначати місцезнаходження доріг, кабелів та трубопроводів для подальшого планування. Гуманітарні організації використовують дрони для визначення місць розташування таборів, планування транспортних маршрутів та моніторингу діяльності. Це обладнання сприяє швидкій доставці товарів та послуг, а також створенню комунікаційної інфраструктури в районах з високою щільністю забудови або там, де відсутній автомобільний транспорт [1].

Дрони для транспортування виконують важливі завдання з доставки медичних засобів та продуктів харчування на великі відстані під час надзвичайних ситуацій та швидких рятувальних операцій. Вони також використовуються в логістичній галузі для виявлення пошкоджень і тріщин у конструкціях суден, що дозволяє аварійним командам, таким як пожежники, швидко та безпечно втручатися в небезпечні райони. Дрони допомагають вимірювати рівень зносу на маршрутах автомагістралей, перевіряти безпеку мостів, тунелів та інших об'єктів, а також здійснювати внутрішній контроль частково пошкоджених будівель під час стихійних лих [2].

Однією з ключових характеристик FPV-дронів є здатність забезпечувати високоякісну та затримку у передачі відеосигналу в реальному часі між

дроном і пультом керування. Ця особливість є вирішальною для ефективності управління дроном і безпеки польотів.

Важливість оптимізації систем передачі даних в FPV-дронах зумовлена потребою в підвищенні точності та оперативності управління, що є особливо критичним у складних умовах або під час високоскоростних маневрів. Дослідження параметрів системи прийому-передачі може відкрити нові можливості для підвищення якості відеосигналу, зменшення затримок передачі даних та загалом покращення взаємодії між дроном та оператором [1].

Зростання використання комерційних та персональних дронів викликало необхідність прийняття багатьох нормативних актів для запобігання нещасним випадкам та забезпечення управління дронами таким чином, щоб це не становило небезпеки. Незважаючи на те, що багато країн створили правила щодо БПЛА, зростаюче використання дронів призводить до того, що правила постійно змінюються та вводяться нові. Ці правила різняться залежно від країни та регіону. В Україні, відповідно до пункту 4 розділу II Авіаційних правил, необхідно дотримуватись певних обмежень. Заборонено літати ближче 5 км від злітно-посадкових смуг аеродромів або 3 км від майданчиків/вертодромів, якщо це не узгоджено з експлуатантом. Політ повинен виконуватись не ближче 500 м від пілотованих повітряних суден. Заборонено здійснювати польоти над скупченнями людей на відкритому просторі, над місцями щільної забудови чи об'єктами під державною охороною. Максимальна швидкість польоту дроном не повинна перевищувати 160 км/год, а максимальна висота польоту обмежена: 120 м над рівнем земної (водної) поверхні поза спеціальними зонами і 50 м над рівнем земної (водної) поверхні в спеціальних зонах, якщо інформація про статус повітряного простору відсутня [3].

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 ВИДИ FPV-ДРОНІВ

Дрони, класифіковані за класами 250 і 450 відповідно до відстані між двома схрещеними двигунами, поділяються на однороторні (вертолітні), мультироторні (мультикоптер), дрони з нерухомим крилом та гібридні VTOL з нерухомим крилом відповідно до їхньої фізичної структури.

Однороторні дрони є малогабаритними вертольотами, доступними як у паливному, так і в електричному варіантах. Вони мають переваги, такі як підвищена стабільність і здатність до тривалих польотів, але також супроводжуються певними ризиками для безпеки [3].

Мультикоптери є найменшими, найлегшими та найпоширенішими дронами на ринку. Вони мають обмежену дальність польоту, швидкість, висоту та вантажопідйомність. Зазвичай ці дрони використовуються для наземних спостережень і можуть здійснювати польоти до 50 хвилин, несучи невелике навантаження, таке як камера.

Мультикоптери поділяються на чотири основні типи за кількістю моторів.

Трикоптери - дрони з трьома моторами, що можуть злітати та приземлятися вертикально, мають шість ступенів свободи по осях X–Y–Z. Їхня вартість нижча, але вони не симетричні, що є їхнім недоліком.

Квадрокоптери - найпопулярніший тип дронів, оснащений чотирма моторами та чотирма пропелерами. Вони можуть піднімати вантаж до 5 кг і забезпечують високу стабільність польоту завдяки симетричній конструкції.

Гексакоптери - дрони з шістьма моторами, які забезпечують високу продуктивність навіть у приміщеннях. Вони можуть піднімати вантаж до 10 кг

Октокоптери - дрони з вісьмома моторами, здатні піднімати вантаж до 25 кг. Вони використовуються для важких робіт завдяки своїй потужності та надійності [4].

Дрони з нерухомих крилом, на відміну від мультикоптерів, використовують крила, як у звичайного літака, для створення підйомної сили. Вони значно ефективніші, оскільки витрачають енергію лише для руху вперед, що дозволяє їм долати більші відстані та охоплювати більші площі. Деякі моделі на бензиновому двигуні можуть залишатися в повітрі більше 16 годин.

Таким чином, вибір типу дрона залежить від специфічних завдань і вимог до польоту, включаючи вантажопідйомність, дальність і умови експлуатації. В даній кваліфікаційній роботі використовуватимемо квадрокоптер тому, що потрібно мати високу стабільність польоту.

1.1.1 Основні елементи FPV-дронів

Корпус дрона - це основа, де розміщені всі частини дрона (рисунок 1.1). Він має дизайн у стилі «X» з чотирма променями, що відходять від середньої частини рами. Пропелери, двигуни, акумулятор, поміщаються на рамі. Всі інші деталі знаходяться в корпусі, особливо польотний контроллер, передавачі і камера. Моделі F330, F450 і F550 є найбільш практичними корпусами дронів. Найважливішими критеріями при виборі цих рам є простота поставки запчастин, відповідність співвідношення ціна/якість, продуктивність, яку воно забезпечує. Незважаючи на свою високу ціну, вуглецевий матеріал QAV250 є одним із кращих корпусів дрона, оскільки матеріал з вуглецевого волокна зменшує можливість поломки в разі падіння [5].



Рисунок 1.1 – Корпус FPV-дрона

Пропелер є однією з найчутливіших частин дрона, і його можна легко пошкодити, оскільки його потрібно постійно замінювати або встановлювати. Пропелер дрона, буває різних форм, розмірів і матеріалів. Ці деталі, які можуть бути легко зміщені, зламані або піддані корозії під час польоту, повинні бути перевірені. Пропелери повинні обслуговуватися для безперебійного польоту. Проблеми з пропелерами можуть викликати нерівномірну роботу двигунів, що призводить до вібрацій і нестабільного польоту. Це, у свою чергу, може вплинути на електроніку дрону, зокрема на антени і приймачі, які відповідають за зв'язок. Пропелери, як правило, виготовляються з пластикового матеріалу, а вал і діаметр гвинта є важливими параметрами при зміні [5].

Двигун дрона є основною динамо-машиною, яка змушує пропелери обертатися і забезпечує достатню тягу для польоту. Використовуються два типи щіткових і безщіткових двигунів, які відрізняються залежно від розміру, ваги та навантаження. Щіткові двигуни є кращими для легких дронів і частково початкового рівня, а безщіткові двигуни - для важких і професійних дронів, ці двигуни зазвичай мають менший вплив на FPV зв'язок, порівняно з щітковими двигунами (рисунок 1.2). При визначенні двигуна дрона важливими параметрами є розмір, робота та швидкість.



Рисунок 1.2 – Двигуни FPV-дрона

Основні види батарей FPV-дрону літій-полімерна або літій-іонна батарея. Батареї дронів визначаються як 1s-6s відповідно до кількості

елементів в батареї. Кожному елементу відповідає напруга 3,7 вольт. У цьому випадку 1-елементні літій-полімерні батареї є кращими в легких дронах-, тоді як 2s і більше елементні батареї використовуються в дронах, які потребують більш високої напруги (рисунок 1.3) [6].



Рисунок 1.3 – Акумуляторна батарея FPV-дрона

Польотний контролер забезпечує необхідне управління шляхом інтерпретації сигналів від різних, датчиків і приймачів (рисунок 1.4). Польотний контролер – це друкована плата, яка дозволяє дрону переміщатися через отриману ним інформацію з датчиків.. Він перетворює отримані сигнали в дію для налаштування швидкості та напрямку, активації камери та виконання інших команд. Поєднуючи багато датчиків, таких як гіроскоп, магнітометр і акселерометр, з GPS, центральні процесори управління польотом можуть використовувати дані про стан, швидкість, положення та напрямок дрона, щоб керувати польотом і роботою транспортного засобу відповідно до параметрів. Ці операції керуються налаштуваннями,

визначеними користувачем перед польотом. Інші датчики також дозволяють уникати перешкод і зіткнень під час роботи [5].

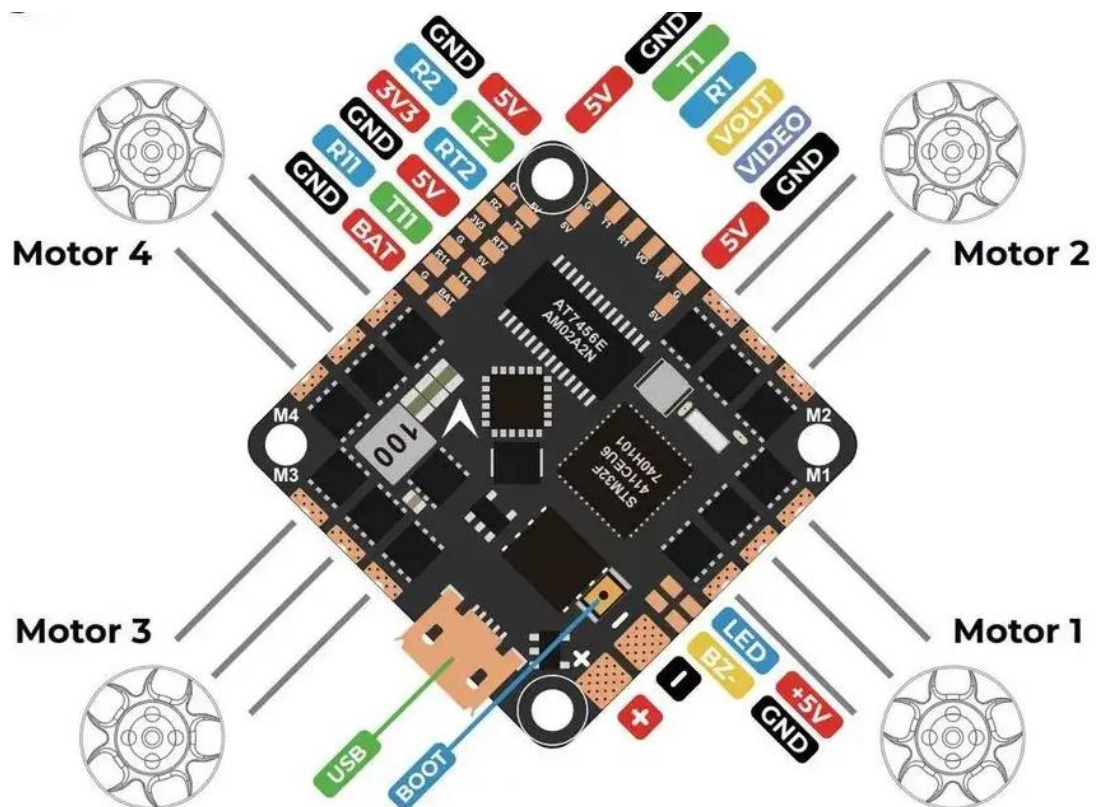


Рисунок 1.4 – Польотний контролер FPV-дрона

Регулятор живлення (PDB), встановлений на дроні; друкована плата організовує силові з'єднання акумуляторів, ESC та інших бортових систем. Це не обов'язково для всіх дронів, але допомагає створити організований дрон (рисунок 1.5). Зокрема, він відповідає за розподіл живлення від польотної батареї до кожного електронного регулятора швидкості для плати керування дроном. У деяких випадках PDB також використовується для живлення таких компонентів, як камера, світлодіодні задні ліхтарі та контролер польоту [6].

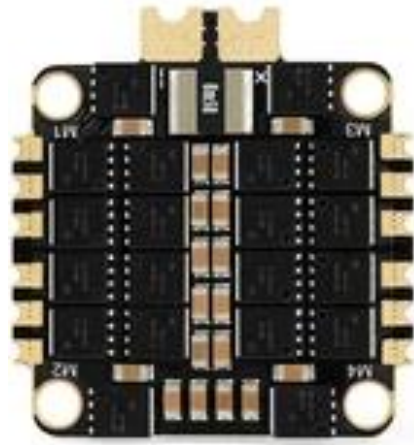


Рисунок 1.5 – Багатофункціональна плата управління FPV-дрона

Як і PDB, електронний регулятор швидкості (ESC) є ще однією важливою частиною дрона. Його завдання полягає в управлінні швидкістю обертання електронних двигунів. Кожен двигун має власне підключення ESC. У багатьох стандартних установках кожна гілка має окремий ESC. Однак деталі ESC 4-в-1 також доступні та надають різні переваги.

Контролер дрона – це інструмент для керування дроном (рисунок 1.6). Найважливішою особливістю контролерів є кількість каналів. Кількість каналів має бути такою ж, як і тип команди, що подається дрону. Хоча сьогодні в дронах в основному використовується 6-канальне управління, це число може збільшитися з такими компонентами, як камери. Цифровий дисплей на елементах керування – ще одна функція, яка полегшує використання [6].



Рисунок 1.6 – Контролер FPV-дрона

Приймачі збирають інформацію (сигнали) від зовнішніх джерел (радіопередавачів) і передають її в польотний контролер, який розпізнає команди з пульта дистанційного керування та дозволяє дрону рухатися (рисунок 1.7). Приймачі, що використовують радіохвилі, забезпечують дуже швидко і безперебійну передачу. Як правило, вони використовують вбудовану антену, яка дозволяє приймати радіосигнали. Приймач матиме чотири основні канали для керування дроном. Однак багато приймачів мають допоміжні канали для виконання певних функцій або запуску режимів польоту. П'яти або 6-канальні приймачі, як правило, є кращими моделями [6].



Рисунок 1.7 – Приймач FPV-дрона

В FPV-дронах, відеосистеми доступні в різних моделях і компонуваннях, мають свої частини, такі як відеопередавач, антена та окуляри FPV (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8– Камера FPV-дрона

FPV-камера встановлюється в передній частині дрону, а зображення з камери передаються на окуляри або монітор пілота. FPV-камери бувають двох типів: аналогові та цифрові [5]. При виборі камери слід враховувати такі параметри, як тип сенсора (CCP/CMOS), розмір сенсора, динамічний діапазон,

співвідношення ширини, поле зору (FOV), затримка та продуктивність в умовах слабого освітлення [6].

У камерах використовуються два сенсори: CCD і CMOS. ПЗЗ-матриця одночасно збирає дані методом сканування пікселів. Він має менший желейний ефект завдяки глобальній більшій кількості знімків, продуктивності з розширеним динамічним діапазоном, хорошу продуктивність в умовах багатосвітлового та слабого освітлення (WDR), а також кращим чорно-білим переходом, ніж CMOS. CMOS-сенсори збирають рядкові дані для всіх пікселів на горизонтальній і вертикальній осях. Цей процес може спричинити затримки. CMOS-сенсори, як правило, можуть мати спотворення зображення з рухомим затвором, тобто ефект желе, який виникає, коли CMOS-сенсор збирає дані рядок за рядком із пікселів. Ці датчики мають хорошу точність передачі кольору та продуктивність, мають низьке енергоспоживання та коштують дешевше.

Ще одним фактором, що впливає на якість зображення в камерах, є розмір сенсора. Ефективність роботи в умовах слабого освітлення та динамічний діапазон залежать від розміру сенсора. Що більший розмір сенсора, то більше поле зору, оскільки збільшується розмір об'єктива та продуктивність в умовах слабого освітлення. Динамічний діапазон покращує зображення в яскравих і темних умовах відповідно до інтенсивності світла і дозволяє користувачеві комфортно бачити потрібний об'єкт. Камери мають два співвідношення сторін, 16:9 і 4:3. Багато камер сьогодні мають регульований баланс подвійної ширини. Поле зору (FOV) і кут нахилу є важливими характеристиками користувача. Чим більший кут, тим складніше побачити віддалені об'єкти через появу риб'ячого ока. Чим менше поле зору, тим ближче і чіткіше зображення [6].

З іншого боку, зменшення довжини об'єктива або збільшення розміру матриці збільшує поле зору. Одиниця виміру "люкс" є важливою характеристикою при зйомці в умовах низької освітленості, і збільшення цього значення покращує якість зйомки в умовах низької освітленості. Зі

збільшенням датчика збільшується його площа, що призводить до потрапляння більшої кількості світла і зниження швидкості зйомки.

Дрони, камери та датчики виявляють відмінності, моделювання, класифікацію, розробку та зміни, особливо для сільськогосподарських застосувань. Широко використовуються датчики зображення, такі як червоний, зелений і синій (RGB), а також ближні інфрачервоні, мультиспектральні, гіперспектральні, теплові датчики та датчики відстані, такі як LiDAR і пошуково-рятувальні (SAR).

Мультиспектральний датчик зображення дає можливість легко виявляти відмінності в цільовій зоні за допомогою сенсорів, чутливих до певних довжин хвиль уздовж електромагнітного спектра. Типи датчиків і функції, що використовуються для цієї мети, поділяються на зелені, червоні та сині видимі смуги, червоні краї та ближні інфрачервоні [7].

