

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інформаційної безпеки та електронних комунікацій

(повне найменування інституту, факультету)

Інформаційних технологій та телекомунікацій

(повне найменування кафедри )

## Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

Магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему **РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ВІДЕОПОТОКУ У  
ЦИФРОВІЙ ФОРМІ ДЛЯ FTV**

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

Спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Інтелектуальні технології мікросистемної  
радіоелектронної техніки

Керівник Олександр МАЛІЙ

(прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

2023

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

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій

Кафедра Інформаційних технологій електронних засобів

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація): Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки

(назва освітньої програми (спеціалізації))

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ІТЕЗ** \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

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

Дєєв Михайло Олексійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Розробка системи передавання відеопотоку у цифровій формі для FPV

керівник проєкту (роботи) Малий Олександр Юрійович, к.т.н, доцент, в.о.зав. каф.ІТЕЗ

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

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

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 20 грудня

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) параметри відеопотоку необхідні для візуального контролю польоту БПЛА

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Огляд комерційних систем передавання відеопотоку у БПЛА, розробка структури та конструкції системи цифрового відеозв'язку, вибір програмної платформи для організації цифрової відеосистеми, розробка модуля обробки сигналу відеоматриці, розробка модуля передачі підвищеної потужності, налаштування розробленої системи цифрової передачі відеопотоку, тестування роботи розробленої системи

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

24 слайди

## 6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
<b>1</b>	<b>Олександр МАЛИЙ</b>	<b>03.10.23</b>	
<b>2</b>	<b>Олександр МАЛИЙ</b>	<b>17.10.23</b>	
<b>3</b>	<b>Олександр МАЛИЙ</b>	<b>07.11.23</b>	
<b>4</b>	<b>Олександр МАЛИЙ</b>	<b>21.11.23</b>	
<b>нормоконтроль</b>	<b>Ірина ПОСПЕЄВА</b>	<b>01.12.23</b>	

7. Дата видачі завдання «04» \_\_вересня\_\_\_\_2023\_року.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
<b>1</b>	<b>Огляд комерційних систем передавання відеопотоку у БПЛА</b>	<b>9.10.23</b>	
<b>2</b>	<b>Розробка структури та конструкції системи цифрового відеозв'язку</b>	<b>11.10.23</b>	
<b>3</b>	<b>Вибір програмної платформи для організації цифрової відеосистеми</b>	<b>12.10.23</b>	
<b>4</b>	<b>Розробка модуля обробки сигналу відеоматриці</b>	<b>20.10.23</b>	
<b>5</b>	<b>Розробка модуля передачі підвищеної потужності</b>	<b>15.11.23</b>	
<b>6</b>	<b>Налаштування розробленої системи цифрової передачі відеопотоку</b>	<b>25.11.23</b>	
<b>7</b>	<b>Тестування роботи розробленої системи</b>	<b>02.12.23</b>	
<b>8</b>	<b>Оформлення ПЗ та захист дипломного проєкту</b>	<b>16.12.23</b>	

Студент(ка)

( підпис )

**Михайло ДЄЄВ**

(прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)

(підпис)

**Олександр МАЛИЙ**

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 62 сторінок, 45 рисунків, 16 джерел.

БЕЗПЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ, ПОЛЬОТНИЙ КОНТРОЛЕР, КАМЕРА, ВІДЕОПОТІК, ПЕРЕДАВАЧ, ДИСПЛЕЙ, ПРОГРАМА, WIFI, ПІДСИЛЮВАЧ

Мета роботи – дослідити системи передачі відеоданих які використовуються у БПЛА та розробити та перевірити роботу системи цифрового відеопотоку для використання на БПЛА різних типів.

Об'єкт дослідження: системи передавання відеопотоку.

Предмет дослідження: цифрова система передавання відеопотоку з підвищеним радіусом роботи та швидкістю обробки кадрів.

У першому розділі розглядаються огляд області систем передавання відеопотоку з FPV дронів.

У другому розділі проводиться розробка структури, схеми та вибір апаратного забезпечення для реалізації системи.

У третьому розділі розробляються модулі бортового відеозахоплення та передавання потоку даних з покращеними характеристиками.

У четвертому розділі проводиться налаштування розробленої системи та тестування її роботи.

## ЗМІСТ

Реферат .....	4
Вступ .....	7
1 Огляд області розробки та постановка задач .....	8
1.1 Огляд комерційних систем передавання відеопотоку у БПЛА .....	8
1.1.1 Аналогова FPV система .....	8
1.1.2 Цифрова система DJI FPV .....	10
1.1.3 Цифрова система HDZero .....	12
1.1.4 Цифрова система Walksnail Avatar .....	15
1.2 Загальні висновки щодо існуючих комерційних відеосистем FPV .....	17
1.3 Цифрові системи FPV з відкритим кодом .....	22
2 Розробка структури та конструкції системи цифрового відеозв'язку .....	25
2.1 Розробка структури та принцип роботи .....	25
2.2 Вибір обладнання для організації відеосистеми .....	27
2.3 Вибір програмної платформи для організації цифрової відеосистеми .....	37
3 Розробка власного апаратного забезпечення для цифрової системи .....	39
3.1 Розробка модуля обробки сигналу відеоматриці .....	39
3.2 Розробка модуля передачі підвищеної потужності .....	46
4 Налаштування та тестування системи .....	49
4.1 Налаштування розробленої системи цифрової передачі відеопотоку .....	49
4.2 Тестування роботи розробленої системи .....	54
Висновки .....	60
Перелік джерел посилання .....	61
Додаток А – Презентація .....	63



## ВСТУП

Для того, щоб контролювати політ БПЛА, що керується віддалено – оператору треба отримувати відеопотік з камери. Спосіб керування, коли оператор бачить картинку з курсової камери БПЛА від першої особи називається FPV (first person view – вид від першої особи).

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

Різниця між цифровим і аналоговим полягає в типі сигналу. Аналогова система працює, безперервно змінюючи амплітуду або частоту хвилі, тоді як цифрова система спочатку кодує її в одиниці та нулі перед відправкою.

Аналоговий — це найстаріша, найдоступніша та найпоширеніша технологія, вона доступна в частотах 5,8 ГГц, 2,4 ГГц і 1,2/1,3 ГГц. Навпаки, цифрова технологія, яка забезпечує чудову якість зображення, є новішою та набуває популярності. Очікується, що найближчим часом цифрові технології стануть мейнстрімом. Додатково треба зазначити, що при роботі саме з цифровими системами передавання відео можливо додавання систем штучного інтелекту, яки можуть дозволити реалізувати певні функції за оператора (наприклад пошук та аналіз об'єктів в кадрі), а при подальшому розвитку можна навіть казати про реалізацію автопілоту.

Наразі доступні три комерційні цифрові системи FPV для дронів, усі вони є системами на 5,8 ГГц, і жодна з них не сумісна одна з одною, оскільки всі вони є пропрієтарними системами.

Найвідоміші комерційні цифрові системи:

- DJI;
- HDZero;
- Walksnail Avatar.

В роботі було проведено аналіз кожної з перерахованих систем передавання відео більш детально, на основі аналізу поставлено задачі по розробці власної цифрової системи для передавання відеосигналу, яку і було реалізовано в рамках виконання роботи.

## 1 ОГЛЯД ОБЛАСТІ РОЗРОБКИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

### 1.1 Огляд комерційних систем передавання відеопотоку у БПЛА

#### 1.1.1 Аналогова FPV система

Аналогова система FPV – це оригінальна технологія, яка дала старт дронам FPV. Ця технологія десятиліттями не є власністю жодної конкретної компанії, що дозволяє будь-кому створювати компоненти для системи. Отже, це найпоширеніша система на ринку.

На рис.1.1 наведено один з варіантів окулярів пілота для аналогової системи передавання відео з FPV дрона.