Видиме світло має довжину хвилі в діапазоні від 400 до 700 нм. Він визначає регіональні особливості, моделювання висот і застосування підрахунку об'єктів, особливо для сільськогосподарського використання.

Червоний край: Центр 717 нм - це смуга, що відповідає смугі пропускання 12 нм. У цій стрічці представлена інформація про фітостероли і хлорофіл. Відповідно, він використовується для здоров'я рослин, підрахунку рослин та управління водними ресурсами.

Ближній інфрачервоний діапазон (NIR): центр 842 нм – це смуга, що відповідає пропускну здатності 57 нм. Це відображення використовується в аналізі ґрунту, вологості.

Як і інші спектральні зображення, гіперспектральна візуалізація збирає інформацію та обробляє її в електромагнітному спектрі. Тим не менш, крім видимого світла, яке людське око може виявити в трьох діапазонах (червоному, зеленому і синьому), спектральна візуалізація розглядає об'єкти, використовуючи широку частину електромагнітного спектра. Іншими словами, завдяки цій техніці, яка розділяє зображення на багато смуг, вона дає можливість схопити об'єкти та їх властивості в набагато ширшому діапазоні

смуг, ніж те, що видно на знімках однією камерою. Зокрема, це технологія, яка може бути використана при виявленні підземних ресурсів у гірничодобувній промисловості, сільському господарстві, профілактиці хвороб і шкідників, військовій сфері, тепловій інфрачервоній гіперспектральній візуалізації, при виявленні безбарвних шкідливих речовин і речовин без запаху в повітрі, в питаннях екології, при виявленні токсичних відходів, що витікають. Незважаючи на переваги гіперспектральної візуалізації, такі як візуалізація в широкому спектрі, вона дуже дорога, а складні процеси обробки становлять значну проблему [7].

Тепловізійна система – це система візуалізації, заснована на невидимій ІЧ-енергії (теплоті) і визначає загальну структуру зображення, кольори та форми, що формуються відповідно до ІЧ-енергії. У той час як звичайні камери створюють зображення завдяки світлу, тепловізійні камери створюють зображення завдяки теплу.

Тепловізійні камери використовуються для картографування кількості води в ґрунті (SWC) залежно від температури поверхні землі (LST). Тепловізійні камери мають обмежену просторову роздільну здатність, що часто спричиняє труднощі на однорідних ділянках, таких як сільськогосподарські угіддя з голим ґрунтом. Він особливо використовується в сільському господарстві для визначення потреб рослин у воді, виявлення хвороб і для фенотипування [7].

Збір і обробка великого обсягу даних, які збираються різними типами датчиків, може вплинути на пропускну здатність комунікаційного каналу між дроном і контролером. Щоб забезпечити надійний зв'язок, система передачі даних повинна бути досить потужною, щоб вміщувати і передавати ці дані в реальному часі.

1.2 ТЕХНОЛОГІЇ FPV-ДРОНІВ

1.2.1 Радіолокаційне позиціонування і повернення додому

Сучасні дрони можуть працювати в GNSS та несупутниковому режимах, використовуючи комбінацію глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), таких як GPS та ГЛОНАСС. Ця система точної навігації забезпечує створення 3D-карт, навігацію та пошуково-рятувальні завдання (SAR) під час польоту. Супутники використовують переваги супутників GNSS, коли дрон вперше вмикається. У ньому використовується технологія сузір'я. Супутникове угруповання — це група синхронізованих супутників із зонами покриття, що перекриваються. Вбудований компас дозволяє дрону та системі дистанційного керування точно знати місце польоту. Компас відкалібрований для встановлення початкової точки. Таким чином, у разі втрати сигналу між дроном повернеться положення дрона, а система дистанційного керування буде визначена. Це налаштування також відоме як «відмовостійка функція». Радіолокаційна технологія в дроні перевіряє деяку інформацію на екрані управління перед початком польоту, підтверджуючи придатність поточних умов для польоту. Ця інформація включає в себе те, що встановлено зв'язок з супутниками GNSS, і дрон готовий до польоту. Він надає таку інформацію, як визначення поточного місцезнаходження, повернення додому за допомогою кнопки з будь-якої причини, досягнення встановленого низького рівня заряду батареї та запис початкової точки для функції «Повернення додому» у разі втрати зв'язку між дроном та пультом дистанційного керування, і може без проблем повернутися у вихідне положення [8].

1.2.2 Технологія виявлення перешкод і уникнення зіткнень

Дрони оснащені системами запобігання зіткненням з метою безпеки. Ці системи складаються з датчиків, які не сканують навколишнє середовище, а виявляють перешкоди. Дані з датчика зору, ультразвукового, інфрачервоного, LiDAR, датчика часу польоту (ToF) і монокулярного зору перетворюють

зображення в 3D-карти, дозволяючи польотному диспетчеру виявляти об'єкт і уникати його. За допомогою програмних алгоритмів і технології SLAM з використанням цих даних виявляються 6-сторонні перешкоди, і вживаються необхідні дії для їх запобігання [8].

1.2.3 Патерни руху дронів

Крен - це вісь Z на передній і задній частині дрону. Це означає, що він обертається навколо осі (рисунок 1.9).

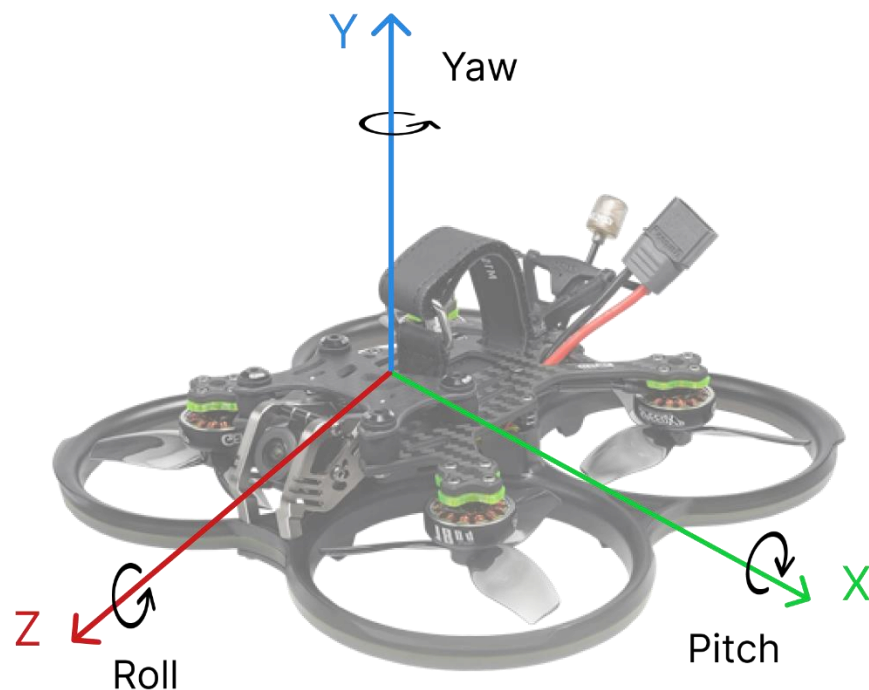


Рисунок 1.9– Рухи FPV-дрона

Тангаж - це вісь X, передньої і задньої частини дрону, що рухаються вгору і вниз.

Рискання - це вісь Y, яка проходить між верхньою та нижньою частинами рами, проходячи через центр ваги дрону. Воно означає обертальний рух по осі. Іншими словами, це рух передньої частини вправо-вліво [8].

1.2.4 Гіроскопічна стабілізація, ІМУ та польотні контролери

Гіроскоп миттєво реагує на різну силу, що надходить у дрон, надаючи необхідну навігаційну інформацію центральному диспетчеру польоту. Інерційний вимірювальний блок (ІМУ) визначає поточну швидкість прискорення за допомогою акселерометра та гіроскопа. ІМУ включає магнітометр для калібрування проти дрейфу під час польоту. Гіроскоп і ІМУ є основними компонентами польотного контролера дрона. Технологія гіроскопічної стабілізації є одним із компонентів, який забезпечує безпілотнику плавний політ завдяки використанню всіх цих компонентів [8].

1.2.5 Створення 3D-карт і моделей

Гіперспектральні, мультиспектральні, LiDAR та теплові датчики візуалізації дронів створюються за допомогою 3D-цифрових моделей поверхні (DSM) будівель, землі та ландшафту, а також цифрових карт висот землі (DEM) [8].

Time-of-Flight (ToF) — це технологія точного картографування та 3D-зображення, яка випромінює дуже короткий імпульс інфрачервоного світла та вимірює час обертання кожного пікселя датчика камери. Камери LiDAR зі спалахом пропонують різноманітні рішення для вимірювання відстаней у відзнятій сцені. Таким чином, такі операції, як сканування об'єктів, уникнення перешкод, відстеження та розпізнавання об'єктів, а також вимірювання об'ємів, стають простішими [8].

Перетворення зображень на карти та моделі так само важливо, як і отримання знімків з дронів з високою роздільною здатністю. Для цього є програмне забезпечення Agisoft Photogrammetry, PhotoScan та ESRI Drone2Map для 2D/3D картографування та обробки зображень.

2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1 Система FPV. Властивості та параметри

Система FPV (First Person View) використовується в дронах для трансляції відео з дрона на землю в реальному часі, що дозволяє оператору керувати ним з віддаленої точки.

Система FPV дозволяє передавати відео в режимі реального часу з камери, встановленої на FPV-дроні, до ваших FPV-окулярів.

FPV-система складається з камери, відеопередавача та відеоприймача. Зазвичай відеоприймач вбудований в FPV-окуляри, але для підключення до сумісних FPV-окулярів також доступні окремі відеоприймачі.

2.2 Типи FPV-систем

Існує два типи FPV-систем: аналогові та цифрові (або HD).

Основна різниця між цифровою та аналоговою системами полягає у методах обробки та передачі сигналу. Аналогові системи передають інформацію шляхом безперервного змінення амплітуди або частоти хвилі. Натомість, цифрові системи спочатку перетворюють сигнал у бінарний формат (одиниці та нулі), що дозволяє передавати дані [9].

Аналогові сигнали піддаються впливу навколишнього середовища, що може призводити до зниження безперервності та якості відеопотоку. У протиположності, цифрові сигнали, зокрема від систем Walksnail і DJI, менш сприйнятливі до перешкод, що забезпечує стабільну якість відео протягом усього польоту.

Різні FPV-системи мають різні методи обробки зниження сигналу. У аналогових системах це проявляється у вигляді статичних і мерехтливих зображень. Система HDZero може відображати білі блоки на екрані при погіршенні сигналу. У Walksnail розпад сигналу проявляється у вигляді

розмазування червоного світла по краях екрана, що слугує попередженням про низький рівень сигналу. Системи DJI при слабкому сигналі демонструють блокові артефакти, що зменшує деталізацію, але зберігає можливість керування дроном [9].

Аналогова технологія, яка використовується протягом декількох десятиліть, є найстарішою та найбільш доступною, вона підтримується в таких діапазонах частот як 5,8 ГГц, 2,4 ГГц та 1,2/1,3 ГГц. Цифрова технологія, навпаки, хоч і є новішою, забезпечує значно кращу якість зображення.

Аналогова FPV-система не є власністю жодної компанії, що забезпечує високий рівень універсальності та доступності компонентів на ринку. Така система вже десятиліттями використовується для FPV-дронів і залишається домінуючою через свою доступність та широкий спектр сумісного обладнання.

В даний час для FPV-дронів доступні три цифрові FPV-системи, всі вони є системами 5,8 ГГц, і жодна з них не сумісна один з одним, оскільки всі вони є власними системами.

Остання модель DJI O3 Air Unit вирізняється потужною камерою, яка забезпечує якість зображення порівнянну з екшн-камерами, підтримуючи роздільну здатність до 1080p при 100 кадрах на секунду, що забезпечує високу чіткість зображення (рисунок 2.1). Ця модель також оснащена технологією стабілізації відео, оптимізованою для високоякісного відображення в динамічних умовах. Відстань передачі відеосигналу може досягати 10 км, що робить систему ідеальною для застосування на великі відстані [10].



Рисунок 2.2– HDZero

Висока чіткість зображення дозволяє точніше та швидше визначати об'єкти, що підвищує ефективність управління дроном.

Система HDZero була розроблена з метою мінімізації затримки, що дозволяє досягти надзвичайно плавного і майже миттєвого відгуку, перевершуючи навіть аналогові системи [11].

Система HDZero користується популярністю завдяки фіксованій затримці. На відміну від систем DJI та Walksnail Avatar, де затримка може змінюватися в залежності від сили сигналу.

Окуляри HDZero FPV оснащені вбудованим приймачем HDZero і підтримують також аналогові приймачі, такі як TBS Fusion, і сумісні з Walksnail Avatar VRX. Це робить їх універсальними та сумісними з різними системами.

На відміну від інших цифрових систем, що використовують двосторонню передачу даних, HDZero використовує односторонній зв'язок. Це означає, що втрачені або пошкоджені пакети даних відображаються на екрані у вигляді "іскор", що імітують аналогові перешкоди. Це забезпечує фіксовану затримку, але може впливати на якість зображення.

Walksnail Avatar має схожий принцип роботи з DJI. Walksnail використовує двосторонній зв'язок, що дозволяє повторно передавати втрачені або пошкоджені пакети даних для забезпечення найкращої якості зображення. Це забезпечує високу якість зображення, але призводить до збільшення та змінності затримки (рисунок 2.3) [12].



Рисунок 2.3– Walksnail Avatar

Наприкінці 2023 року Walksnail запровадив режим “Race”, який зменшує роздільну здатність відео з 720p/1080p до 540p, щоб покращити продуктивність зв'язку, мінімізуючи затримки та стабілізуючи її [12].

Переваги системи Walksnail Avatar включають її універсальність, флагманські окуляри Avatar Goggles X, які підтримують систему Avatar, а також аналогову та HDZero. Система надійно захищена від перешкод, на відміну від аналогових систем.

2.3 Радіус дії та проникнення сигналу в FPV-системах

Дальність і проникнення сигналу є критично важливими аспектами, які слід враховувати при виборі між різними FPV-системами. Аналогове відео, Walksnail, DJI та HDZero пропонують різний ступінь дальності та проникнення, залежно від технології, вихідної потужності та навколишнього середовища [10-12].

Всі FPV-системи здатні працювати на великих відстанях за умови правильного налаштування антени та використання відповідної вихідної потужності.

Аналогові системи можуть забезпечувати надійний зв'язок на відстанях до 10-15 км при оптимальних умовах та використанні потужних передавачів. HDZero має подібну дальність і проникнення, досягаючи приблизно 10 км, за умови використання відповідної антени та потужності передавача до 1 Вт.

Система DJI, завдяки своїй технології і вищій потужності передавача, може досягати відстані до 13 км у ідеальних умовах, забезпечуючи стабільний і якісний відеозв'язок на великих відстанях. Walksnail, яка використовує подібну до DJI технологію, здатна працювати на відстанях до 10 км, однак її максимальна вихідна потужність (1200 мВт) може бути менш стабільною у порівнянні з DJI [10].

Walksnail перевершують аналогові системи та HDZero. DJI має перевагу над Walksnail, оскільки максимальна потужність Walksnail (1200 мВт) не забезпечує такої стабільності, як продуктивність DJI.

Навколишнє середовище польоту також відіграє важливу роль. HDZero може бути менш ефективним у порівнянні з DJI та Walksnail, коли мова йде про проникнення сигналу всередині будівель або при маневруванні навколо перешкод. Незважаючи на це, всі ці системи можуть працювати на великих відстанях у прямій видимості, досягаючи понад 10 км за умов правильного налаштування антени [10].

2.4 Затримки в FPV-системах

Затримка, відома як “затримка від скла до скла”, визначає час, необхідний для передачі зображення від камери до екрана окулярів.

Аналогові системи та системи HDZero демонструють найнижчу затримку, зазвичай в межах від 10 до 20 мс (оновлення всього кадру). Це дозволяє пілотам отримувати майже миттєвий відгук, що є важливим для точного керування дронами під час маневрів на високій швидкості [11].

Системи DJI та Walksnail мають дещо вищу затримку, яка становить приблизно від 30 до 60 мс, залежно від роздільної здатності та частоти кадрів, але загалом рівень затримки є прийнятним для більшості користувачів, навіть якщо він трохи вищий порівняно з аналоговими системами та HDZero [10].

Також важливо розрізняти фіксовані та змінні затримки в FPV-системах. Аналогові системи та HDZero забезпечують фіксовану затримку, яка залишається постійною протягом усього польоту. Натомість, системи Walksnail та DJI мають змінну затримку, яка залежить від потужності відеозв'язку. Змінна затримка допомагає підтримувати високу якість зображення, що є однією з причин кращого проникнення сигналу у DJI та Walksnail [12].

2.5 Інтерференція та розпад сигналу в FPV-системах

Аналогові сигнали є вразливими до перешкод з навколишнього середовища, що може вплинути на безперервність та якість відеопотоку. Цифрові сигнали, зокрема від систем Walksnail і DJI, менш схильні до впливу перешкод, забезпечуючи стабільну якість відео протягом усього польоту.

Кожна FPV-система має свої особливості у випадку зниження якості сигналу. В аналогових системах це часто проявляється у вигляді статичних і мерехтливих зображень (рисунок 2.4) [9].

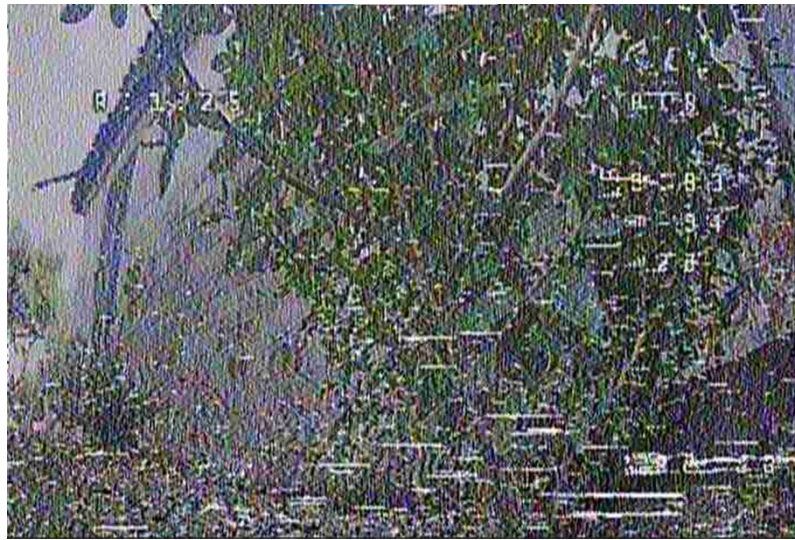


Рисунок 2.4– Зниження якості сигналу в аналогових системах FPV

Зображення системи HDZero при погіршенні сигналу стає мозаїчним, з великими блоками пікселів, особливо при слабкому сигналі. Втрата кадрів, що призводить до переривчастого відео та видима затримка між дією і відображенням, яка може впливати на керування дроном (рисунок 2.5) [9].



Рисунок 2.5– Зниження якості сигналу в HDZero

Артефакти у системі Walksnail можуть проявлятися у вигляді пікселізації, замороженого зображення, відставання відео, кольорові спотворення, розривів зображення та цифрового шуму. Ці явища, що викликані втратами даних, перешкодами сигналу, надмірною компресією або

неправильними налаштуваннями, суттєво погіршують якість відеопотоку, знижуючи чіткість та стабільність зображення. (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6– Зниження якості сигналу в Walksnail

Артефакти у відеосистемі DJI O3 проявляються в різних формах, включаючи пікселізацію, затримки кадрів, відставання відео та мінімізацію явищ глюків з кольорами або текстурами. DJI O3 відзначається вдосконаленими алгоритмами обробки сигналу та ефективнішим управлінням частотними каналами, що сприяє зниженню виникнення артефактів порівняно з системою Walksnail (рисунок 2.7) [9].



Рисунок 2.7– Зниження якості сигналу в DJI

3 МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАКТУ ПРИЙОМУ-ПЕРЕДАЧІ FPV-СИСТЕМ

Починаючи з технологій зменшення затримки, досліджуються важливі аспекти, що впливають на реакцію та контроль під час польотів. Вибір оптимальних каналів та частот передачі, використання високоякісних антен та приймачів, а також розробка нових антенних систем – усі ці методи спрямовані на зниження затримки та підвищення стабільності зв'язку. Після цього розглянуті підходи до підвищення якості сигналу. Використання різних типів антен, оптимізація їхнього розташування та комбінація антенних релеїв допомагає максимізувати сигнал та покращити прийом та передачу даних. Нарешті, розглядаються розширені технології модуляції, які використовуються для підвищення швидкості передачі даних, корекції помилок та зменшення затримки.

3.1 Технології зменшення затримки в системах FPV

Зменшення затримки має критичне значення для FPV-пілотів, оскільки навіть незначна затримка може вплинути на реакцію та контроль над дроном. Технології зменшення затримки включають наступні аспекти.

Вибір оптимальних каналів та частот передачі дозволяє уникнути конфліктів інтерференції та підвищити стабільність зв'язку. Використання менш зайнятих частот допомагає уникнути перешкод та зменшити затримку передачі сигналу.

Використання високоякісних антен та приймачів може покращити якість сигналу та зменшити затримку, забезпечуючи пілотам більш точний і швидкий зв'язок з дроном.

Використання високошвидкісних цифрових технологій передачі, таких як цифрові системи передачі відеосигналу та протоколи передачі даних, забезпечує швидку та стабільну передачу інформації з меншою затримкою.

Використання потужних процесорів для обробки відеосигналу та даних допомагає зменшити час обробки та відповіді на вхідні дані.

Розробка нових антенних систем і технологій, які забезпечують більшу дальність передачі сигналу та меншу затримку, є ключовим аспектом для зменшення затримки у FPV-польотах.

Використання ефективних алгоритмів компресії даних дозволяє зменшити розмір передаваних файлів і, відповідно, знизити затримку при передачі.

Впровадження швидких та ефективних кодеків допомагає зменшити затримку передачі відеосигналу. Використання апаратного прискорення обробки відеоданих значно покращує час реакції системи та зменшує затримку.

3.2 Оптимізація використання частотного спектра 5,8 ГГц в системах FPV

Існує понад 100 каналів у частотному спектрі 5,8 ГГц, які використовуються аналоговими та цифровими FPV-системами (DJI, FPV та Shark Byte). Розуміння розташування каналів у цьому спектрі, їхньої смуги пропускання та відстані між ними дозволяє уникнути відеоперешкод.

Зазвичай використовуються аналогові діапазони 5,8 ГГц: A, B, E, F і R. Хоча деякі канали можуть видавати більшу потужність, ніж інші, що можна перевірити за допомогою радіочастотного вимірювача потужності, як-от ImmersionRC [13].

При поодиноких польотах, можна використовувати будь-який канал. Проте при польотах у групі важливо знати, які частоти використовують інші пілоти, щоб мінімізувати перешкоди. Вибір каналу, що знаходиться якомога далі від зайнятих частот, допоможе уникнути конфліктів (додаток B).

Крім того, встановлення вихідної потужності 200 мВт або нижче (25 мВт для польотів у приміщенні) і використання антен з різною поляризацією (RHCP та LHCP) також зменшує перешкоди. Вибір антен з хорошим

коефіцієнтом аксіального співвідношення сприяє відхиленню сигналів від протилежно поляризованих антен та багатопроблемних перешкод [13].

3.3 Усунення електричних перешкод у системі живлення FPV-дронах

Двигуни та регулятори швидкості (ESC) можуть генерувати значні електричні перешкоди у системі живлення, що може призводити до появи шумів у відеопотоці FPV. Якщо живлення FPV-обладнання, такого як передавач відео (VTX) і камера, здійснюється безпосередньо від акумулятора, це може викликати електричні перешкоди, які виявляються у вигляді білих ліній або мерехтіння на екрані.

Для усунення та запобігання цим проблемам рекомендується встановити конденсатори з низьким еквівалентним послідовним опором (ESR) у систему живлення. Такі конденсатори допомагають зменшити електричний шум, створюваний ESC і двигунами, виконуючи роль фільтрів, що згладжують пульсації напруги та забезпечують більш чистий відеосигнал.

Крім того, важливо оптимізувати керування проводкою, заземленням і розподілом електроенергії. Дроти відеосигналу та живлення повинні бути розташовані якомога далі один від одного. Використання кручених або екранованих кабелів може мінімізувати електромагнітні перешкоди. Правильне заземлення та керування проводкою сприяють зниженню рівня шуму у відеопотоці.

Застосування спеціальних стабілізаторів напруги або LC-фільтрів для живлення VTX і камери також допомагає знизити рівень шуму та стабілізувати джерело живлення. Це сприяє отриманню більш чистого і стабільного відеопотоку. Таким чином, дотримання цих заходів забезпечить кращу якість відеопотоку та стабільну роботу FPV-обладнання.

3.4 Підвищення потужності відеопередавача для збільшення радіусу дії в FPV-системах

Загалом, збільшення вихідної потужності передавача (VTX) забезпечує більший радіус дії сигналу. Однак, це супроводжується певними недоліками, такими як підвищене нагрівання передавача та можливість створення перешкод для інших користувачів. Крім того, у різних країнах існують законодавчі обмеження щодо максимальної допустимої потужності передавача в діапазоні 5,8 ГГц [13].

Відповідно до закону зворотного квадрата, потужність сигналу зменшується квадратично з відстанню. Це означає, що збільшення потужності передавача в два рази призведе до збільшення сили сигналу в чотири рази на тій самій відстані.

Потужність у 25 мВт є оптимальною для польотів у приміщенні та для використання на гоночних трасах, забезпечуючи достатній радіус дії для більшості сценаріїв. Для польотів на відкритому повітрі зазвичай використовують вищу вихідну потужність для забезпечення надійного зв'язку на більшій відстані. Однак слід враховувати, що збільшення потужності не завжди призводить до пропорційного збільшення радіусу дії. Для подвоєння радіусу дії потрібно в чотири рази більше потужності [14].

Підвищена вихідна потужність призводить до збільшення тепловиділення, що може викликати перегрів передавача, знижуючи його продуктивність або навіть призводячи до його вимкнення у екстремальних випадках. Використання високої потужності також може бути неефективним у середовищах зі значними багатопроточними перешкодами, таких як гаражі або стадіони, де сигнали відбиваються від бетонних або металевих поверхонь. У таких умовах доцільніше використовувати меншу вихідну потужність [14].

Під час групових польотів рекомендується уникати використання потужних передавачів, оскільки вони можуть створювати перешкоди у відеопотоці інших пілотів, ускладнюючи спільний політ. Використовуються

передавачі до 25 мВт потужності для забезпечення безперешкодного польоту для всіх учасників.

3.5 Підвищення якості сигналу за рахунок FPV-антен

Забезпечення стабільного та надійного зв'язку під час FPV-польотів є критично важливим завданням, що вимагає застосування різноманітних технологічних підходів. Використання високоякісних антен може значно покращити якість сигналу, забезпечуючи кращий прийом і передачу даних. Активні антени з підсилювачами особливо ефективні для забезпечення зв'язку на великих відстанях [13].

Рівень сигналу прийнятого антенною розраховується за формулою:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - \left(20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right) \right) \quad 3.1$$

де:

P_t - потужність переданого сигналу (дБМ);

G_t - потужність переданого сигналу (дБ);

G_r - потужність переданого сигналу (дБ);

d - потужність переданого сигналу (м);

f - потужність переданого сигналу (Гц);

c - потужність переданого сигналу (м/с);

При виборі антени для FPV-систем головним параметром є її спрямованість, яка може бути всеспрямованою або спрямованою.

Всеспрямовані антени забезпечують рівномірне випромінювання радіохвиль в усіх напрямках, що робить їх ідеальними для повсякденних польотів, забезпечуючи стабільне покриття навколо пілота. Такі антени створюють надійний зв'язок незалежно від положення дрону відносно оператора [13].

Спрямовані антени, навпаки, концентрують радіохвилі в одному напрямку, що дозволяє досягти більшої дальності і стабільності сигналу в конкретному напрямку. Вони часто використовуються на приймачах разом з всеспрямованими або багатонаправленими антенами, що дозволяє забезпечити покриття необхідних кутів і максимально ефективно використовувати радіочастотний ресурс.

Поєднання різних типів антен, залежно від умов польоту та вимог до зв'язку, дозволяє оптимізувати якість сигналу та забезпечити стабільну і надійну передачу даних між дроном та оператором (додаток Г).

Оптимізація розташування антен на дроні та приймачі також сприяє максимальному використанню сигналу та забезпечує оптимальну якість зв'язку.

Поляризація антен є ключовим параметром у класифікації антен для FPV-систем. Розрізняють два основних типи поляризації: лінійна поляризація (LP) та кругова поляризація (CP). Серед кругових поляризованих антен розрізняють ліву кругову поляризацію (LHCP) і праву кругову поляризацію (RHCP) (додаток Д).

Лінійна поляризація застосовується у багатьох базових антенах, таких як дипольні антени, які часто використовуються з відеопередавачами (VTX) та відеоприймачами (VRX), а також у побутових Wi-Fi пристроях. Сигнал з лінійною поляризацією коливається або горизонтально, або вертикально в одній площині під час його поширення [15].

Кругова поляризація передбачає передачу сигналів одночасно в горизонтальній та вертикальній площинах зі зсувом фази на 90 градусів, що створює спіралеподібний візерунок. Важливим аспектом кругової поляризації є напрямок обертання радіохвиль, який може бути правостороннім (RHCP) або лівостороннім (LHCP). Для забезпечення оптимальної якості сигналу передавальна та приймальна антени повинні мати однакову поляризацію. Використання різних поляризацій призведе до значної втрати сигналу.

Кругові поляризовані антени є кращими для FPV-дронів з кількох причин. По-перше, вони менш чутливі до багатопроменевих перешкод порівняно з лінійно поляризованими антенами. По-друге, вони забезпечують стабільний сигнал незалежно від орієнтації дрона, який постійно обертається навколо всіх трьох осей, що робить неможливим підтримання ідеального вирівнювання лінійних антен [15].

Лінійно поляризовані антени, хоч і відрізняються конструктивною простотою, менш підходять для FPV-дронів через їхню вразливість до втрат сигналу при зміні орієнтації. Вони, як правило, менші, легші, дешевші та простіші у виготовленні, що робить їх зручними для застосування в радіокерованих літаках, автомобілях, човнах тощо. Однак їх перевага у дальності рідко реалізується через багатопроменеві перешкоди.

Кругові поляризовані антени, навпаки, забезпечують стабільне перекриття сигналу незалежно від орієнтації дрона відносно приймальної антени, що робить їх стандартом для FPV-дронів. Вони також мають здатність відкидати багатопроменеві перешкоди, що виникають через відбиття сигналу від об'єктів, таких як стіни та земля, та призводять до різних видів шуму в аналоговому відеопотоці [15].

Ці переваги роблять кругові поляризовані антени оптимальним вибором для забезпечення стабільного та надійного зв'язку у FPV-системах.

Застосування антенних релеїв підвищує дальність зв'язку та розширює зону покриття. Використання розгалужувачів, що підключають кілька антен до одного приймача або передавача, допомагає зменшити втрати сигналу. Мінімізація перешкод та інтерференції, шляхом уникання джерел перешкод, таких як металеві конструкції або інші бездротові пристрої, забезпечує більш стабільний зв'язок.

Кругові поляризовані антени поділяються на лівосторонні та правосторонні (RHCP). Для оптимального функціонування передавач і приймач повинні мати антени з однаковою поляризацією, інакше це може спричинити значну втрату сигналу. Це обумовлено тим, що антена LHCP

відхиляє сигнал антени RHCP, і навпаки. Ступінь цього відхилення визначається осьовим співвідношенням антен.

Анени з круговою поляризацією можуть використовувати цю властивість для зменшення впливу багатопроменевих завад. При відбитті сигналу CP від об'єкта змінюється напрямок його поляризації. Антена LHCP відкидає сигнал RHCP і навпаки, що зменшує перехресну поляризацію. Крім того, використання різних поляризацій антен двома пілотами (один з антенами LHCP, інший з RHCP) зменшує взаємні перешкоди між їхніми сигналами.

Коефіцієнт підсилення антени визначає ефективність спрямованої антени в певному напрямку порівняно з ізотропним випромінювачем, який випромінює однаково в усіх напрямках. Цей коефіцієнт вимірюється в децибелах (дБ) і визначає радіус дії антени та кут її покриття [15].

Високе підсилення антени зазвичай вказує на більшу дальність дії, однак воно супроводжується збільшенням спрямованості та зменшенням ширини променя. Коефіцієнт підсилення антени змінює діаграму спрямованості, яка відображається в технічній документації антени. Для антен передавача відеосигналу зазвичай рекомендується використовувати всеспрямовані антени з низьким коефіцієнтом підсилення, щоб забезпечити краще покриття в усіх напрямках навколо дрона. Для антен приймача відеосигналу рекомендується використовувати комбінацію всеспрямованої антени з низьким коефіцієнтом підсилення та спрямованої антени з середнім або високим коефіцієнтом підсилення, щоб поєднати переваги обох типів антен.

Коефіцієнт посилення антени з використанням ефективної апертури розраховується за формулою:

$$G = 10 \log \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2} \right) \quad 3.2$$

де:

A – ефективна апертура антени (м^2);

λ – довжина хвилі в метрах (м).

Регулярне обслуговування та оновлення антен і іншого обладнання є важливим для підтримання оптимальної працездатності та якості сигналу. Впровадження цих підходів сприяє підвищенню якості сигналу у FPV-польотах, що забезпечує більш стабільний та надійний зв'язок між дроном та пілотом.

3.6 Розширені технології модуляції у системах FPV

Розширені технології модуляції, що використовуються у системах FPV передачі сигналу, спрямовані на підвищення швидкості передачі даних, покращення стабільності зв'язку та зменшення затримки. У сучасних FPV-системах ці технології відіграють ключову роль, забезпечуючи високий рівень надійності та ефективності зв'язку.

Цифрові протоколи, такі як D8, D16, FPort, забезпечують значно вищу швидкість передачі даних і більш стабільний зв'язок у порівнянні з аналоговими системами. Протокол D8 використовує 8 каналів для передачі даних і забезпечує високу швидкість передачі з невеликою затримкою, що є критично важливим для FPV-систем. Протокол D16 розширює можливості до 16 каналів, дозволяючи передавати більше даних одночасно, що підвищує якість зв'язку і забезпечує додаткові функції, такі як телеметрія. Протокол FPort інтегрує сигнали управління та телеметрії в один канал, зменшуючи затримку і спрощуючи налаштування системи [16].

ExpressLRS (Extremely Low Latency Radio System) є однією з найбільш прогресивних систем для FPV. Ця система використовує найновіші технології модуляції та протоколи передачі даних для забезпечення наднизької затримки та високої надійності зв'язку. Використання частот у діапазонах 900 МГц та 2.4 ГГц дозволяє ExpressLRS забезпечити стабільний зв'язок на великих відстанях з мінімальною затримкою, що є критично важливим для FPV-гонок і складних польотів [16].