Рисунок 1.1 – Окуляри оператора аналогової системи передавання відео з FPV дрона

До середини 2019 року аналогові системи передавання відео були єдиним варіантом FPV. Існують сотні камер, відеопередавачів і окулярів від багатьох виробників, які сумісні між собою. При обмеженому бюджеті, ця система ідеально підходить. Крім того, легкий і компактний характер аналогових відеопередавачів може бути привабливим фактором (рис.1.2).

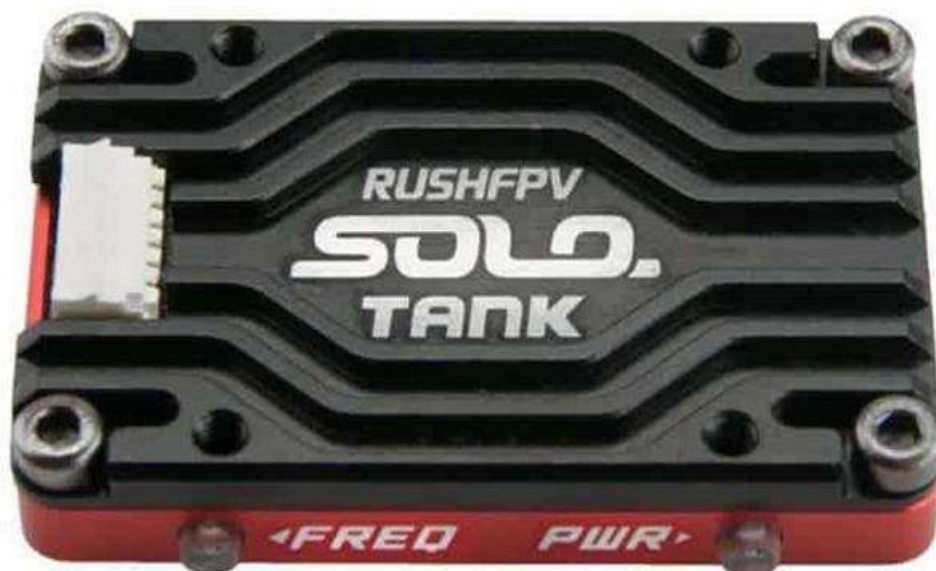


Рисунок 1.2 – Приклад передавача відео аналогової системи

Переваги аналогових відеосистем:

- доступна ціна;
- доступний в плані придбання (велика кількість виробників);
- майже повна відсутність затримки між захватом кадру матрицею камери та відображенням на пристрої відображення пілота;
- величезний вибір апаратного забезпечення (камера, VTX, окуляри) від різних виробників;
- різні набори функцій і ціни.

Недоліки аналогових відеосистем:

- низька якість зображення, фіксоване розширення по вертикалі та горизонталі;
- якість чутлива до перешкод і електричного шуму;
- змінна якість обладнання через велику кількість виробників.

### 1.1.2 Цифрова система DJI FPV

DJI FPV є піонером і золотим стандартом у цифрових системах FPV, відомих своєю винятковою якістю відео та надійністю.



Рисунок 1.3 – Окуляри оператора DJI FPV

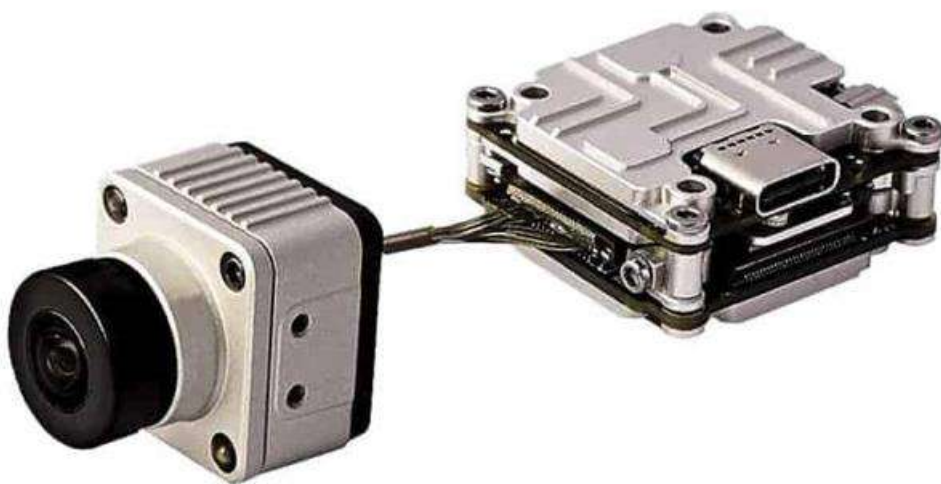


Рисунок 1.4 – Камера з передавачем DJI O3 Air Unit

Останній DJI O3 Air Unit може похвалитися потужною камерою, яку можна порівняти з екшн-камерою, що забезпечує чудову якість зображення. Він підтримує

до 1080p зі швидкістю 100 кадрів в секунду для кристально чистої роздільної здатності. DJI також має технологію стабілізації відео, ідеальну для тих, хто зосереджується на високоякісному відео. Крім того, DJI забезпечує передачу відео на відстань до 10 км, що робить його придатним для FPV на великій відстані. Інтуїтивно зрозумілий дизайн DJI та системний інтерфейс, які доповнюються надійною підтримкою клієнтів, забезпечують безперебійну роботу користувача. Окуляри DJI FPV Goggles 2 мають складні антени, що полегшує їх перенесення та зберігання.

Однак система DJI має деякі недоліки. По-перше, використання DJI FPV означає відданість екосистемі DJI. Останні окуляри DJI Goggles 2 та Integra не підтримують жодних інших систем FPV, і також не можна використовувати інші окуляри для DJI. По-друге, громіздкий O3 Air Unit важить 40 г, що робить його менш ідеальним для гоночних дронів і менших квадрокоптерів. Нарешті, змінна затримка DJI при низькому сигналі не ідеальна для перегонів і агресивних польотів.

Система DJI використовує двосторонню передачу даних, будь-які втрачені або пошкоджені пакети даних повторно передаються, щоб отримати найкраще зображення. Це призводить до вищої якості зображення, але за рахунок вищої (і змінної) затримки.

#### Переваги DJI FPV:

- надійна та перевірена цифрова система FPV;
- незрівнянна якість зображення з найновішим повітряним блоком;
- більш стійкий до перешкод, ніж аналоговий;
- окуляри DJI V1 і V2 FPV підтримують AV-вхід для аналогових систем (потрібен адаптер і відеоприймач), але Goggles 2 ні.

#### Недоліки DJI FPV:

- неможливість використання обладнання для передавання відео крім DJI
- змінна затримка, не ідеальна для перегонів, але менша проблема для фрістайлу та круїзу;
- немає маленького відеопередавача, не підходить для малих дронів FPV
- немає модуля відеоприймача, необхідно мати окуляри DJI;

- окуляри DJI не мають входу HDMI і не підтримують інші цифрові системи FPV;

- жорстке обмеження на радіус дії: обмеження Goggles 2 + O3 до 23 км, обмеження Goggles 2 + Air Unit до 23 км, Goggles V1/V2 + обмеження Air Unit до 12 км.

Сумісність системи DJI FPV може збентежити, оскільки зараз існує два «покоління». Старе обладнання (DJI FPV Goggles V1/V2 і Caddx Vista/Runcam Link) уже вважалось найкращою системою FPV з точки зору якості зображення, нове обладнання (DJI Goggles 2/Integra та O3 Air Unit) просто вивело його на загальний новий рівень. Нове обладнання зворотно сумісно зі старим.