Технології корекції помилок, такі як FEC (Forward Error Correction), дозволяють виявляти та виправляти помилки в переданих даних, що суттєво покращує надійність зв'язку. FEC використовує додаткові біти для кодування даних, що дозволяє приймачу виявляти і виправляти помилки без необхідності повторної передачі даних. Це забезпечує стабільний і надійний зв'язок навіть в умовах високого рівня інтерференції [17].

Модуляція з використанням більш високочастотних сигналів дозволяє підвищити швидкість передачі даних і зменшити затримку. Використання частот у діапазоні 5.8 ГГц дозволяє передавати дані з більшою пропускнуою здатністю порівняно з традиційними частотами 2.4 ГГц. Це забезпечує передачу відеосигналу високої якості з мінімальною затримкою, що є критично важливим для FPV-польотів.

Адаптивні методи модуляції дозволяють автоматично адаптувати модуляційні параметри в залежності від умов передачі сигналу. Наприклад, в умовах високого рівня інтерференції система може автоматично перейти на більш стійкий тип модуляції, забезпечуючи стабільний зв'язок. Це підвищує ефективність системи та дозволяє зберігати високу якість зв'язку навіть у складних умовах.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

4.1 Досліджуваний комплект FPV-дрона. Покращення системи зв'язку FPV-дрона

Аналоговий дрон GEPRC Cinebot30 є популярним FPV-дроном, спеціально розробленим для кінематографічних зйомок. Завдяки своїм невеликим габаритам, цей дрон ідеально підходить для зйомок в обмеженому просторі. Потужні мотори і пропелери забезпечують швидке та точне керування, що дозволяє легко виконувати складні маневри. Оснащений камерою з високою роздільною здатністю, що забезпечує чітке і якісне відео (рисунок 4.1) [18].

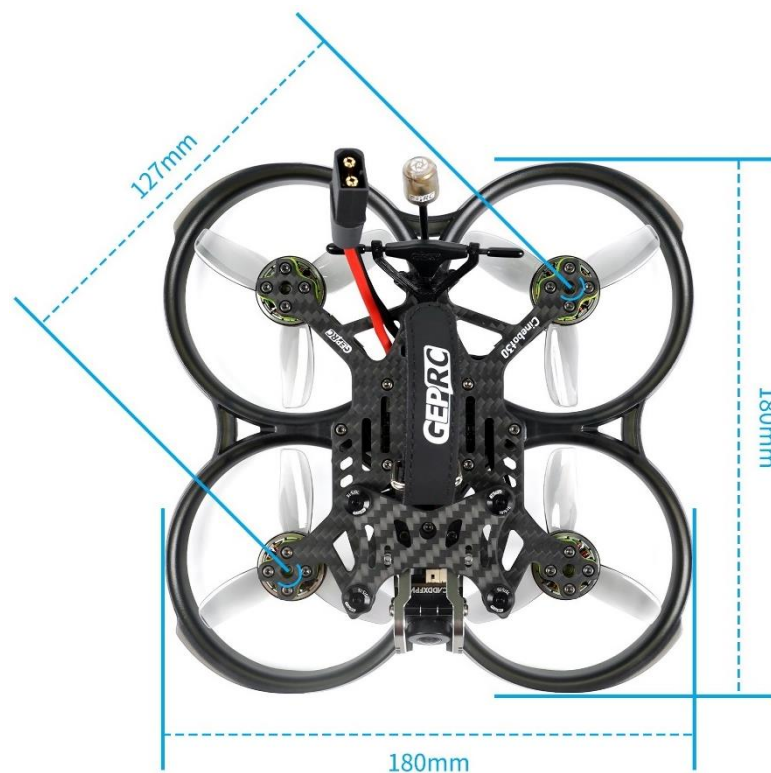


Рисунок 4.1 – FPV-дрон GerRC Cinebot 30

Технічні характеристики GerRC Cinebot 30:

Модель: аналоговий квадрокоптер Cinebot30

Бренд: GEPRC

Каркас: GEP-CT30
Колісна база: 127 мм
Ізоляційна пластина: 2 мм
Основна пластина: 3 мм
Нижня пластина: 1,5 мм
FC: GEP-F722-45A AIO V2
MCU: STM32F722RET6
IMU: ICM-42688-P
VTX: GEPRC RAD 1 Вт
Камера: Caddx Ratchet 2
Пропелер: HQ prop T76mm
Антенa: Peano 5.8G 110 мм RHCP UFL антенa
Роз'єм зарядного пристрою: XT60H-M
Двигун: SPEEDX2 1804-2450KV
Вага: версія 209,2 г
Приймач: ELRS 2.4G
Акумулятор: LiPo 6S 1100mAh

Skyzone Cobra SD — це окуляри для FPV-польотів, які надають користувачеві відмінну якість зображення і комфорт. Висока роздільна здатність екрану забезпечує чітке та детальне зображення, що є важливим для точного керування дроном. Окуляри мають зручну форму, що дозволяє комфортно носити їх протягом тривалого часу. Підтримка різних частотних діапазонів дозволяє використовувати окуляри з різними передавачами відео, забезпечуючи стабільний сигнал (рисунок 4.2) [19].



Рисунок 4.2 – FPV-окуляри Skyzone Cobra SD

Технічні характеристики Skyzone Cobra SD:

Частота 5.8Ghz 5.8Ghz

Роздільна здатність 1280*720 800 480

Приймач Diversity

DVR MJPEG Compression 25/30FPS

Живлення 1 Cell 18650/USB-C/DC 2-6s Lipo

Споживана потужність DC 12V0.59A, USB 5V1.4A

Мова Chinese/English

Вага продукту 332 г

Radiomaster TX12 — це сучасний пульт управління для FPV-дронів. Зручне меню та налаштування дозволяють швидко адаптувати пульт під індивідуальні потреби користувача (рисунок 4.3) [20].



Рисунок 4.3 – FPV-контролер RADIOMASTER TX12 Mark II

Технічні характеристики RADIOMASTER TX12 Mark II:

Розмір: 170*159*108 мм

Вага: 363 г

Частота: 2,400 ГГц-2,480 ГГц

ВЧ чіп: ExpressLRS (ELRS)

Робочий струм: 320mA@8.4V (ELRS)

Діапазон напруги: 6,6-8,4 В постійного струму

Прошивка радіо: EdgeTX (передавач) / ExpressLRS (радіочастотний модуль)

Канали: до 16 (в залежності від ресивера)

Дисплей: Монохромний РК-дисплей 128*64

Зовнішній модуль: сумісний з JR/FrSKY/Crossfire

Спосіб оновлення: USB/SD-карта (SD-карта: в комплекті) та програмне забезпечення EdgeTX Buddy онлайн або EdgeTX Companion для ПК

Зарядка через USB: QC3 USB-C

Блок-схема системи зв'язку FPV-комплекту та її опис (додаток Е)

Зв'язок команд управління

Radiomaster TX12 -> Приймач (RX) на cinebot 30:

Пульт керування передає команди управління на частоті 2.4 ГГц.

Приймач (RX) на cinebot 30 -> Контролер польоту:

Приймач передає команди на контролер польоту, який обробляє їх і керує дроном.

Зв'язок відео

Камера на cinebot 30 -> Відеопередавач (VTX) на cinebot 30:

Камера передає відеосигнал на відеопередавач.

Відеопередавач (VTX) на cinebot 30 -> Відеоприймач (VRX) в Skyzone Cobra SD:

Відеопередавач передає відеосигнал на частоті 5.8 ГГц.

Відеоприймач (VRX) в Skyzone Cobra SD -> Дисплей в Skyzone Cobra SD:

Відеоприймач приймає сигнал і передає його на дисплей окулярів для відображення.

4.2 Програмна оптимізація та налаштування FPV комплекту

4.2.1 Налаштування контролера FPV-дрона Radiomaster tx12

В системному меню розділу “Hardware” відключено фільтрації АЦП (Analog-to-Digital Converter) на пульті управління, що дозволяє уникнути додаткових затримок у передачі сигналу (рисунок 4.4). Менша затримка і краща обробка сигналу дозволяють досягти більш стабільного зв'язку між контролером і дроном.

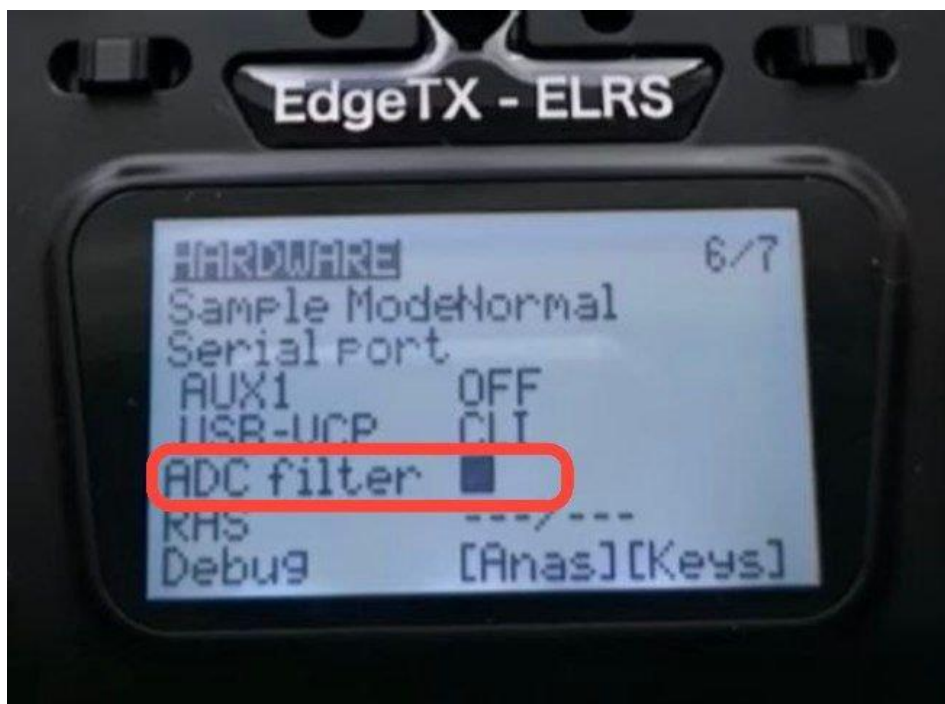


Рисунок 4.4 – Відключено фільтрації АЦП

Через програму ExpressELRS Configurator оновлено прошивку передавача ELRS на контролері до актуальної на час проведення досліджень (рисунок 4.5) [21].

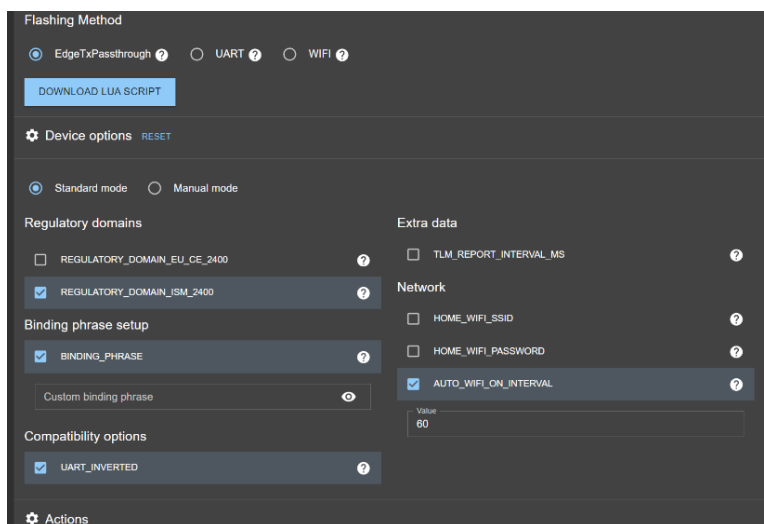


Рисунок 4.5 – Оновлено прошивку передавача ELRS

Щоб забезпечити максимальну потужність передавача, повинен бути встановлений параметр “REGULATORY_DOMAIN_ISM_2400” в пункті “Regulatory domains”.

Встановлено частоту оновлення пакетів (Packet Rate) 250 Гц. Параметри телеметрії для отримання зворотного зв'язку встановлено стандартними для 250 Гц оновлення пакетів (рисунок 4.6). Потужність передавача встановлено 250 mW що є максимальною для даного контролера.



Рисунок 4.6 – Параметри передавача ELRS

4.2.2 Налаштування FPV-дрона GEPRC Cinebot30

Через програму ExpressELRS Configurator оновлено прошивку приймача ELRS на FPV-дроні до актуальної на час проведення досліджень (рисунок 4.7) [21].

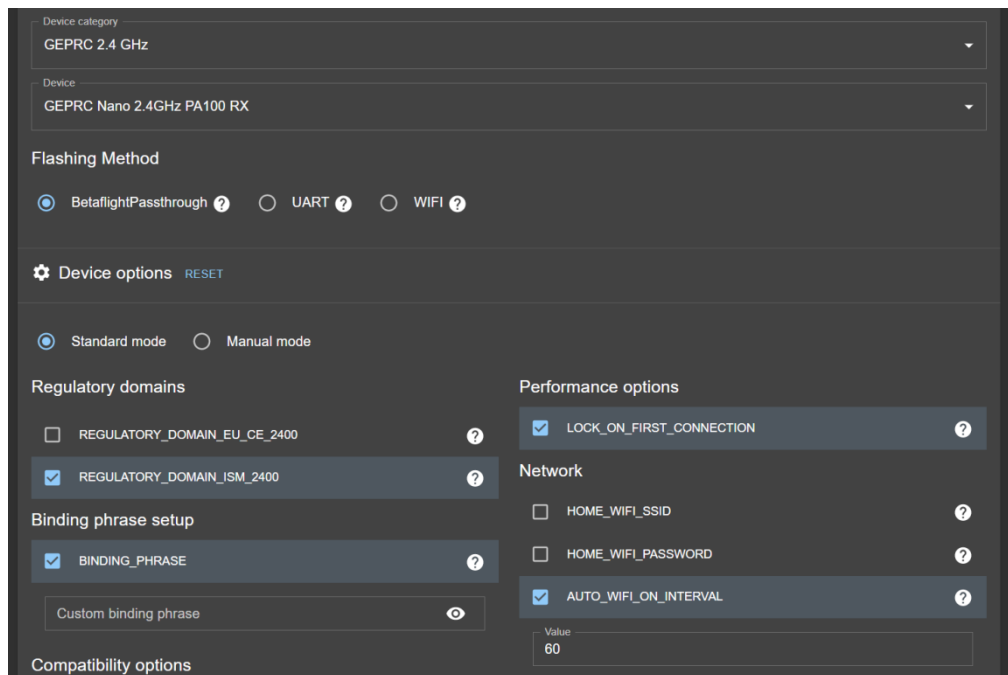


Рисунок 4.7 – Оновлено прошивку приймача ELRS

Через програму “Betaflight Configurator” використано параметр для надання телеметрії та RSSI (показник рівня сигналу з контролером) (рисунок 4.8) [22].

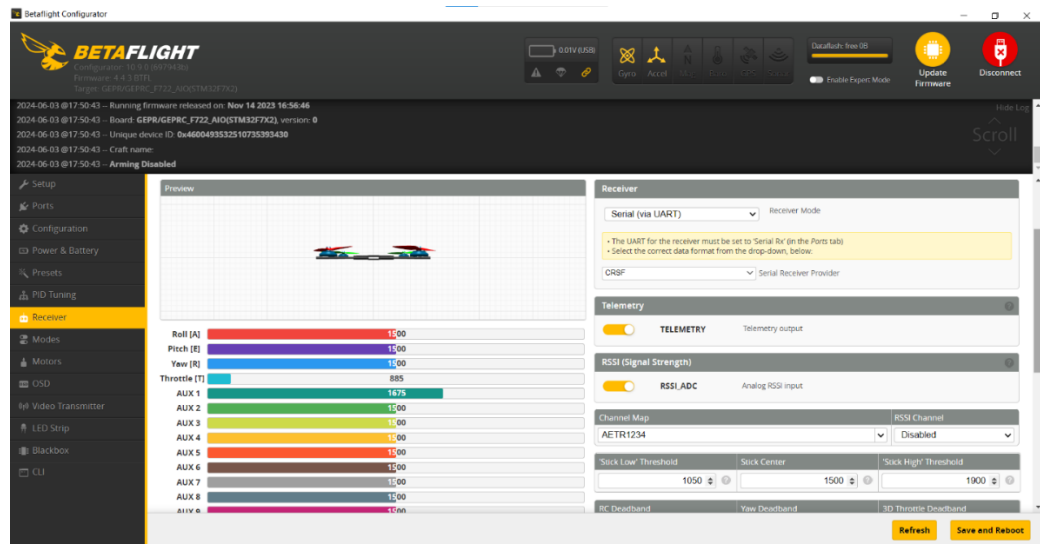


Рисунок 4.8 – Телеметрія та RSSI FPV-дрону

Вибрано рівні потужності VTX передавача, які відповідають умовам польоту (25 мВт для приміщень, 200 мВт та 500 мВт для відкритих просторів)

та використано канал з найменшими перешкодами в смузі частот “RACEBAND” (рисунок 4.9).

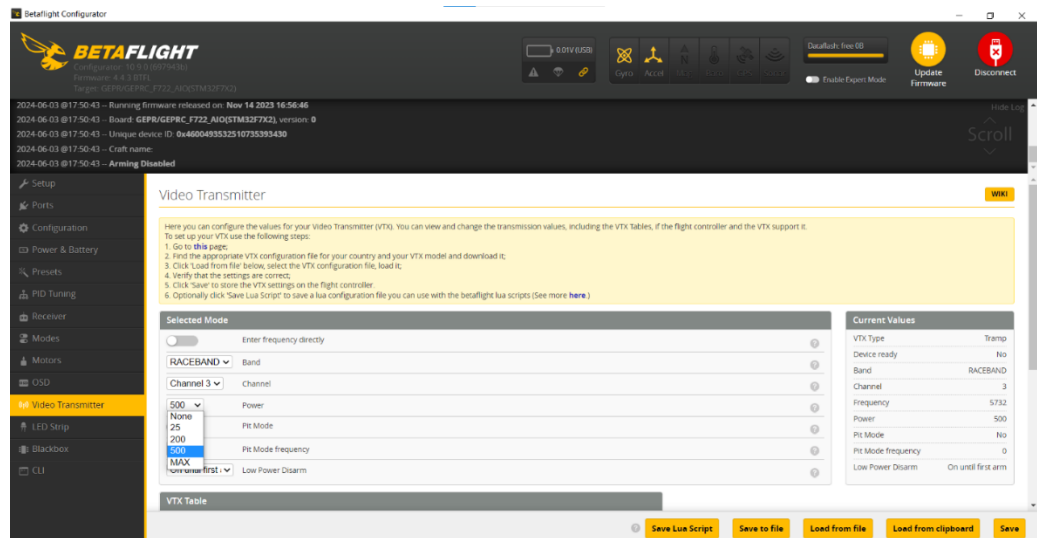


Рисунок 4.9 – Рівні потужності VTX передавача

4.2.3 Налаштування FPV-окуляр Skyzone Cobra SD

Оновлено прошивку. Встановлено канали з найменшими перешкодами.

Увімкнено режим “diversity”, для покращення стабільності сигналу, використовуючи дві антени.

4.3 Апаратна оптимізація та налаштування FPV комплекту

4.3.1 Розробка Cloverleaf антени для покращення якості зв'язку FPV-дрона

Антенa Cloverleaf складається з кількох елементів (пелюсток), які випромінюють сигнал із круговою поляризацією, що зменшує багатопроменеві перешкоди. Основний принцип роботи антени базується на чвертьхвильових резонаторах, що утворюють пелюстки, які розташовані під кутом 120° одна від одної для трьохелементної антени або 90° для чотирьохелементної (додаток В).

Основними матеріалами для виготовлення Cloverleaf антени є:

- Мідний або латунний дріт діаметром 1-2 мм.
- Коаксіальний кабель (RG316 або RG58).
- Роз'єми (SMA або RP-SMA).

Довжина пелюсток розраховується як чверть довжини хвилі ($\lambda/4$), де $\lambda = 300 / \text{частота в МГц}$. Для частоти 5800 МГц, $\lambda = 300 / 5800 \approx 51.7$ мм – довжина дроту. Тоді як довжина пелюсток буде $51.7 / 4 \approx 12.9$ мм (рисунок 3.11).

Враховуючи праву поляризацію сигналу антени встановленої на дроні, потрібно припаяти чотири кінці пелюсток до центрального провідника від коаксіального кабелю, та інші чотири кінці пелюсток до екрану (обплетення) з кутом нахилу в праву сторону (рисунок 4.10).

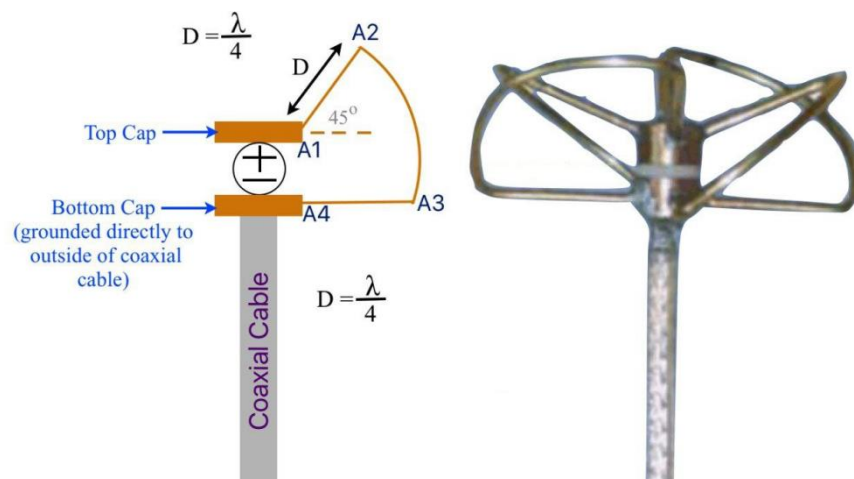


Рисунок 4.10 – FPV антена “Cloverleaf”

Для покращення характеристик Cloverleaf антени можна змінити радіус вигину та кут пелюсток для досягнення кращих частотних характеристик.

4.3.2 Патч антена для покращення прийому сигналу FPV-дрона

У FPV-системах, крім використання всенаправленої антени типу cloverleaf, також використовуємо направлену антену, патч антену з круговою поляризацією. Така комбінація дозволяє оптимізувати прийом сигналу, забезпечуючи стабільність зв'язку в різних польотних режимах.

Патч-антена працює на принципі резонансу. Електромагнітні хвилі, які поширюються між патчем та заземлюючою плитою, викликають стоячі хвилі. Розміри патча приблизно дорівнюють в півхвилі довжини випромінюваної або прийнятої хвилі на робочій частоті. Це забезпечує максимальну ефективність передачі (рисунок 4.11) (додаток).

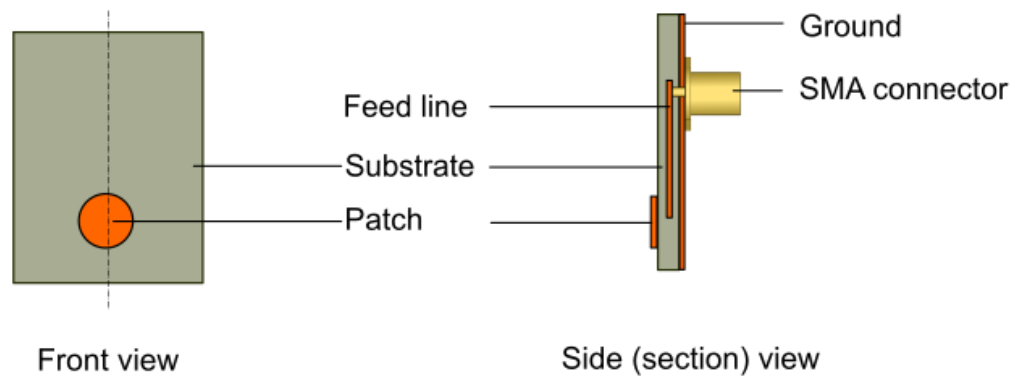


Рисунок 4.11 – FPV антена “Patch Microstrip Circular”

Патч антена з коефіцієнтом посилення 5 dBi та кутом покриття може 90-120 градусів у горизонтальній площині та 60-90 градусів у вертикальній площині, забезпечує помірне посилення, що є ідеальним для балансу між дальністю дії та шириною покриття відповідно до дрона sinebot 30 який в основному використовується на близьких відстанях (до 2 км). Така антена добре справляється з прийомом сигналів, не зважаючи на невеликі перешкоди та відстань.

4.3.3 Оптимальне розміщення антен для мінімізації перешкод і забезпечення найкращої якості сигналу комплекту FPV.

Антена передавача розміщена якомога вище і подальше від інших електронних компонентів, таких як батареї та регулятори швидкості, щоб зменшити електромагнітні перешкоди (рисунок 4.12).



Рисунок 4.12 – Розміщення антени передавача дрону

Антени diversity-приймача розташовані під кутом 90° одна до одної для забезпечення максимального покриття (рисунок 4.13).



Рисунок 4.13 – Розміщення антени diversity-приймача

Антенa приймача лінійно-горизонтальної поляризації на дроні розташована паралельно до антени передавача контролера (рисунок 4.14).



Рисунок 4.14 – Розміщення антен лінійно-горизонтальної поляризації

4.4 Тестування оптимізованого комплекту FPV-дрона

Відключення фільтрації АЦП на пульті управління сприяє зменшенню затримок у передачі сигналу. Згідно з дослідженнями, це може призвести до зниження затримок на 5-10% в залежності від вихідних налаштувань системи.

Оновлення прошивки передавача ELRS до актуальної версії має значний вплив на стабільність зв'язку. Використання оновлених алгоритмів може підвищити ефективність передачі сигналу на 15-20% у порівнянні з попередніми версіями, забезпечуючи кращу стійкість до шумів та інтерференцій.

Встановлення параметра "REGULATORY_DOMAIN_ISM_2400" для максимальної потужності передавача дозволяє досягти оптимальної ефективності зв'язку у бездротових системах. Це може підвищити сигнал до 250 mW, що є максимальною для даного контролера, і забезпечити стабільний зв'язок на значній відстані.

Частота оновлення пакетів на рівні 250 Гц є оптимальною для забезпечення стабільного і швидкого зв'язку між контролером і FPV дроном.

Використання цієї частоти знижує затримки і покращує реакцію системи на команди пілота.

Використання режиму "diversity" з двома антенами у FPV-окулярах значно підвищує стабільність сигналу і зменшує ймовірність втрати зв'язку в умовах інтерференції. Це може підвищити якість отриманого відеосигналу на 20-30%, забезпечуючи більш плавний і надійний перегляд в реальному часі.

Антени Cloverleaf завдяки їх здатністю забезпечувати кругову поляризацію, що зменшує багатопроменеві перешкоди та забезпечує більш стабільний прийом сигналу показують значно кращі результати у порівнянні зі стандартними антенами окулярів Cobra SD. на відкритому просторі, покращуючи силу сигналу, дальність прийому та стабільність з'єднання на 15-20% . У місцевості з багатьма перешкодами, такими як місто або ліс, покращення сигналу від cloverleaf антени може бути ще більш помітним. В таких умовах вона може надати покращення сигналу від 20% і більше. Однак в умовах закритих приміщень антена типу Cloverleaf має кращий прийом сигналу лише на рівні 5-10%, оскільки багатопроменеві перешкоди і поглинання стінами значно впливають на якість прийому (рисунок 4.15).



Рисунок 4.15 – Результати тестування Cloverleaf антени

Патч-антена у приміщеннях має кращий рівень сигналу в порівнянні з Cloverleaf -антенною, з орієнтовною перевагою близько 20-30% у випадку коли антени передавача та приймача достатньо чітко направлені одне на одного. Але оскільки патч-антена має кут покриття сигналу 90-120 градусів, нею буде складніше користуватися ніж з всенаправленою антенною Cloverleaf. На відкритому просторі патч-антена має кращий рівень сигналу від 30% і більше. У великих приміщеннях з багатьма перешкодами, такими як стіни або металеві конструкції, патч-антена також може бути кращою на 20-30%. Ці оцінки є приблизними та можуть варіюватися залежно від конкретних умов.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеної кваліфікаційної роботи було вивчено сучасні тенденції розвитку FPV-дронів та визначено основні напрямки їх використання у різних сферах, таких як зйомка з повітря, спостереження за дорожнім рухом, медична допомога, сільське господарство, розваги та безпека.

Проведено детальний аналіз існуючих рішень для покращення якості зв'язку FPV-дронів.

Виконано налаштування контролера FPV-дрону Radiomaster tx12, FPV-дрона GEPRC Cinebot30 та FPV-окулярів Skyzone Cobra SD.

Розроблено та протестовано антену Cloverleaf, що дозволило виявити оптимальні конфігурації для різних умов експлуатації та досягти значного покращення якості сигналу і зменшення перешкод.

Під час тестувань виявлено, що патч антена має кращий рівень сигналу у великих приміщеннях з багатьма перешкодами, такими як стіни або металеві конструкції. Але через направлений тип дії її складніше використовувати в приміщеннях. У відкритих просторах патч-антена показала перевагу у рівні сигналу від 30% і більше у порівнянні з Cloverleaf антеною.

Для досягнення більшої дальності та стабільності сигналу рекомендовано застосовувати спрямовані антени у поєднанні з всеспрямованими антенами на приймачах.

ВИКОРИСТАНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА

1. The Future of Drones: Top Trends to Watch in 2024 - Blue Falcon Aerial. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.bluefalconaerial.com/the-future-of-drones-top-trends-to-watch-in-2024/>
2. Top 10 Industries advancing Drone Applications. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/drone-startups/>
3. Правила використання БПЛА в Україні. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://wondertech.ua/ua/rules>
4. Different Types of Drones Explained with Photos - Aero Corner. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://aerocorner.com/blog/types-of-drones/>
5. Drone Parts Overview. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://drone-zoom.com/drone-parts-overview/>
6. Drone components. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: fpvto.com/learn-about-the-fpv-drone-components-guide/
7. Drone Tech. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dronetechguide.com/>
8. Drone Technologies and Applications. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.intechopen.com/chapters/1154922> - В2
9. FPV goggles. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://oscarliang.com/fpv-goggles/>
10. DJI O3 Air Unit. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dji.com/global/o3-air-unit/specs>
11. HD-zero. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hd-zero.com/fixe-low-latency>
12. Walksnail Avatar. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://rchobbylab.com/buyers-guide/compare/hd-digital-fpv-systems/>

13. FPV antenna. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://oscarliang.com/best-fpv-antenna/>
14. Video transmitter. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://oscarliang.com/video-transmitter/>
15. FPV antenna-swr. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://oscarliang.com/fpv-antenna-swr/>
16. Переваги і недоліки ELRS в порівнянні з іншими доступними протоколами. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://charivne.info/news/expresslrs-proti-inshikh-protokoliv-peredachi-perevahi-i-nedoliki-elrs-v-porivnyanni-z-inshimi-dostupnimi-protokolami>
17. Forward Error Correction (FEC). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.cablelabs.com/blog/beyond-speed-eras-of-broadband-innovation>
18. Geprc. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://geprc.com/>
19. Skyzone. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.skyzonefpv.com/>
20. Radiomaster. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.radiomasterrc.com/>
21. ExpressLRS. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.expresslrs.org/quick-start/installing-configurator/>
22. Betaflight-configurator. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://github.com/betaflight/betaflight-configurator/releases>

ДОДАТКИ

Додаток А. ANALYTICAL PART

1.1 TYPES OF FPV DRONES

Drones, classified 250 and 450 according to the distance between two crossed engines, are divided into single-rotor (helicopter), multi-rotor (multicopter), fixed-wing, and hybrid VTOL fixed-wing drones according to their physical structure.

Single-rotor drones are small-sized helicopters available in both fuel and electric versions. They have advantages such as increased stability and long flight capability but are also accompanied by certain safety risks [4].

Multicopters are the smallest, lightest, and most common drones. They have limited range, speed, height, and payload capacity. Typically, these drones are used for ground surveillance and can fly for up to 50 minutes while carrying a small payload such as a camera.

Multicopters are divided into four main types based on the number of motors.

Tricopters are drones with three motors that can take off and land vertically and have six degrees of freedom along the X-Y-Z axis. Their cost is lower, but they are not symmetrical, which is a disadvantage.

Quadcopters are the most popular type of drone, equipped with four motors and four propellers. They can lift loads of up to 5 kg and provide high flight stability due to their symmetrical design.

Hexacopters are drones with six motors that provide high performance even indoors. They can lift loads of up to 10 kg.

Octocopters are drones with eight motors that can lift loads of up to 25 kg. They are used for heavy work due to their power and reliability [4].

Fixed-wing drones, unlike multicopters, use wings like a conventional airplane to generate lift. They are much more efficient because they only use energy

to move forward, allowing them to cover longer distances and larger areas. Some gasoline-powered models can stay in the air for more than 16 hours.

Thus, the choice of drone type depends on specific tasks and flight requirements, including payload, range, and operating conditions. In this qualification work, we will use a quadcopter because it is required to have high flight stability.

1.1.1 Basic elements of FPV drones

The drone body is the base where all the parts of the drone are placed (Figure 1.1). It has an “X” design with four rays extending from the middle part of the frame. The propellers, motors, and batteries are placed on the frame. All other parts are in the body, especially the flight controller, transmitters, and camera. The F330, F450, and F550 models are the most practical drone bodies. The most important criteria when choosing these frames are the ease of supply of spare parts, the price/quality ratio, and the performance it provides. Despite its high price, the carbon fiber QAV250 is one of the best drone frames because the carbon fiber material reduces the possibility of breakage in the event of a fall [5].



Figure 1.1 - FPV drone body

The propeller is one of the most sensitive parts of the drone and can be easily damaged as it needs to be constantly replaced or installed. Drone propellers come in a variety of shapes, sizes, and materials. These parts, which can be easily dislodged, broken, or corroded during flight, should be inspected. Propellers must be

maintained for smooth flight. Problems with the propellers can cause uneven operation of the engines, resulting in vibrations and unstable flight. This, in turn, can affect the drone's electronics, including the antennas and receivers that are responsible for communication. Propellers are typically made of plastic material, and the shaft and diameter of the propeller are important parameters to consider when changing [5].

The drone's motor is the main dynamo that makes the propellers rotate and provides enough thrust for flight. Two types of brushed and brushless motors are used, which differ in size, weight, and load. Brush motors are preferred for lightweight and partially entry-level drones, and brushless motors are preferred for heavy and professional drones, these motors usually have less impact on FPV communication compared to brush motors (Figure 1.2). When determining a drone motor, size, operation, and speed are important parameters.



Figure 1.2 - FPV drone motors

The main types of FPV drone batteries are lithium-polymer or lithium-ion batteries. Drone batteries are defined as 1s-6s according to the number of cells in the battery. Each cell corresponds to a voltage of 3.7 volts. In this case, 1-cell lithium-polymer batteries are preferred in lightweight drones, while 2s and more cell batteries are used in drones that require higher voltages (Figure 1.3) [6].