### **1.1.3 Цифрова система HDZero**

До HDZero більшість дронів поклалися на аналогову відеосистему, яка працювала зі стандартною роздільною здатністю та 30 кадрами в секунду. Але система HDZero порушила цю норму. Хоча технічно він працює з роздільною здатністю 720p при 60 кадрах в секунду або 540p при 90 кадрах в секунду, що не настільки високо, як 1080p, запропоноване DJI і Walksnail, якість зображення все ж є значно кращою порівняно з аналоговою, особливо під час високошвидкісних маневрів.

Чіткість дозволяє налаштовувати маневри руху раніше та точніше, підвищуючи продуктивність. Можливість чітко бачити дрібні деталі на відстані у високій роздільній здатності – це справжній прорив у порівнянні з аналоговим зв'язком.



Рисунок 1.5 – Окуляри оператора HDZero

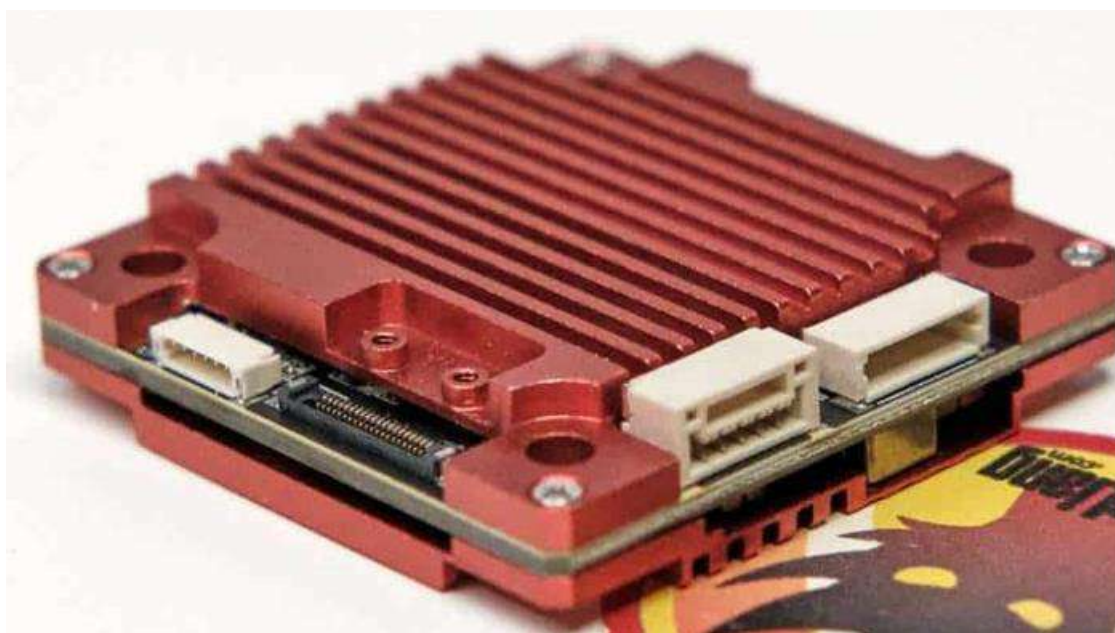


Рисунок 1.6 – Відеопередавач системи HDZero

Система HDZero була розроблена з нуля, щоб мінімізувати затримку. Примітно, що він навіть перевершує аналогові системи, забезпечуючи надзвичайно плавну, майже миттєву відповідь.

Пілоти перегонів віддають перевагу HDZero через його фіксовану затримку. На відміну від DJI та Walksnail Avatar, які мають змінну затримку залежно від потужності сигналу, HDZero підтримує постійну затримку передачі відео, дозволяючи пілотам точно визначати час маневрів.

Окуляри HDZero FPV Goggles мають вбудований приймач HDZero, але також підтримують аналогові приймачі, такі як TBS Fusion, і сумісні з Walksnail Avatar VRX, що робить їх найбільш універсальними окулярами FPV Goggles.

У той час як усі інші цифрові системи використовують двосторонній зв'язок, HDZero використовує односторонній зв'язок, тому будь-які втрачені або пошкоджені пакети даних відображаються на екрані як «іскорки» (імітація аналогових перешкод). Це означає, що ви отримуєте найкраще зображення з фіксованою затримкою, але за рахунок погіршення якості зображення.

#### Переваги HDZero FPV

- краща якість зображення та затримка, ніж у аналогового, з половиною затримки в інших цифрових системах FPV у 90 кадрів в секунду;
- фіксована затримка, незалежно від потужності сигналу та відстані;
- чудова продуктивність за слабкого освітлення порівняно з іншими цифровими системами FPV;
- легкий відеопередавач, доступний для мікродронів FPV
- доступний модуль відеоприймача, який можна використовувати з існуючими аналоговими окулярами з входом HDMI;
- окуляри HDZero FPV підтримують систему Avatar та аналог;
- комбінація камери та окулярів зі швидкістю 90 кадрів/с забезпечує один із найплавніших результатів FPV.

#### Недоліки HDZero FPV:

- нижча якість зображення порівняно з іншими системами HD;
- режим 90FPS працює лише при нижчій роздільній здатності 540р;
- відволікаюча статика, коли рівень сигналу слабшає, подібно до аналогового, що також впливає на загальну якість зображення.

### 1.1.4 Цифрова система Walksnail Avatar

Система Walksnail Avatar відрізняється високою якістю зображення та сумісністю з кількома окулярами FPV.

Спосіб роботи Walksnail більше схожий на DJI, ніж на HDZero. Як і DJI, Walksnail використовує двосторонній зв'язок. Будь-які втрачені або пошкоджені пакети даних повторно передаються для отримання найкращого зображення. Це призводить до вищої якості зображення, але за рахунок більшої змінної затримки. Змінна затримка може бути проблематичною для пілотів, які покладаються на зворотний зв'язок у реальному часі для крутих поворотів і уникнення перешкод.



Рисунок 1.7 – Окуляри оператора Walksnail Avatar

Walksnail представив Race Mode наприкінці 2023 року, він зменшує роздільну здатність відео з 720p/1080p до 540p, щоб визначити пріоритет продуктивності з'єднання, мінімізуючи затримку та стабілізуючи затримку. Це бажана функція для гонщиків і людей, які агресивно літають і готові пожертвувати якістю зображення заради покращеної затримки.



Рисунок 1.8 – Бортова відеосистема Walksnail Avatar

На даний момент Walksnail є, мабуть, найуніверсальнішою комерційною HD-системою. Вони пропонують рішення для широкого спектру застосувань.

Переваги Walksnail Avatar:

- універсальна система
- окуляри Avatar Goggles X підтримують систему Avatar, а також аналогову та HDZero;
- дуже близька до оригінальної системи FPV DJI щодо якості зображення (тобто Goggles V2 з Vista);
- пропонує окуляри FPV, а також модуль відеоприймача для сумісності з існуючими окулярами з входом HDMI;
- бюджетні окуляри, які підтримують Walksnail, доступні за ціною менше 300 доларів
- легкі камери та відеопередавачі, доступні для мікродронів FPV;
- більш надійний, ніж аналоговий, проти перешкод
- подібно до DJI, порушення сигналу може спричинити затримку або зависання відео, але корисне червоне попередження про зв'язки по краях екрана вказує на низький рівень сигналу, чудова функція, якої не вистачає в інших системах;

- доступний режим гонки для меншої та сталої затримки

Недоліки Walksnail Avatar:

- деякі функції все ще розробляються й не працюють належним чином, як-от режим аудиторії, 1080р, високий бітрейт тощо;

- під час використання модуля приймача, залежно від окулярів, з якими його використовують, затримка може бути надто високою.

## **1.2 Загальні висновки щодо існуючих комерційних відеосистем FPV**

Безсумнівно, вартість залишається вагомим вирішальним фактором. Хоча всі HD-системи дорожчі за аналогові аналоги, важливо враховувати довговічність і витрати на ремонт. Висококласні окуляри, камери та системи передачі відео, особливо для установок HD, можуть бути досить коштовними, особливо якщо вони несправні.