Figure 1.3 - FPV drone battery pack

The flight controller provides the necessary control by interpreting signals from various sensors and receivers (Figure 1.4). The flight controller is a printed circuit board that allows the drone to move through the information it receives from the sensors. It converts the received signals into action to set speed and direction, activate the camera, and execute other commands. By combining many sensors, such as gyroscope, magnetometer, and accelerometer, with GPS, flight control CPUs can use the drone's status, speed, position, and direction data to control the flight and vehicle operations according to parameters. These operations are guided by settings defined by the user before the flight. Other sensors also allow for avoiding obstacles and collisions during operation [5].

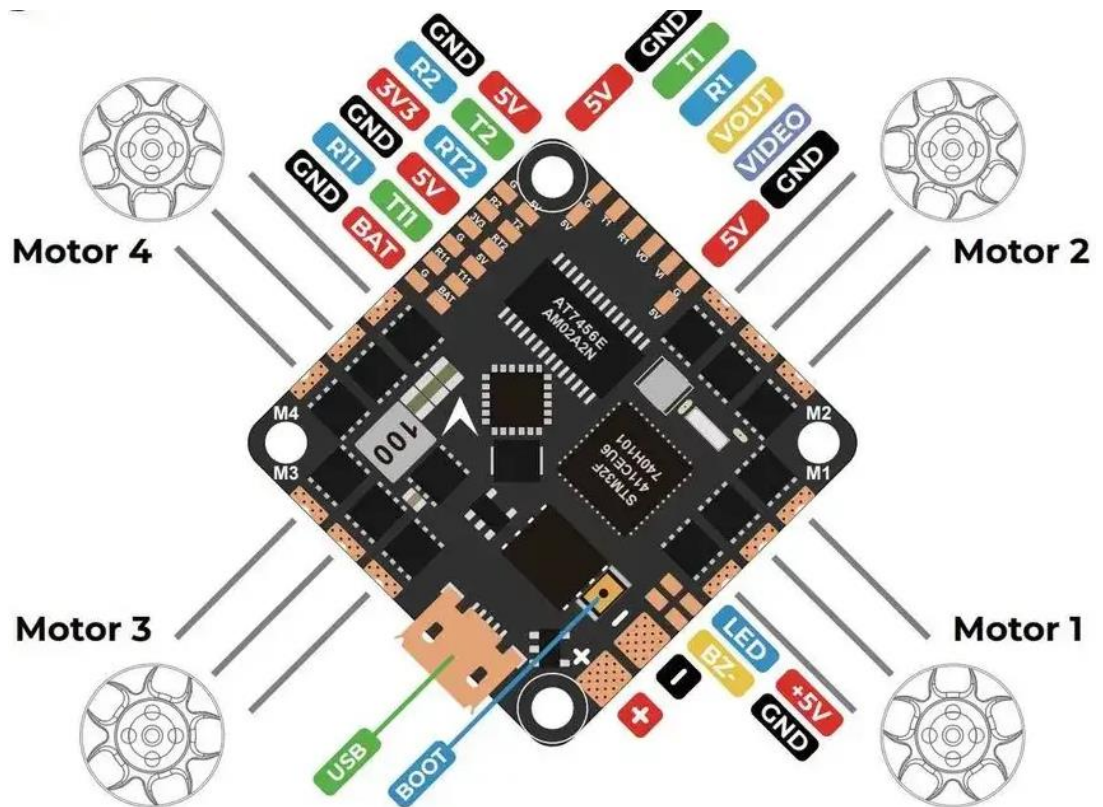


Figure 1.4 - Flight controller of an FPV drone

A power regulator (PDB) is mounted on the drone; the PCB organizes the power connections of the batteries, ESC, and other onboard systems. It is not necessary for all drones, but it helps to create an organized drone (Figure 1.5). Specifically, it is responsible for distributing power from the flight battery to each electronic speed controller for the drone's control board. In some cases, the PDB is also used to power components such as the camera, LED taillights, and flight controller [6].

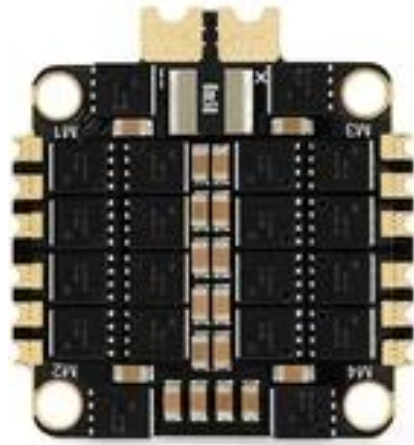


Figure 1.5 - Multifunctional control board of an FPV drone

Like the PDB, the electronic speed controller (ESC) is another important part of the drone. Its task is to control the speed of the electronic motors. Each motor has its own ESC connection. In many standard installations, each branch has a separate ESC. However, 4-in-1 ESC parts are also available and provide different benefits.

A drone controller is a tool for controlling a drone (Figure 1.6). The most important feature of controllers is the number of channels. The number of channels should be the same as the type of command given to the drone. Although 6-channel control is mostly used in drones today, this number can increase with components such as cameras. The digital display on the controls is another feature that makes it easier to use [6].



Figure 1.6 - FPV drone controller

The receivers collect information (signals) from external sources (radio transmitters) and transmit it to the flight controller, which recognizes commands from the remote control and allows the drone to move (Figure 1.7). Receivers that use radio waves provide very fast and uninterrupted transmission. They typically use a built-in antenna that allows them to receive radio signals. The receiver will have four main channels to control the drone. However, many receivers have auxiliary channels to perform certain functions or trigger flight modes. Five or 6-channel receivers are usually the best models [6].

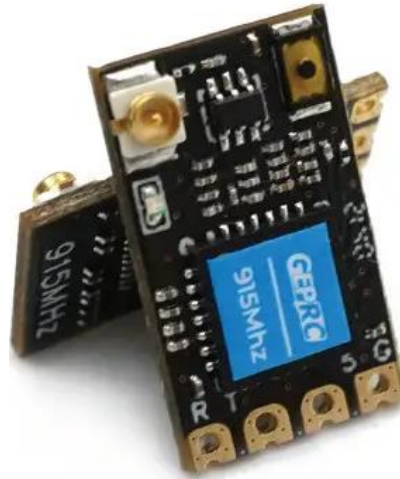


Figure 1.7 - FPV drone receiver

In FPV drones, the video systems are available in different models and configurations, with their parts such as a video transmitter, antenna, and FPV goggles (Figure 1.8).



Figure 1.8 - FPV camera of a drone

The FPV camera is mounted in the front of the drone, and the images from the camera are transmitted to the pilot's goggles or monitor. FPV cameras are of two types: analog and digital [5]. When choosing a camera, parameters such as sensor

type (CCP/CMOS), sensor size, dynamic range, width ratio, field of view (FOV), latency, and low-light performance should be considered [6].

Two sensors are used in cameras: CCD and CMOS. A CCD sensor collects data simultaneously by scanning pixels. It has less jelly effect due to a global higher number of images, performance with an extended dynamic range, good performance in multi-light and low-light conditions (WDR), and better black-and-white transition than CMOS. CMOS sensors collect serial data for all pixels on the horizontal and vertical axes. This process can cause delays. CMOS sensors can typically have moving shutter image distortion, which is the jellybean effect that occurs when a CMOS sensor collects data line by line from pixels. These sensors have good color accuracy and performance, low power consumption, and are less expensive.

Another factor that affects the image quality in cameras is the size of the sensor. Low-light performance and dynamic range depend on the size of the sensor. The larger the sensor size, the larger the field of view, as it increases the size of the lens and low-light performance. Dynamic range improves the image in bright and dark conditions according to the light intensity and allows the user to comfortably see the desired object. Cameras have two aspect ratios, 16:9 and 4:3. Many cameras today have an adjustable dual-width balance. The field of view (FOV) and angle are important user characteristics. The larger the angle, the more difficult it is to see distant objects due to fisheye. The smaller the field of view, the closer and clearer the image [6].

On the other hand, reducing the length of the lens or increasing the size of the sensor increases the field of view. The unit of measurement “lux” is an important characteristic when shooting in low-light conditions, and increasing this value improves the quality of low-light photography. As the sensor gets bigger, its area increases, which results in more light being captured and a slower shooting speed.

Drones, cameras, and sensors detect differences, modeling, classification, development, and changes, especially for agricultural applications. Image sensors such as red, green, and blue (RGB) are widely used, as well as near-infrared,

multispectral, hyperspectral, thermal, and distance sensors such as LiDAR and search and rescue (SAR).

A multispectral imaging sensor makes it easy to detect differences in the target area by using sensors that are sensitive to specific wavelengths along the electromagnetic spectrum. The types of sensors and functions used for this purpose are divided into green, red, and blue visible bands, red edges, and near-infrared [7].

Visible light has a wavelength in the range of 400 to 700 nm. It determines regional features, elevation modeling, and object counting applications, especially for agricultural use.

Red edge: The 717 nm center is a band corresponding to a 12 nm bandwidth. This band provides information about phytosterols and chlorophyll. Accordingly, it is used for plant health, plant counting, and water management.

Near Infrared (NIR): The 842 nm center is a band corresponding to a bandwidth of 57 nm. This reflection is used in soil and moisture analysis.

Like other spectral images, hyperspectral imaging collects information and processes it in the electromagnetic spectrum. However, in addition to visible light, which the human eye can detect in three bands (red, green, and blue), spectral imaging examines objects using a wide part of the electromagnetic spectrum. In other words, by dividing the image into many bands, this technique makes it possible to capture objects and their properties in a much wider range of bands than what is visible in images with a single camera. In particular, it is a technology that can be used to detect underground resources in mining, agriculture, disease and pest prevention, military, thermal infrared hyperspectral imaging, detection of colorless and odorless substances in the air, environmental issues, and detection of leaking toxic waste. Despite the advantages of hyperspectral imaging, such as broad-spectrum imaging, it is very expensive, and complex processing processes pose a significant challenge [7].

A thermal imaging system is an imaging system based on invisible IR energy (heat) and determines the overall image structure, colors, and shapes that are formed

according to the IR energy. While conventional cameras create images through light, thermal cameras create images through heat.

Thermal imaging cameras are used to map the amount of water in the soil (SWC) as a function of the land surface temperature (LST). Thermal cameras have limited spatial resolution, which often causes difficulties in homogeneous areas such as farmland with bare soil. It is especially used in agriculture to determine plant water requirements, detect diseases, and for phenotyping [7].

The collection and processing of a large amount of data collected by different types of sensors can affect the bandwidth of the communication channel between the drone and the controller. The data transmission system must be powerful enough to accommodate and transmit this data in real-time to ensure reliable communication.

1.2 FPV DRONE TECHNOLOGIES

1.2.1. Radar positioning and homing

Modern drones can operate in both GNSS and non-GNSS modes, using a combination of global navigation satellite systems (GNSS) such as GPS and GLONASS. This precision navigation system provides 3D mapping, navigation, and search and rescue (SAR) tasks during flight. The satellites take advantage of GNSS satellites when the drone is first powered on. It uses constellation technology. A satellite constellation is a group of synchronized satellites with overlapping coverage areas. The built-in compass allows the drone and the remote control system to know the exact location of the flight. The compass is calibrated to establish a starting point. If the signal between the drone and the remote control system is lost, the drone's position will be returned and the remote control system will be located. This setting is also known as a “fail-safe function”. The radar technology in the drone checks some information on the control screen before the flight starts, confirming that the current conditions are suitable for flight. This information includes that

communication with GNSS satellites has been established and the drone is ready to fly. It provides information such as determining the current location, returning home using the button for any reason, reaching a preset low battery level, and recording a starting point for the Return Home function in the event of a loss of communication between the drone and the remote control, and can easily return to its starting position [8].

1.2.2. Obstacle detection and collision avoidance technology

Drones are equipped with collision avoidance systems for safety reasons. These systems consist of sensors that do not scan the environment but detect obstacles. Data from vision, ultrasonic, infrared, LiDAR, time-of-flight (ToF), and monocular vision sensors convert images into 3D maps, allowing the flight controller to detect and avoid an object. With the help of software algorithms and SLAM technology, 6-sided obstacles are detected using this data, and the necessary actions are taken to prevent them [8].

1.2.3. Drone movement patterns

Roll is the Z-axis at the front and back of the drone. This means that it rotates around the axis (Figure 1.9).

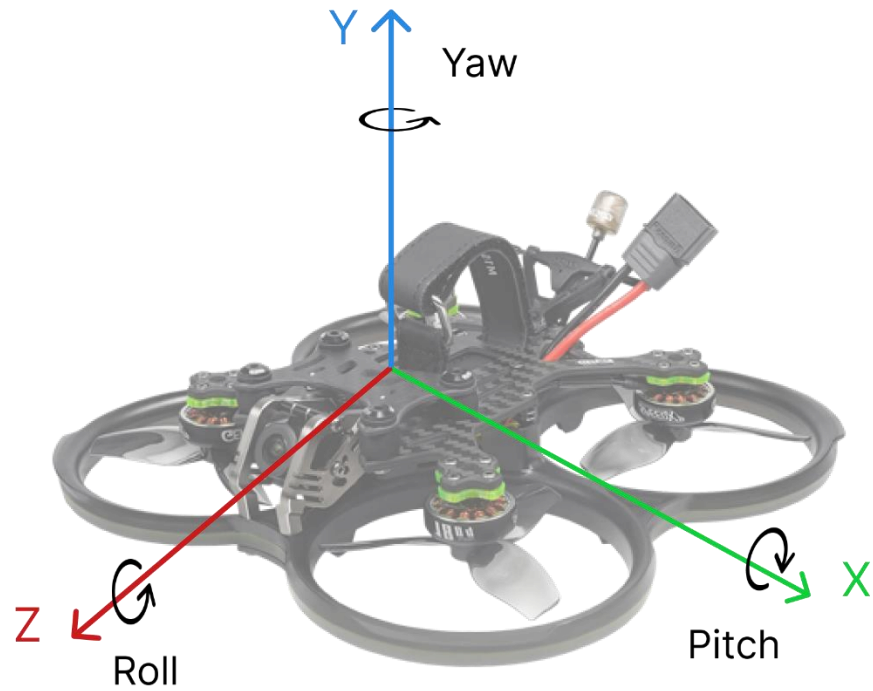


Figure 1.9- Movements of an FPV drone

Pitch is the X-axis, the front and back of the drone moving up and down.

Yaw is the Y-axis, which runs between the top and bottom of the frame, passing through the center of gravity of the drone. It means rotational movement along the axis. In other words, it is the movement of the front end from right to left [8].

1.2.4. Gyroscopic stabilization, IMU, and flight controllers

The gyroscope instantly reacts to the various forces entering the drone, providing the necessary navigation information to the central flight controller. The Inertial Measurement Unit (IMU) determines the current acceleration rate using the accelerometer and gyroscope. The IMU includes a magnetometer to calibrate against drift during flight. The gyroscope and IMU are the main components of the drone's flight controller. Gyroscopic stabilization technology is one of the components that provides the drone with a smooth flight through the use of all these components [8].

1.2.5. Creating 3D maps and models

Hyperspectral, multispectral, LiDAR, and thermal imaging sensors of drones are created using 3D digital surface models (DSM) of buildings, land, and landscape, as well as digital elevation maps (DEM) [8].

Time-of-flight (ToF) is a precision mapping and 3D imaging technology that emits a very short pulse of infrared light and measures the rotation time of each pixel of the camera's sensor. LiDAR cameras with flash offer a variety of solutions for measuring distances in a captured scene. Thus, operations such as scanning objects, avoiding obstacles, tracking and recognizing objects, and measuring volumes become easier [8].

Converting images into maps and models is just as important as capturing high-resolution drone imagery. Agisoft Photogrammetry, PhotoScan, and ESRI Drone2Map software for 2D/3D mapping and image processing are available for this purpose.

Додаток Б. Плакати

Міністерство освіти та науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій
**Удосконалення параметрів FPV-дрону, шляхом
оптимізації тракту прийому - передачі в
реальному часі**

Кваліфікаційна робота бакалавра

Виконав:

Студент 401ТТ групи

Сухорєбрий О.В.

Керівник:

професор, д.т.н.

Шефер О.В.

Полтава 2024

Актуальність теми полягає в необхідності оптимізації систем передачі даних в FPV-дронах для підвищення точності та оперативності управління. Це особливо важливо в складних умовах або при високошвидкісних маневрах. Дослідження параметрів приймально-передавальної системи може привести до покращення якості відеосигналу, зменшення затримок передачі даних та покращення взаємодії між дроном та оператором.

Об'єктом дослідження є система прийому-передачі даних FPV-дрону.

Метою роботи є удосконалення параметрів FPV-дрону шляхом оптимізації тракту прийому-передачі в реальному часі, що включає підвищення якості та стійкості сигналу зв'язку.

Для виконання поставленої мети в роботі необхідно виконати наступні **завдання**:

- провести аналіз сучасних FPV-систем;
- провести оптимізацію тракту прийому-передачі FPV-системи;
- перевірити оптимізований аналоговий комплект FPV-дрона на якість та стійкість сигналу зв'язку.

Види FPV-дронів

За типом конструкції:

Мультиротори: Включають квадрокоптери, трікоптери, гексакоптери та інші, які мають більше трьох пропелерів.

Планери: Це дрони з крилами, які зазвичай мають один двигун та пропелер, часто використовуються для великих відстаней.

За розміром:

Мікро FPV дрони: Зазвичай менше 100 мм по діагоналі.

Міні FPV дрони: Зазвичай 100-250 мм по діагоналі.

Стандартні FPV дрони: Від 250 мм по діагоналі і більше.



Огляд FPV-систем

Система FPV (First Person View) використовується в дронах для трансляції відео з дрона на землю в реальному часі, що дозволяє оператору керувати ним з віддаленої точки.

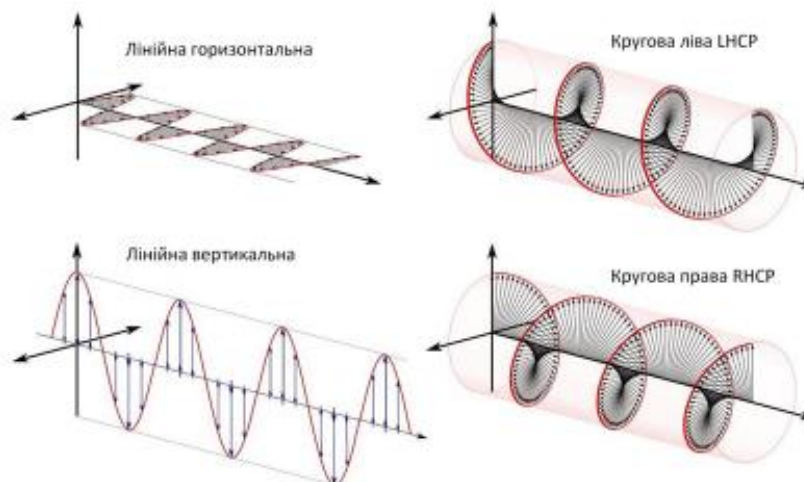
Існує два типи FPV-систем: аналогові та цифрові (або HD)



Діаграма частот 5,8 ГГц в аналогових і цифрових системах FPV



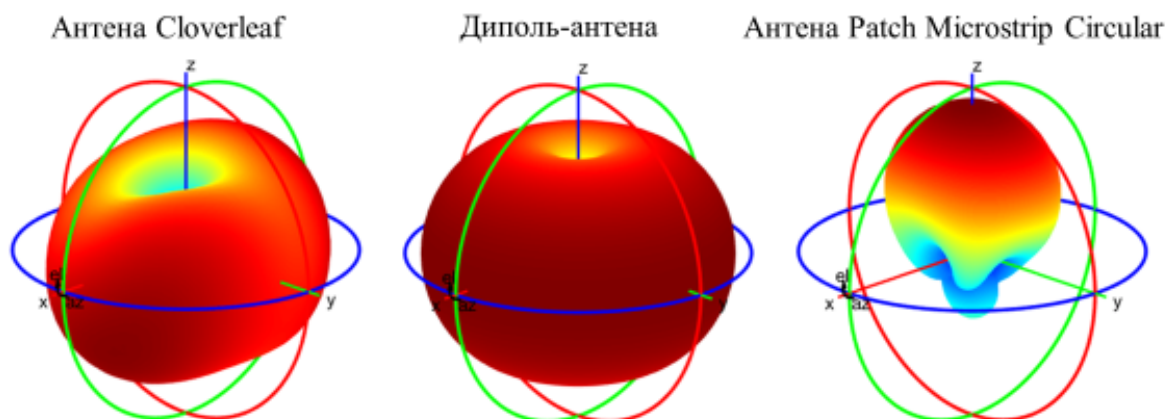
Діаграма поляризації радіохвиль в FPV-антенах



Лійна поляризація забезпечує стабільний сигнал в умовах прямої видимості між передавачем і приймачем.

Кругова поляризація краще справляється з відбиттями від поверхонь, що зменшує втрати сигналу.

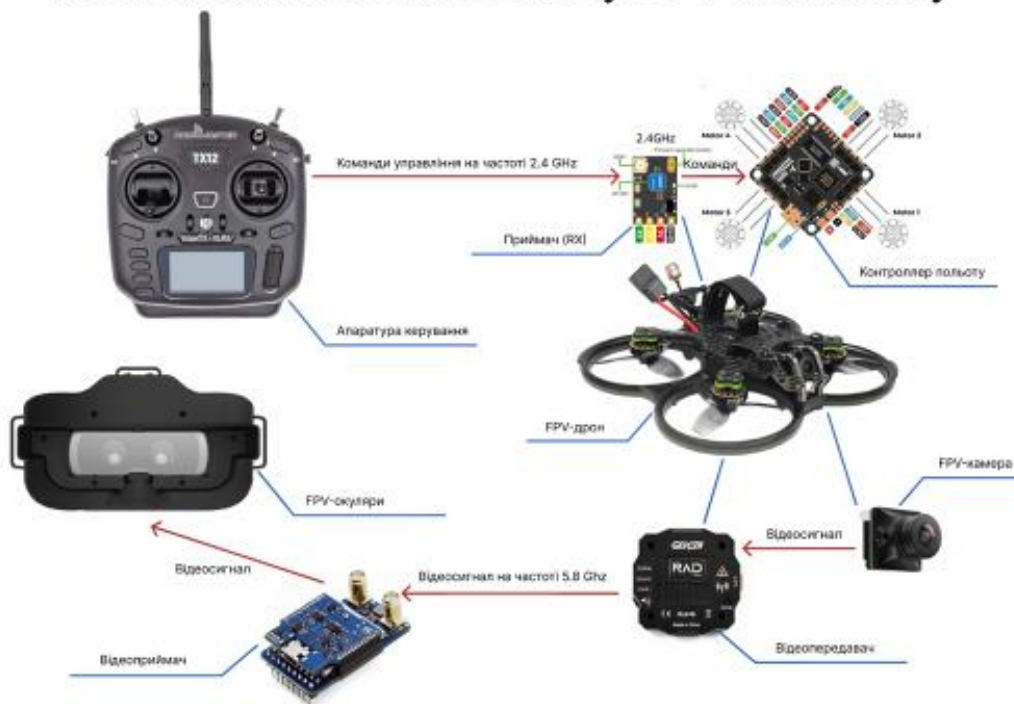
Діаграми направленості FPV-антен



Всенаправлені антени забезпечують стабільний сигнал при швидких маневрах і зміні напрямку.

Направлені антени підходять для статичних або довготривалих прямих польотів, де важлива максимальна дальність зв'язку.

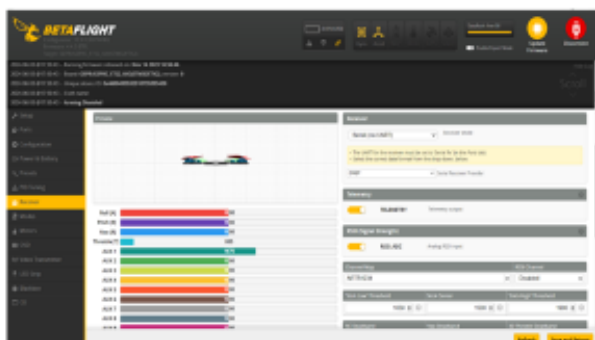
Блок-схема системи зв'язку FPV-комплекту



Налаштування комплекту FPV-дрону за допомогою ПЗ

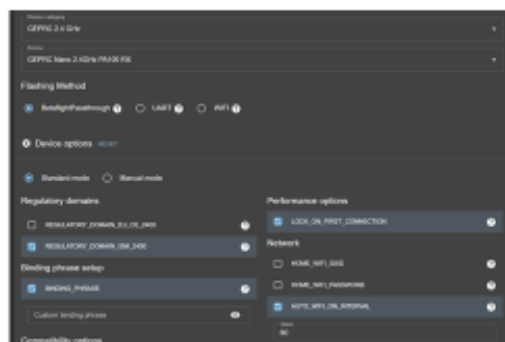
Налаштування в Betaflight

1. Оновлення прошивки FPV-дрону
2. Встановлено конфігурацію політного контролера
3. Налаштування приймача
4. Налаштування PID і фільтрів

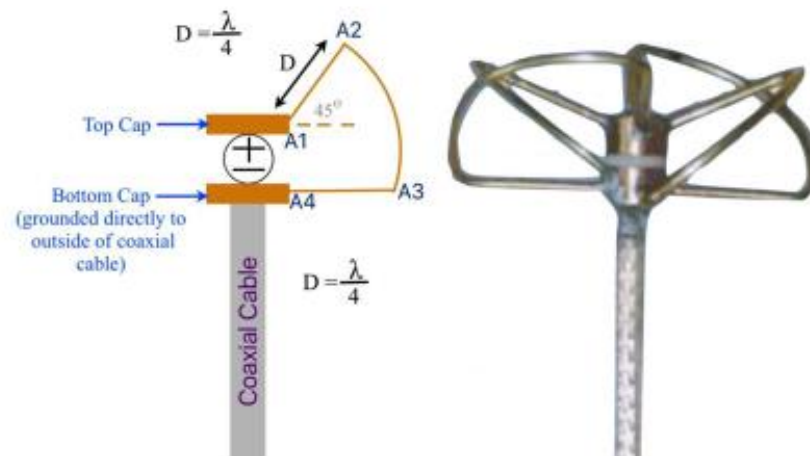


Налаштування ExpressLRS

1. Вибір апаратної платформи
2. Флешування радіомодуля ExpressLRS:
3. Налаштування в Betaflight:
4. Перевірка і тестування зв'язку
5. Налаштування параметрів відкритої мережі (OpenTX)



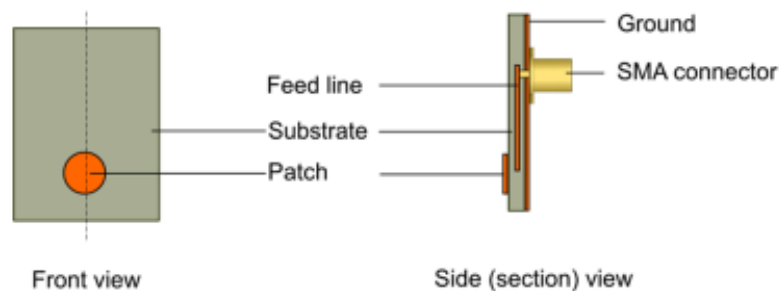
Будова FPV антени Cloverleaf



Cloverleaf антена складається з трьох або чотирьох вигнутих елементів, розташованих симетрично. Ці елементи забезпечують кругову поляризацію, яка допомагає зменшити втрати сигналу через відбиття.

Забезпечує всенаправлене випромінювання сигналу, що робить її ідеальною для використання в FPV-дронах при швидких маневрах.

Будова FPV антени Patch Microstrip Circular



Патч антена складається з металеві пластини, розташовані над заземленою площиною, з'єднаною мікстрічковою лінією (провідником). Забезпечує направлене випромінювання сигналу.

Використовується для передачі сигналу на великі відстані в одному напрямку. Забезпечує високу якість зв'язку і мінімальні втрати сигналу.

Тестування оптимізованого FPV-комплекту

Анени Cloverleaf забезпечують поліпшення стабільності сигналу на 15-20% на відкритому просторі та понад 20% у міських або лісових умовах, але їх ефективність знижується до 5-10% у закритих приміщеннях через багатоприміщенні перешкоди. Патч-анени демонструють покращення на 20-30% у закритих приміщеннях, проте менш зручні через направленість сигналу.

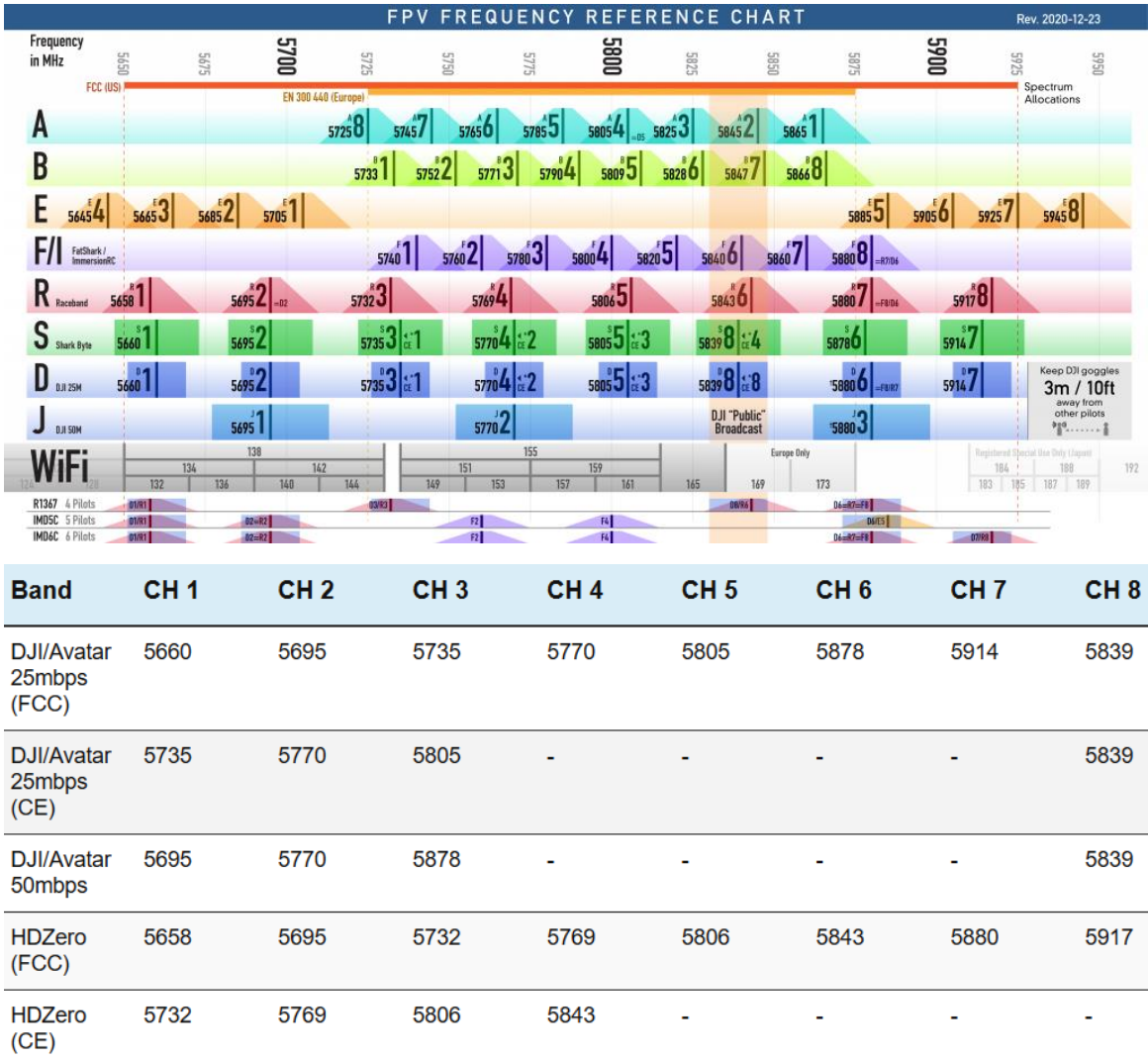
Відключення фільтрації АЦП зменшує затримку сигналу на 5-10%. Оновлення прошивки ELRS підвищує ефективність сигналу на 15-20%. Встановлення параметра "REGULATORY_DOMAIN_ISM_2400" забезпечує потужність сигналу до 250 mW. Частота оновлення пакетів 250 Гц знижує затримки і покращує реакцію на команди. Використання режиму "diversity" підвищує стабільність сигналу на 20-30%, забезпечуючи надійний перегляд у реальному часі.