Не можна заперечувати, що цифрові системи FPV пропонують суттєве підвищення якості зображення порівняно з аналоговими.

Порівнюючи якість відео між DJI, Avatar і HDZero, стає очевидним, що DJI є лідером, перевершуючи як якість зображення, так і проникнення сигналу. Найновіший блок O3 Air Unit і окуляри Goggles 2 від DJI забезпечують найякісніші зображення, які створюють відчуття, ніби польот відбувається через GoPro. Walksnail Avatar займає друге місце за якістю відео.

З іншого боку, якість відео HDZero не зовсім відповідає DJI і Walksnail. Натомість його візуальні ефекти нагадують оновлену аналогову систему з дещо менш чітким зображенням і випадковими статиками. Незважаючи на це, кожна система має свої унікальні сильні та слабкі сторони, тому вкрай важливо оцінювати конкретні вимоги та пріоритети щодо FPV при виборі комерційної системи передачі відео FPV.

Дальність і проникнення є критичними аспектами, які необхідно враховувати, вибираючи між різними комерційними системами FPV. Аналогове відео, Walksnail, DJI та HDZero пропонують різні ступені діапазону та проникнення, що залежить від таких факторів, як технологія, вихідна потужність та навколишнє середовище.



Рисунок 1.9 – Порівняння якості картинки аналогової та цифрової системи

Важливо відзначити, що доведено, що всі системи FPV працюють на великій відстані за умови, що правильно налаштовано антени та використовується належна вихідна потужність.

Що стосується HDZero, його дальність і проникнення можна порівняти з аналогом. Однак максимальна вихідна потужність HDZero обмежена 1 Вт, тоді як деякі аналогові VTX можуть досягати 2,5 Вт.

З точки зору проникнення сигналу DJI і Walksnail в цілому перевершують аналог і HDZero. І DJI має перевагу над Walksnail, оскільки максимальна потужність Walksnail (1200 мВт) не така стабільна, як продуктивність DJI.

Ще один важливий фактор, який слід враховувати, це середовище польоту. HDZero може не працювати так добре, як DJI і Walksnail, коли мова йде про проникнення, що робить його потенційно менш ефективним під час польоту всередині будівель або маневрування за перешкодами. З огляду на це, усі ці системи можна використовувати для дальньої дії в зоні прямої видимості та досягати понад 10 км за умови належного налаштування антени.

Затримка, також відома як «затримка від скла до скла», означає час, потрібний для переміщення зображення з камери на екран окулярів. Низька затримка є важливою під час польотів поблизу об'єктів або на високих швидкостях, оскільки це може вплинути на те, наскільки важливо бути пов'язаним з рухом дрона та здатність швидко реагувати.

Загалом, аналогові системи та системи HDZero мають найнижчу затримку приблизно від 10 до 20 мс (оновлення всього кадру). Тим часом DJI і Walksnail демонструють дещо вищу затримку, приблизно від 30 до 60 мс залежно від роздільної здатності та частоти кадрів. Хоча низька затримка має вирішальне значення, важливо зазначити, що її вплив на політ залежить від людини до людини, враховуючи різницю в індивідуальному часі реакції. Популярність систем DJI та Walksnail свідчить про те, що їхні вищі рівні затримки не становлять суттєвої проблеми для більшості користувачів.

Також важливо враховувати фіксовані та змінні затримки в системах FPV. Analog і HDZero пропонують фіксовану затримку, зберігаючи постійну затримку протягом усього польоту. З іншого боку, системи Walksnail і DJI мають змінну затримку, яка може коливатися залежно від сили відеозв'язку. Однак слід пам'ятати, що змінна затримка допомагає зберегти якість зображення та є однією з причин кращого проникнення DJI та Walksnail.

Аналогові сигнали схильні до перешкод з навколишнього середовища, що може вплинути на безперервність і якість вашого відео. Навпаки, цифрові сигнали, особливо від систем Walksnail і DJI, менш сприйнятливі до перешкод, забезпечуючи незмінну якість відео протягом усього польоту.

Кожна система FPV по-різному реагує на розрив, коли сигнал слабшає. В аналогових системах можна зіткнутися зі статикою та мерехтінням. З іншого боку, HDZero може створювати білі блоки на екрані. Розлад Walksnail проявляється розмазуванням червоним світлом, що блимає по краях екрана, що служить попередженням про низький рівень сигналу. Системи DJI стають блоковими, зменшуючи деталізацію, але можуть залишатися дещо літаючими.

Між цифровими системами FPV різниця в ціні може бути невеликою, але DJI виходить вперед, оскільки антени включені, а ціни на їхні окуляри останнім часом значно знизилися. Окуляри Avatar постачаються з антенами, але відомо, що вони непридатні для використання та потребують заміни після продажу. HDZero взагалі не постачається з антенами.

DJI не є ідеальним вибором для мікродронів через відсутність невеликих опцій камери та відеопередавача. Навіть його найменший VTX (The Runcam link aka Vista) явно надто важкий і громіздкий для мікродронів, точніше, будь-чого меншого за 2-дюймовий дрон. Новий блок O3 Air навіть більший і важчий, ніж Vista. Найменший безпілотник, який може комфортно нести Vista, – це, ймовірно, 3 або 4 дюйми. Хоча ви можете зняти радіатор і створити так звану «голу перспективу» або «голий O3», це загрожує перегріванням, і блок все ще занадто важкий, що помітно впливає на характеристики польоту.

З іншого боку, і Walksnail, і HDZero пропонують крихітні VTX, спеціально розроблені для мікродронів. Ці передавачі невеликі та досить легкі навіть для 1S Tiny Whoops. Звичайно, аналог залишається чудовим вибором і для невеликих дронів FPV.

Коли справа доходить до польотів FPV на великі відстані, усі системи мають потенціал для хорошої роботи залежно від таких факторів, як вихідна потужність і налаштування антени. Однак існує помітна різниця між аналоговими та цифровими системами щодо вихідної потужності.

Існують аналогові VTX з вихідною потужністю до 2,5 Вт, тоді як цифрові VTX зазвичай мають максимальну вихідну потужність від 1 Вт до 1,2 Вт. Завдяки цій високій вихідній потужності аналогові системи тримають перевагу для екстремальних далеких польотів FPV.

Якщо універсальність є вашим головним пріоритетом, окуляри HDZero Goggles найкращий вибір, оскільки вони підтримують 3 із 4 систем FPV. Вони мають вбудований модуль приймача HDZero, вхід HDMI для використання з модулем приймача Avatar і вбудований відсік модуля приймача для аналогового сигналу.

Важливо відзначити, що більшість аналогових FPV-окулярів середнього/вищого рівня мають входи HDMI, тому їх можна поєднувати з модулями

Avatar і HDZero VRX. DJI не пропонує модуль відеоприймача, тому їх системою можна користуватися лише з їхніми власними окулярами.

Серед доступних камер для кожної системи HDZero, здається, найкраще працює в умовах слабого освітлення. Хоча більшість пілотів літають у світлий час доби, навіть на заході сонця, усі системи FPV можуть досить добре впоратися з цими умовами з відповідними налаштуваннями камери. Якщо польоти в основному вночі, HDZero є найкращим вибором, а аналоговий також може досягти успіху в умовах слабого освітлення з правильною камерою завдяки широкому спектру апаратних опцій.

Аналоговий найпростіший у налаштуванні, потрібно лише підключити камеру та VTX, вибрати правильний канал в окулярах, і на приймальній стороні буде відеосигнал. Крім того, немає необхідності постійно оновлювати прошивку.

Цифрові системи FPV вимагають додаткових конфігурацій і розуміння налаштувань, перш ніж можна буде повноцінно використовувати їх в польоті. Також потрібно відстежувати нове мікропрограмне забезпечення та вирішувати, чи оновлювати його.

Аналогова система FPV вже давно є популярним вибором для багатьох пілотів завдяки своїй доступності та широкому поширенню. Навіть через роки після запуску цифрових систем на ринку все ще є хороший вибір аналогових окулярів, що свідчить про стійкий попит на аналогові системи.

Одна з головних причин того, що аналогові FPV дрони можуть продовжувати використовуватися, — це їх нижча вартість порівняно з цифровими системами. Навряд чи найближчим часом цифрове обладнання зрівняється за вартістю з аналоговим.

Однак ринок аналогового обладнання скорочується, і все менше компаній виробляють обладнання для нього, зміщуючи свою увагу на цифровий ринок, здається малоімовірним, що аналогові дрони FPV будуть повністю замінені цифровими системами в осяжному майбутньому. Такі фактори, як вартість, простота, доступність апаратного забезпечення та постійний попит на доступні варіанти

безпілотників FPV вказують на те, що аналогові системи й надалі матимуть місце в спільноті дронів FPV.

Коли мова йде про необхідність використання обробки зображень в реальному часі, то звісно в будь якому випадку відеосигнал має оцифруватись, а тому краще відразу використовувати цифрові системи. Використання комерційних цифрових систем для таких задач не є доступним атже виробники не розголошують свої протоколи передачі і відповідно при вирішенні задач створення шиучного інтелекту для БПЛА треба шукати некомерційну цифрову альтернативу.

### **1.3 Цифрові системи FPV з відкритим кодом**

Треба зазначити, що крім комерційних систем цифрової відеопередачі для БПЛА в мережі є багато програмних проєктів з відкритим кодом, що дозволяють організувати власну систему цифрового відеозв'язку. До найпопулярніших програмних проєктів організації цифрового відеозв'язку відносяться:

- OpenIPC;
- OpenHD;
- WFB-NG;
- Ruby FPV;
- EZ-Wifibroadcast.

OpenHD — це комплексний пакет FPV, який включає програмне забезпечення для флешування, динамічне екранне меню та програмне забезпечення для наземної станції. Він пропонує підтримку кількох платформ, підтримку кількох наземних станцій, зовнішній перегляд і конфігурацію на Android, Windows і Mac із запланованою підтримкою iOS і веб-браузерів. OpenHD активно розробляється великою спільнотою, групою розробників і комерційними партнерами. Він також має живу карту, яка показує ваше поточне положення літака. Його головні переваги включають щоденну розробку, багатоплатформенну підтримку, активну спільноту та напружену роботу над новими драйверами, апаратним забезпеченням, SOC та спеціальними камерами у співпраці з Veye-Imaging і Arducam. OpenHD також

створює спеціальне апаратне забезпечення для використання FPV, яке є надзвичайно малим і потужним, а також використовує камери, спеціально створені для застосування FPV.

OpenIPC — це розширене програмне забезпечення для IP-камер, яке відоме своєю чудовою зручністю використання та можливістю конфігурації, головним чином зосереджене на покращенні та покращенні функціональності пристроїв безпеки. Частина OpenIPC, яка називається «пісочниця-фрв», додає функціональність FPV для вибраних пристроїв OpenIPC. Ця функція доступна для кількох конкретних пристроїв і може використовувати спрощену версію OpenHD або WFB-NG. Якщо використовується спрощена версія OpenHD, її можна використовувати з QOpenHD, додатком OpenHD Companion. Основними перевагами OpenIPC є його зручність використання, конфігурація та покращення пристрою безпеки. OpenIPC також може використовувати спеціальну плату NVR для перегляду посилання за допомогою екранного меню.

WFB-NG — це пакетний радіозв'язок великої дальності на основі необробленого радіозв'язку WiFi, який супроводжується декількома супровідними сценаріями та зображенням Raspberry Pi 3 (доступні додаткові неофіційні збірки). Основна увага зосереджена на радіозв'язку з базовою функціональністю екранного меню для використання FPV. WFB-NG розроблено для розробників, які хочуть інтегрувати його у власні системи. Його головною перевагою є дуже оптимізоване та тонке посилання, яке можна скопіювати (без екранного меню) на багатьох платформах.

Ruby FPV — це спеціальна FPV відео та телеметрична система, розроблена для ентузіастів FPV. Він має розширене та зручне екранне меню\* та акцентує увагу на повторній передачі пакетів для покращення стабільності відеосигналу. Він також має режим реле. І OTA оновлення. Основними перевагами Ruby FPV є його зручність у використанні, зручні для Google функції та зосередженість на забезпеченні надійного досвіду FPV. Просто будьте готові, що без припаяних кнопок ви взагалі не зможете використовувати Ruby.

EZ-Wifibroadcast: EZ-Wifibroadcast є попередником OpenHD, закладаючи основу для того, що ми зараз знаємо як OpenHD. Це було перше програмне забезпечення, спрямоване на спрощення конфігурації та зручності використання Wifibroadcast-Link.

Підтримувані системами датчики камери.

OpenHD: OV5647, IMX219, IMX477, IMX477m, SC132, AR1335, AR1820HS, OG02B10, AR0234, OV2311, IMX230, IMX290, IMX298, IMX307, IMX327, IMX335, IMX385, IMX462, IMX519 , IMX708 + "X20-Cameras"\* HDMI- Камери + IP Камери + USB-Камери + Тепловізори.

OpenIPC: IMX307, IMX335.

WFB-NG: OV5647, IMX219, IMX477, IMX477m (червоний відтінок), IMX519 + HDMI-камери.

Ruby FPV: OV5647, IMX219, IMX477, IMX209, IMX327 + HDMI-камери.

EZ-Wifibroadcast: OV5647, IMX219, IMX477, IMX209, IMX327 + HDMI-камери.

Отже в роботі пропонується розробка власної цифрової відеосистеми для FPV дрона, що буде підтримувати існуючу програмну систему з відкритим кодом та забезпечувати можливість подальшої обробки відеопотоку, а також забезпечиться можливість передавання на великі відстані з можливістю ретрансляції.

## 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ТА КОНСТРУКЦІЇ СИСТЕМИ ЦИФРОВОГО ВІДЕОЗВ'ЯЗКУ

### 2.1 Розробка структури та принцип роботи

У світі безпілотних літальних апаратів, що постійно розвивається, триває гонка за можливість збільшення відстані передачі відеопотоку з можливістю ботової обробки відеопотоку. Розширення знаменитої Wi-Fi-трансляції –це цифрова FPV і система телеметрії з відкритим вихідним кодом зосереджена на одній місії: скорочення затримки для забезпечення безперервних з'єднань у реальному часі.

OpenIPC, інноваційне мікропрограмне забезпечення, створене спеціально для камер, розблоковує можливості, які колись вважалися неможливими, наприклад, надвисоку частоту кадрів, основну для FPV.

WFB-NG, аббревіатура від "WiFi Broadcast - Next Generation", представляє майбутнє пакетного радіозв'язку великої дальності. Базуючись на необроблених радіотехнологіях Wi-Fi, ця система ретельно розроблена для з'єднання дрона та його наземної станції з низькою затримкою, відео високої чіткості та телеметричним зв'язком. Це дає змогу підключити Raspberri-Pi (можна використовувати NanoPI NEO2 через розмір) до модуля WiFi з чіпом Realtek RTL8812au, щоб створити блок Digital FPV Air.

WFB-NG дає команду картам WiFi перейти в режим моніторингу. У цьому стані картки WiFi можуть вільно надсилати й отримувати будь-які пакети без необхідності асоціації чи очікування пакетів АСК.

Замість серіалізації даних у безперервний потік байтів WFB-NG відображає транспортний протокол реального часу (RTP) безпосередньо в пакети IEEE80211. Це відображення 1:1 гарантує, що затримка залишається мінімальною.