Висновки

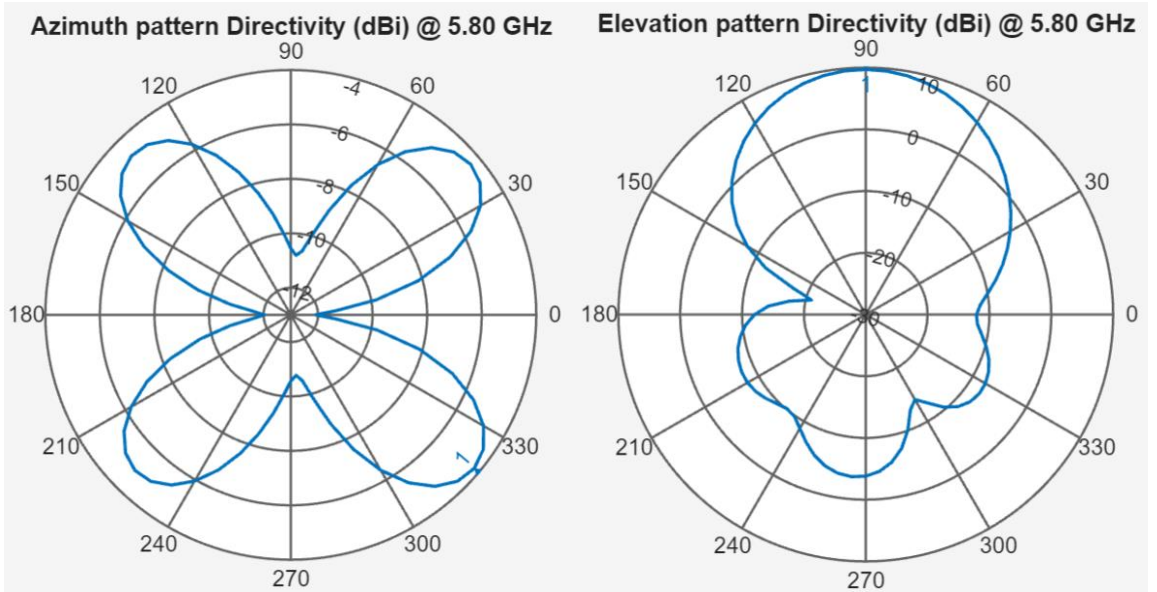
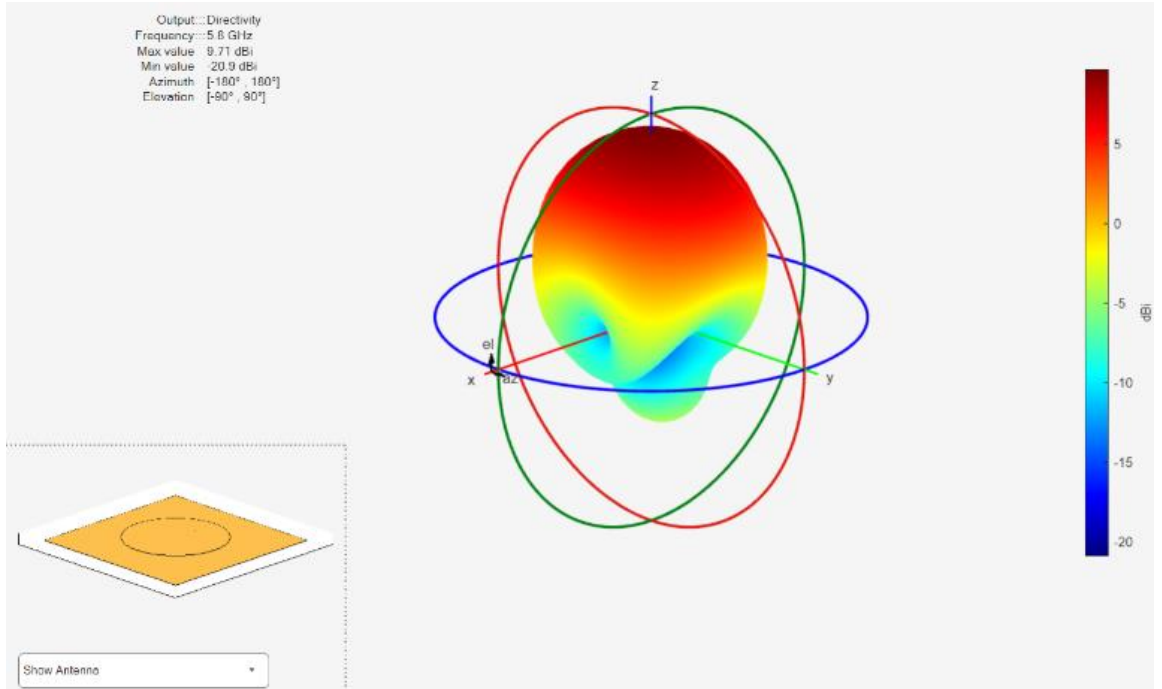
- Проведено детальний аналіз існуючих рішень для покращення якості зв'язку FPV-дронів.
- Виконано налаштування контролера FPV-дрону Radiomaster tx12, FPV-дрона GEPRC Cinebot30 та FPV-окулярів Skyzone Cobra SD.
- Розроблено та протестовано антену Cloverleaf, що дозволило виявити оптимальні конфігурації для різних умов експлуатації та досягти значного покращення якості сигналу і зменшення перешкод.
- Під час тестувань виявлено, що патч-антена має кращий рівень сигналу у великих приміщеннях з багатьма перешкодами, такими як стіни або металеві конструкції. Але через направлений тип дії її складніше використовувати в приміщеннях. У відкритих просторах патч-антена показала перевагу у рівні сигналу від 30% і більше у порівнянні з Cloverleaf антеною.
- Для досягнення більшої дальності та стабільності сигналу рекомендовано застосовувати спрямовані антени у поєднанні з всеспрямованими антенами на приймачах.

Додаток В. Канали та діаграма частот 5,8 ГГц в аналогових і цифрових системах FPV

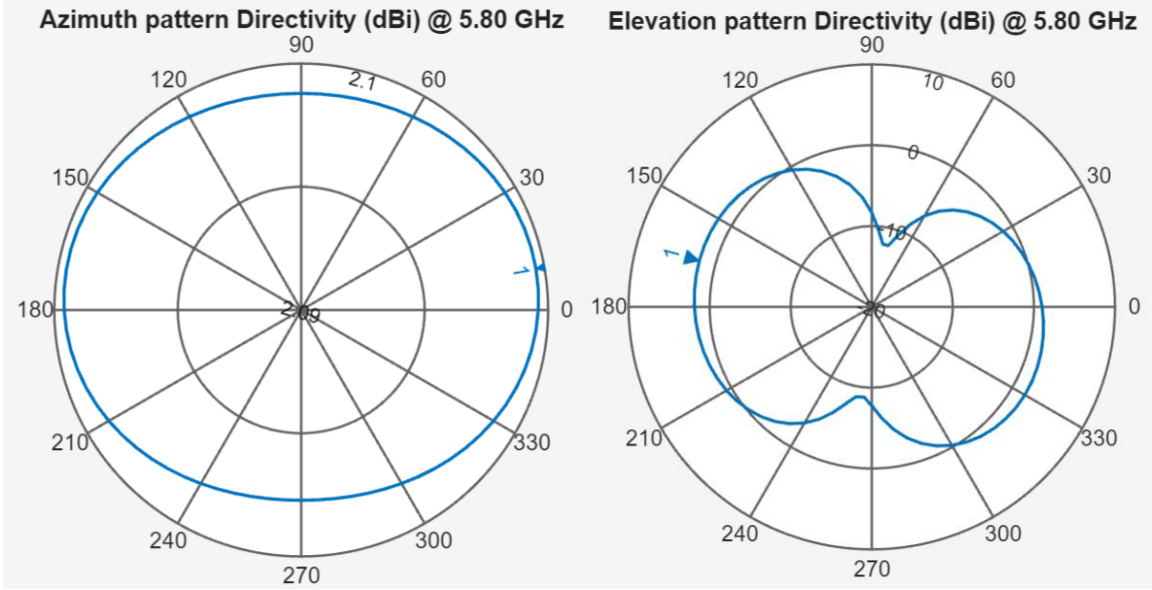
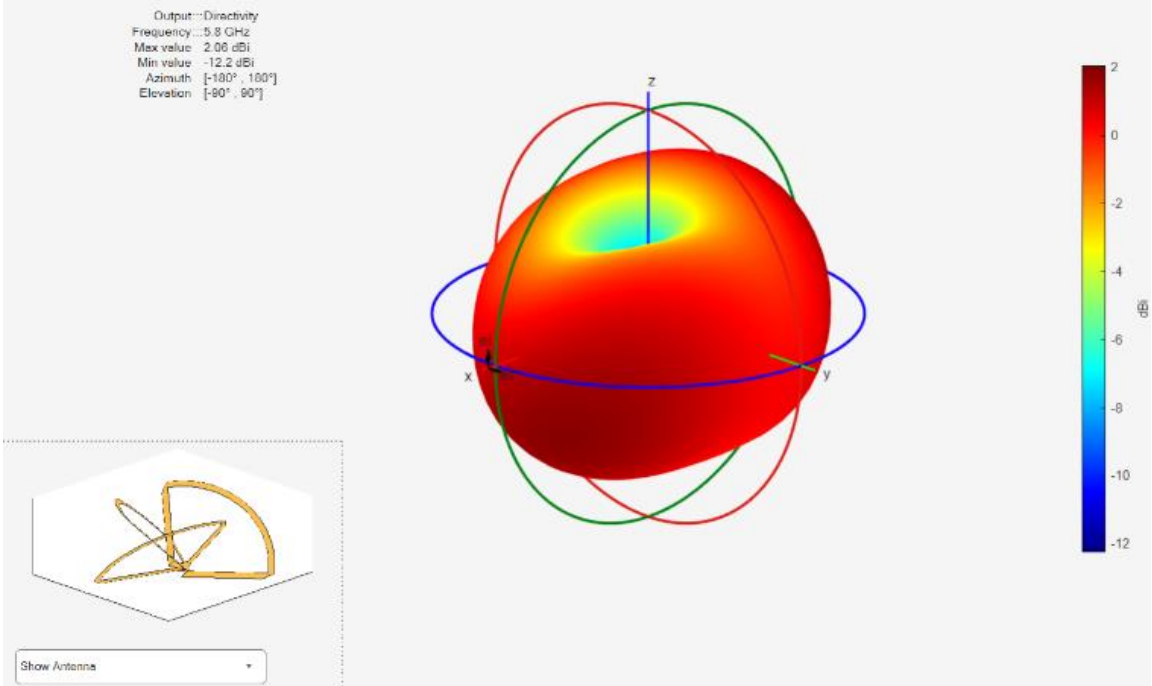


Додаток Г. Діаграми направленості FPV-антен

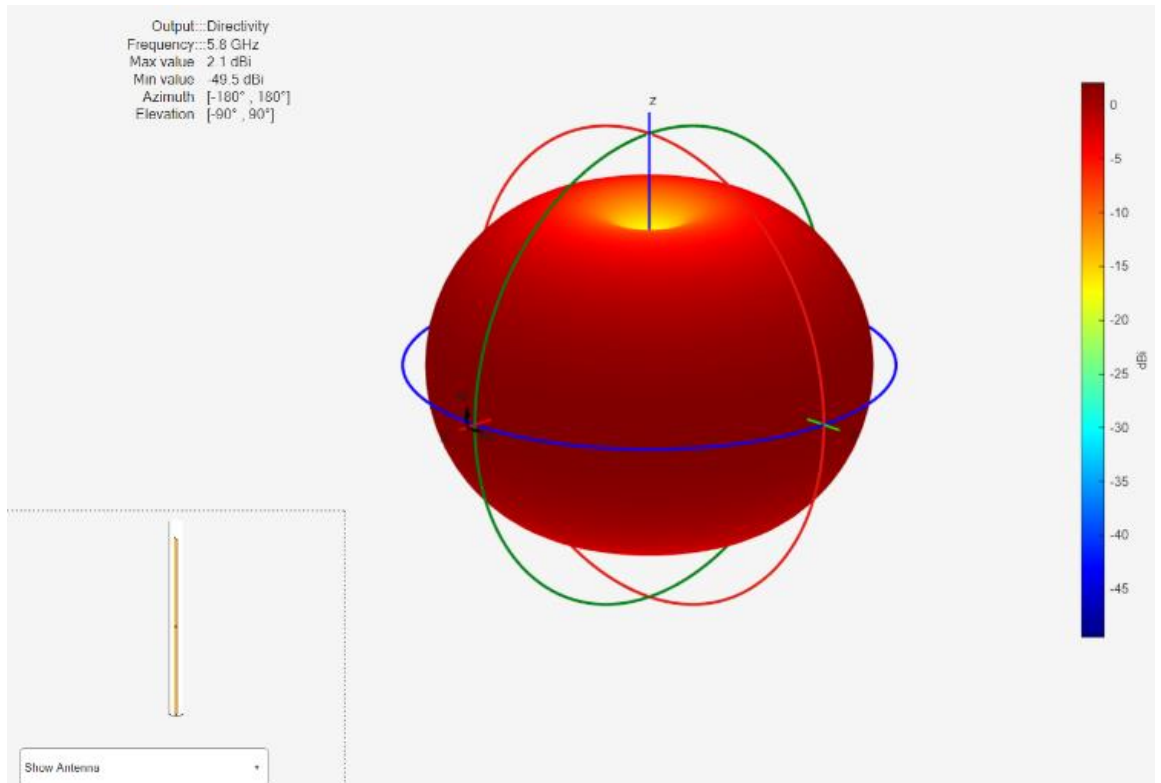
Діаграми направленості патч антени



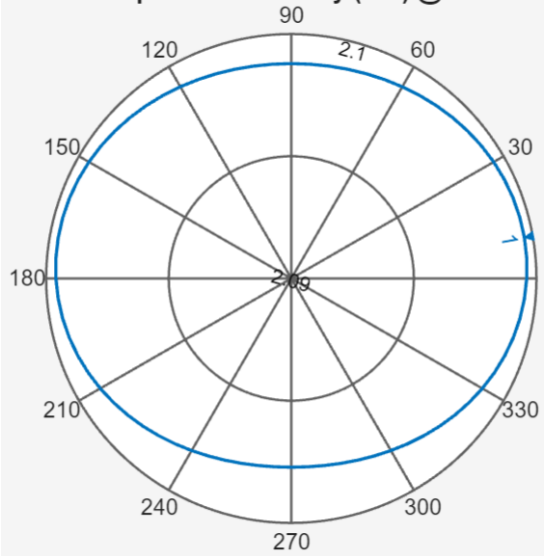
Діаграми направленості Cloverleaf антени



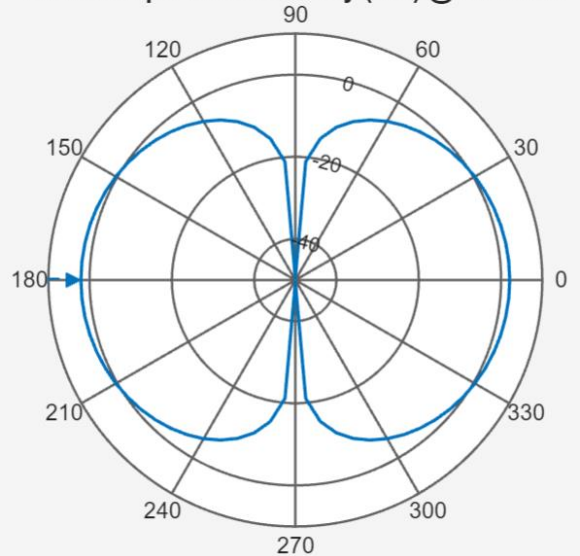
Діаграми направленості диполь антени



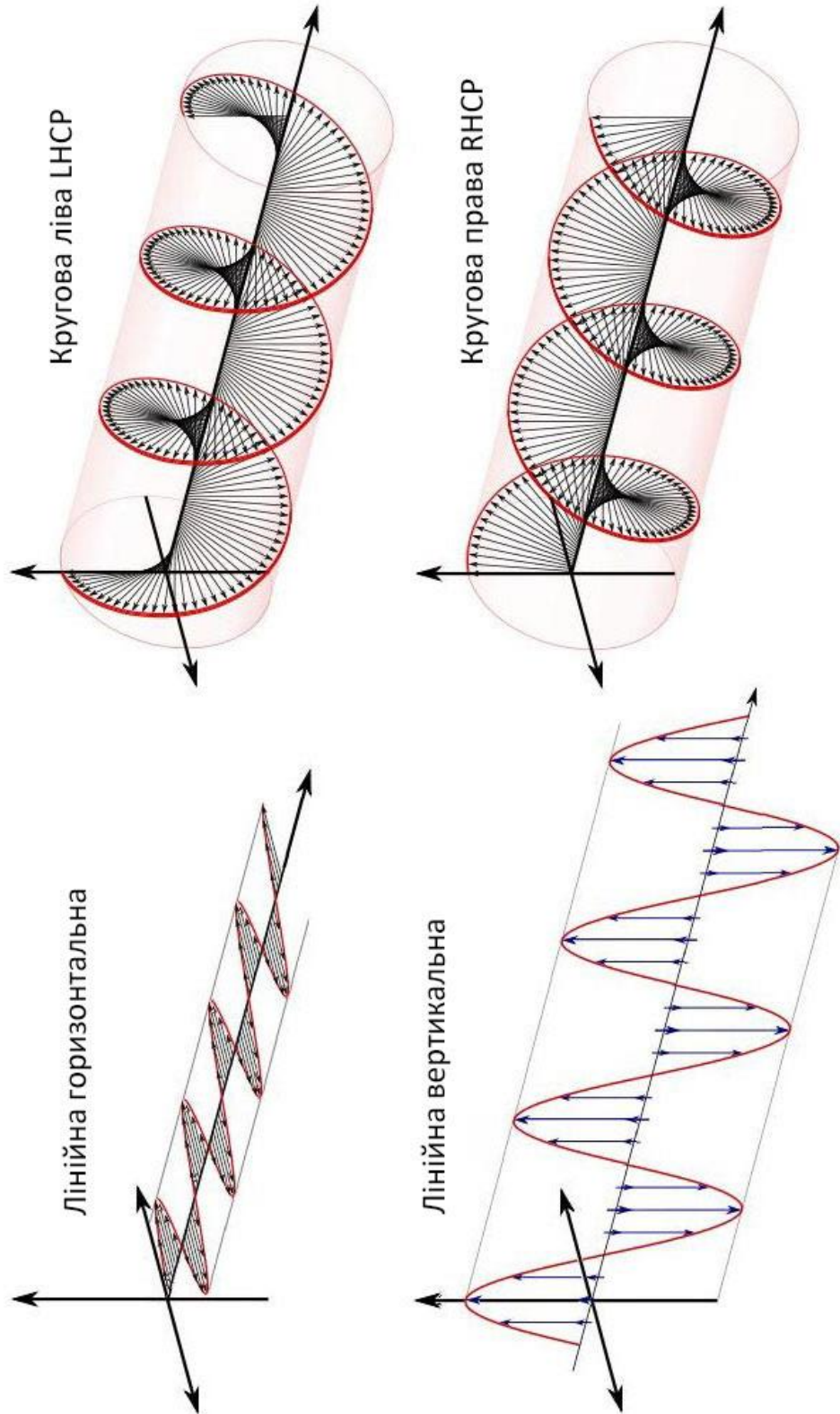
Azimuth pattern Directivity (dBi) @ 5.80 GHz



Elevation pattern Directivity (dBi) @ 5.80 GHz



Додаток Д. Діаграма поляризації радіхвиль в FPV-антенах



Додаток Е. Блок-схема системи зв'язку досліджуваного FPV-комплекту