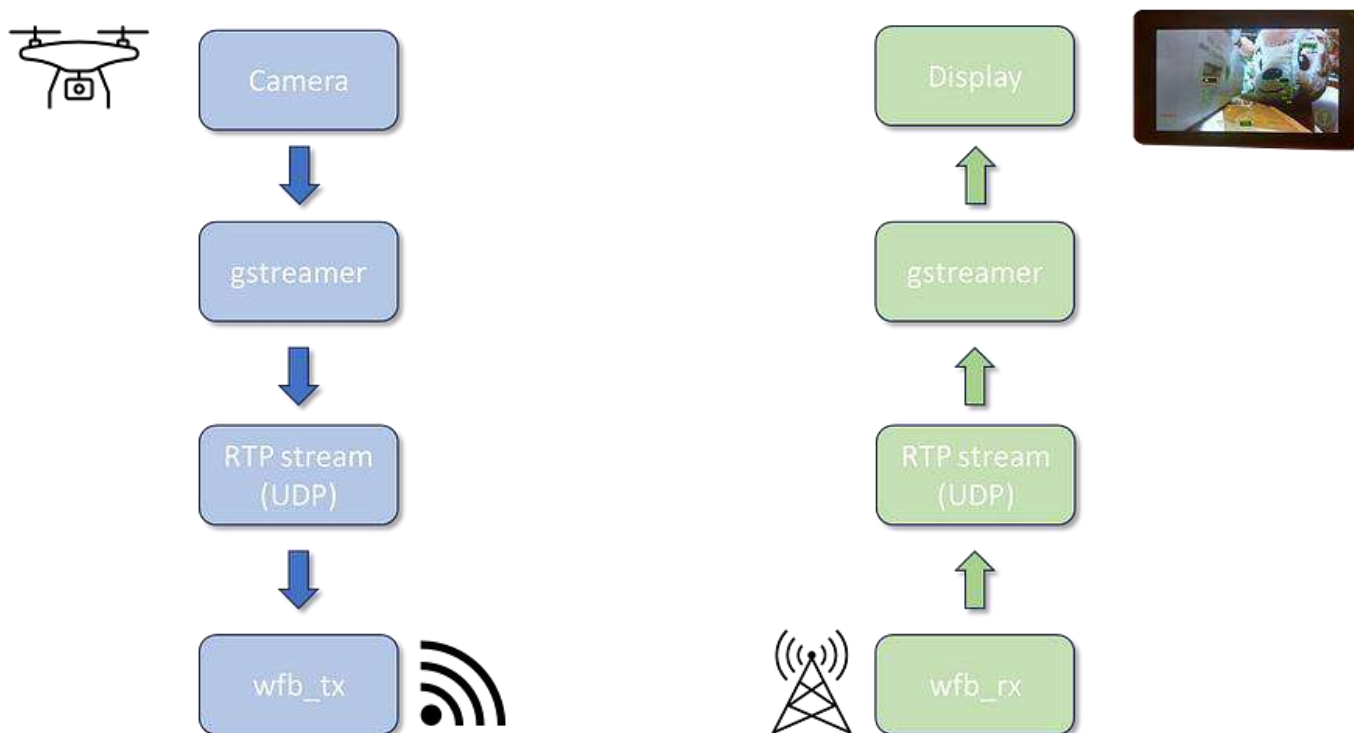


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи передавання відео

Завдяки функції прямого виправлення помилок (FEC) будь-який безперервний пакет у конвеєрі FEC миттєво передається на відеодекодер.

WFB-NG – це не лише відео. Він підтримує двонаправлену телеметрію MAVLink, що ідеально підходить як для MAVLink телеметрії, так і для передачі відео від дрона до оператора.

WFB-NG також полегшує передачу стандартних IP-пакетів через своє посилення. Суть WFB-NG полягає в його дизайні, орієнтованому на FPV (Передача HD з низькою затримкою всього 30 мс). WFB-NG забезпечує передачу відео не тільки високої чіткості, але й швидко та безперебійну.

Різні системи, такі як Raspberry Pi або інші подібні, що підтримують GStreamer, OSD може адаптуватися до будь-якої роздільної здатності екрана та навіть керувати корекцією формату, особливо при переході з PAL на HD.

Перевага WFB-NG полягає в його універсальності. При інтеграції з такими платформами, як OpenIPC, немає потреби в бортових системах, таких як Raspberry Pi. Підтримувана IP-камера в поєднанні зі звичайним модулем WiFi — це все, що потрібно для організації цифрового HD FPV.

## 2.2 Вибір обладнання для організації відеосистеми

Для початкової реалізації цифрової відеосистеми нами було обрано наступне обладнання

В якості камери для встановлення на БПЛА було обрано IMX415+ MStar SSC328Q IP Camera Module

Unifore, провідний виробник обладнання для безпеки, з гордістю представляє вам модуль камери безпеки MC800L. MC800L — це модуль камери з роздільною здатністю 8K на базі Mstar SSC328Q SoC і датчика зображення OmniVision OS08A10. Завдяки 8-мегапіксельному датчику зображення CMOS продукт може відтворювати відео з роздільною здатністю 4K і 20 кадрів на секунду. Подібно до інших рішень 4K, продукт має вбудований кодек H.265/HEVC, що підтримує стандарт стиснення відео H.264 і H.265.

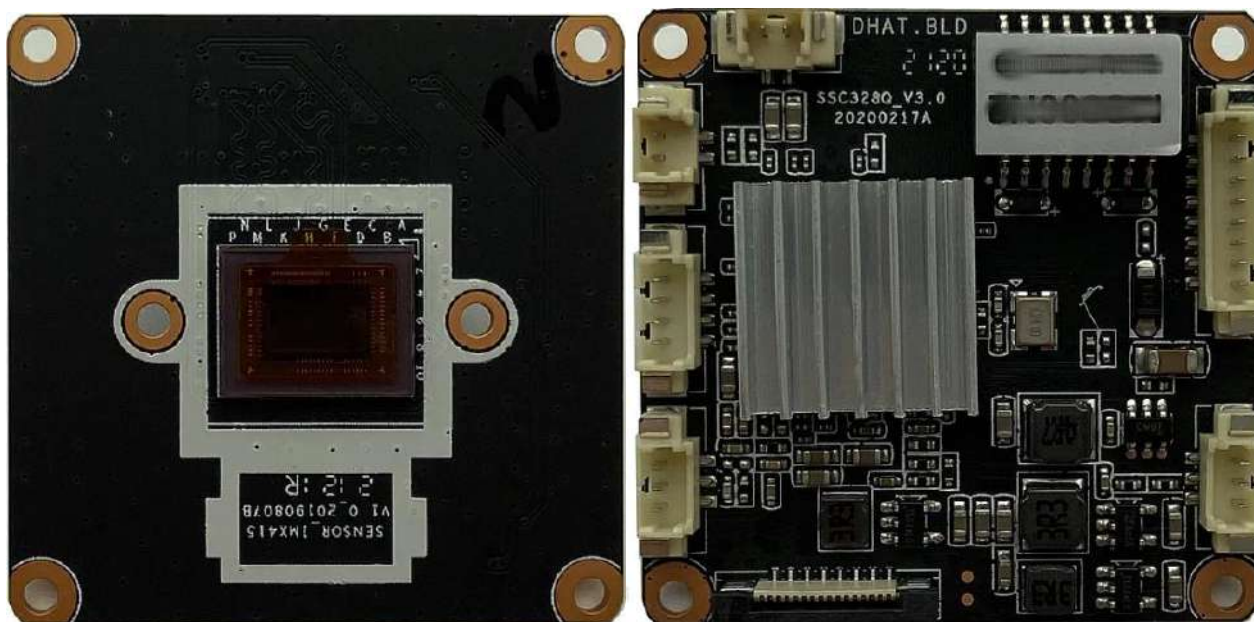


Рисунок 2.2 – Модуль IMX415+ MStar SSC328Q

Mstar SSC328Q System-on-Chip є основним процесором продукту, цей високопродуктивний SoC має можливість обробки відео 4K, включаючи розширений конвеєр обробки зображень, забезпечує відео з роздільною здатністю UHD із високою

чіткістю. Як зазвичай, він також підтримує стандарт стиснення аудіо G.711/G.711.A, підтримує 2-сторонній домофон і функцію синхронізації аудіо відео.

Характеристики модулю:

- мінімальна освітленість: колір 0.001Lux, Ч/Б 0.0001Lux
- широкий динамічний діапазон:  $\geq 80$  дБ;
- співвідношення сигнал/шум:  $\geq 50$  дБ;
- функції зображення: яскравість, насиченість, різкість, контрастність, АТW, автоекспозиція, 2D/3D шумозаглушення, антитуман
- функція відео: маска конфіденційності, текстовий шар екранного меню, виявлення руху
- відекодек: основний профіль H.264/AVC, високий профіль; Основний профіль H.265/HEVC, високий профіль
- формат роздільної здатності: 8MP 3840x2160 20fps; 6MP 3072x2048 30fps; 4MP 2688x1520 30fps; 2MP 1920x1080 30fps
- режим зображення: горизонтальне або вертикальне перегортання
- бітрейт відео: 500 Кбіт/с - 12 Мбіт/с регульований, CBR/VBR;
- мережевий протокол: HTTP/RTSP/ONVIF/RTMP/P2P;
- зберігання даних: SD-карта або мережеві пристрої;
- джерело живлення: DC12В;
- споживана потужність: макс. 1,2 Вт.

У якості модуля передачі було обрано потративний модуль на базі чипу RTL8812AU в першу чергу по причині документованості, ціні та можливості реалізації підсилення до потрібної потужності і звісно швидкості передавання даних, що є важливим фактором для побудови відеосистем.

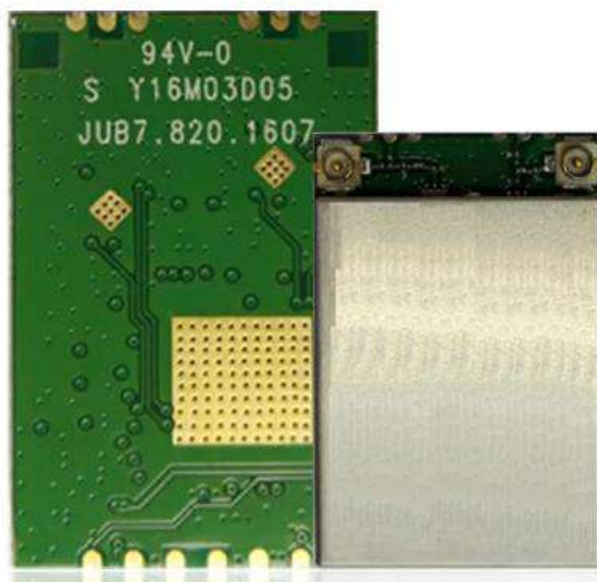


Рисунок 2.3 – Потртативний модуль на базі RTL8812AU для бортової передачі сигналу

Realtek RTL8812AU-CG — це високоінтегрований контролер мережевого інтерфейсу бездротової локальної мережі (WLAN) USB 2.0/3.0 MIMO (кілька входів, багато виходів), який відповідає специфікаціям IEEE 802.11ac Draft 2.0 і 802.11n для бездротової мережі з дуже високою пропускнуою здатністю. RTL8812AU-CG забезпечує повне рішення для високопродуктивного бездротового клієнта, а також підтримує функцію WiFi Direct, яка може легко побудувати мережу WiFi P2P PAN.

Основна смуга RTL8812AU-CG реалізує мультиплексування з ортогональним частотним поділом (OFDM) з кількома входами та кількома виходами (MIMO) з двома трактами передачі та двома трактами прийому (2T2R). Особливості включають передачу двох просторових потоків, короткий захисний інтервал (GI) 400 нс, просторове розповсюдження та підтримку смуги пропускання каналів 20 МГц, 40 МГц і 80 МГц. Крім того, RTL8812AU забезпечує один просторовий потік просторово-часового блокового коду (STBC), формування променя передачі (TxBF) і перевірку парності низької щільності (LDPC) для розширення діапазону передачі. На приймачі розширений діапазон і хороша мінімальна чутливість досягаються завдяки рознесенню приймача до 2 антен. Будучи одержувачем, RTL8812AU також підтримує чіткий звуковий зворотний зв'язок пакетів, який допомагає відправникам із

можливістю формування променя. Завдяки 2 незалежним радіочастотним блокам RTL8812AU може виконувати швидкий роумінг без переривання з'єднання.

Для сумісності із застарілими технологіями для підтримки всіх швидкостей передачі даних IEEE 802.11b, 802.11g і 802.11a включено технологію Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), Complementary Code Keying (ССК) і обробку основної смуги OFDM.

Доступні схеми модуляції диференціальної фазової маніпуляції, DBPSK і DQPSK з можливістю скремблювання даних, а ССК забезпечує підтримку застарілих швидкостей передачі даних з довгою або короткою преамбулою. Високошвидкісні канали FFT/IFFT у поєднанні з модуляцією BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM і 256QAM окремих піднесучих і швидкістю кодування, сумісною зі швидкістю 1/2, 2/3, 3/4 і 5/6, забезпечують до 866,7 Мбіт/с для IEEE 802.11ac MIMO OFDM.

RTL8812AU-CG вбудовано в розширений детектор сигналу, адаптивний еквалайзер частотної області та декодер Вітербі з м'яким рішенням для пом'якшення серйозних ефектів багатопроменевого поширення та взаємних перешкод під час прийому кількох потоків. Для кращої якості виявлення реалізовано рознесення прийому з максимальним об'єднанням коефіцієнтів (MRC), що застосовує до двох шляхів прийому. Забезпечено надійне виявлення та придушення перешкод для захисту від перешкод Bluetooth, бездротового телефону та мікрохвильової печі.

Для ефективного використання каналу MIMO реалізовано векторне рознесення прийому для багатопотокової програми. Ефективна компенсація дисбалансу IQ, зміщення постійного струму, фазового шуму, зміщення частоти та зсуву синхронізації забезпечується для радіочастотного переднього кінця. Надаються цифрові FIR-фільтри передачі та прийому, які можна вибирати, щоб відповідати вимогам маски спектру передачі та усунути перешкоди сусідніх каналів відповідно.

RTL8812AU-CG підтримує швидке автоматичне регулювання посилення (AGC) приймача з синхронними та асинхронними контурами керування між антенами, функціями рознесення антен і функціями адаптивного керування потужністю передачі для отримання кращої продуктивності в аналогових частинах трансивера.

RTL8812AU-CG MAC підтримує 802.11e для мультимедійних програм, 802.11i та WAPI (Wireless Authentication Privacy Infrastructure) для безпеки та 802.11n/802.11ac Draft 2.0 для покращеної ефективності протоколу MAC. Використання методів агрегації пакетів, таких як A-MPDU з BA та A-MSDU, ефективність протоколу значно покращується. Механізми енергозбереження, такі як застаріле енергозбереження, U-APSD і енергозбереження MIMO, зменшують витрати електроенергії під час простою та компенсують додаткову потужність, необхідну для передачі MIMO OFDM. RTL8812AU-CG забезпечує прості застарілі механізми співіснування 20 МГц/40 МГц/80 МГц для забезпечення зворотної та мережевої сумісності.

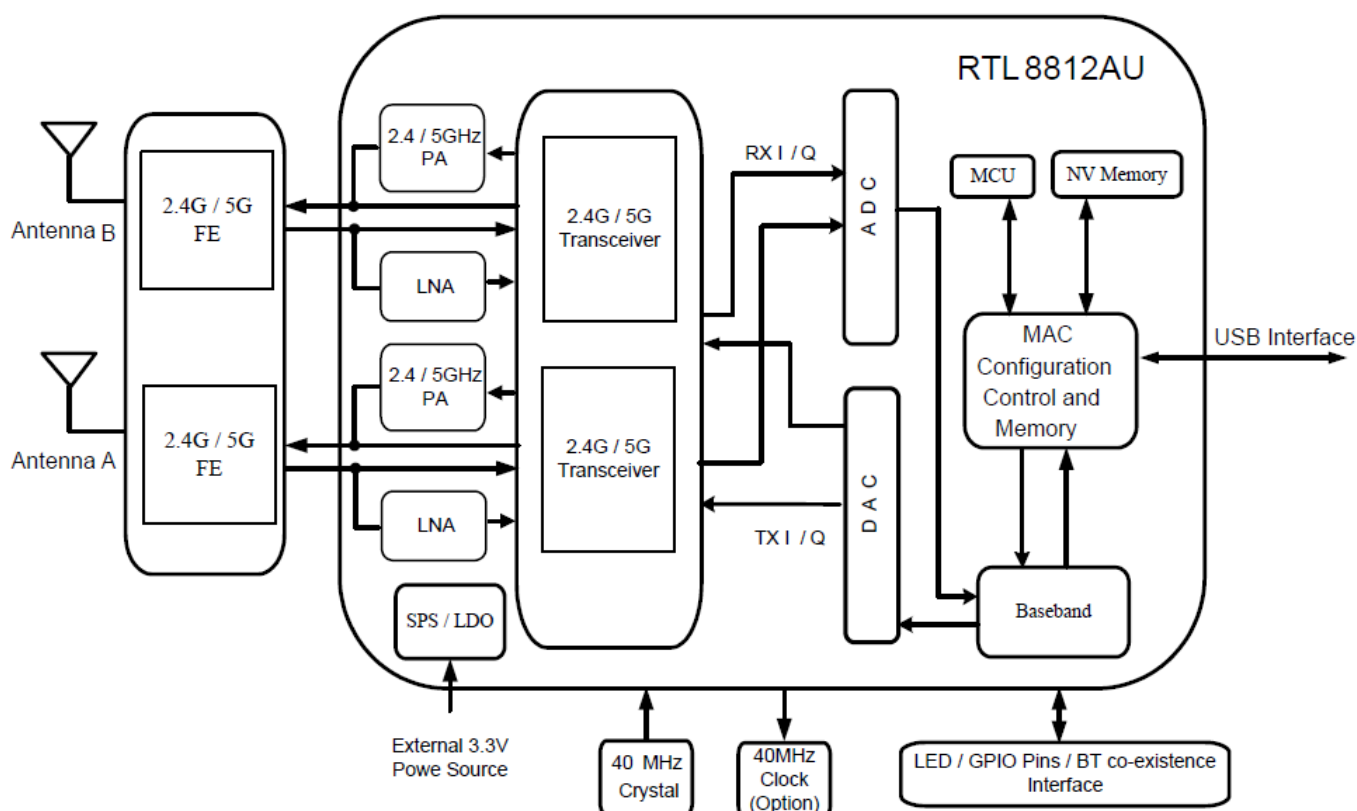


Рисунок 2.4 – Функціональна діаграма RTL8812AU

На стороні прийому для реалізації отримання та виведення на пристрій відображення відеосигналу було обрано ICsee Xmeue XM Nvr Board.

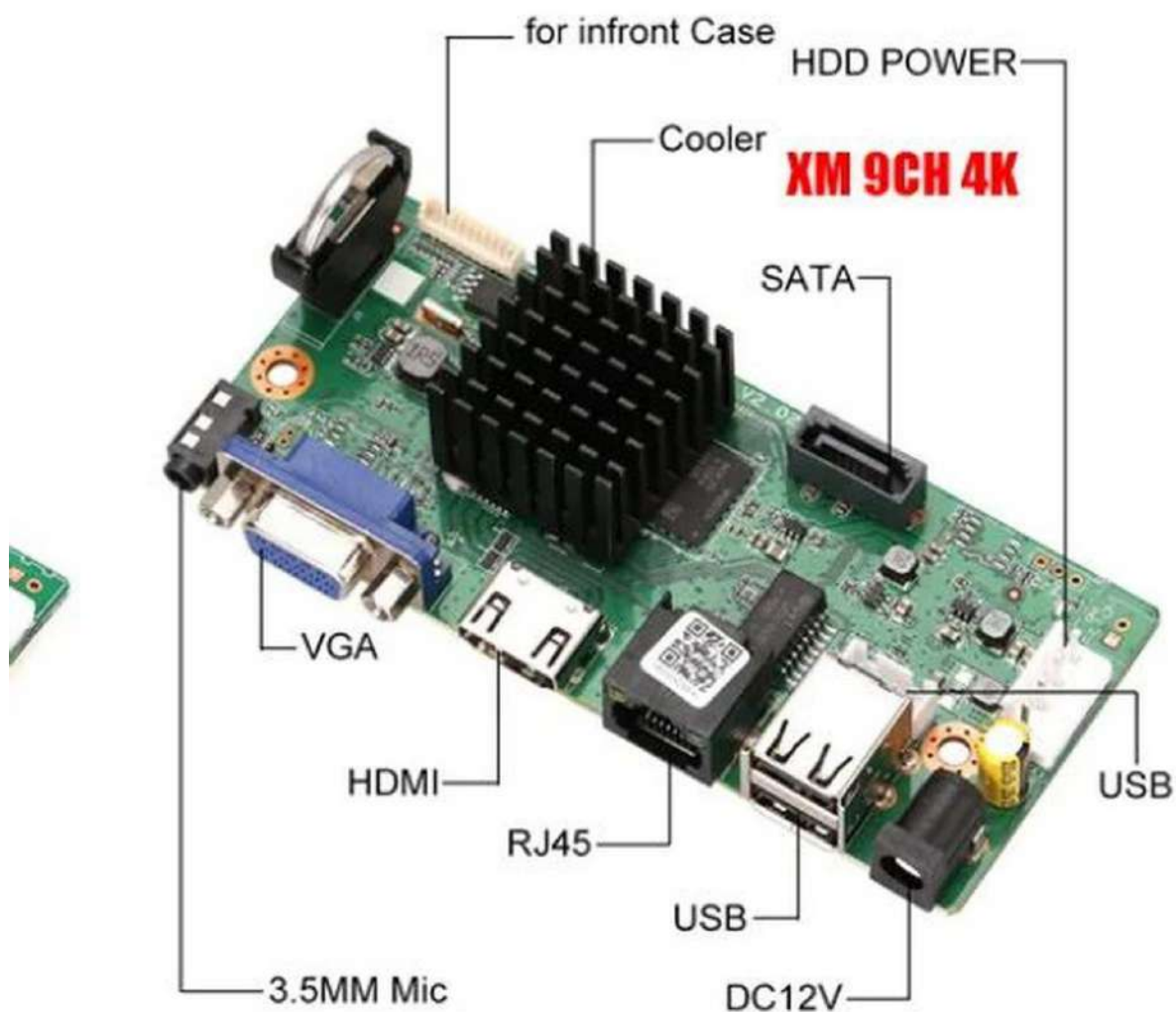


Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд та розташування роземів ICsee Xmeye XM Nvr Board

Характеристика плати роботи з відео ICsee Xmeye XM Nvr:

- тип інтерфейсу жорсткого диска: SATA;
- стандарт відео: NTSC, PAL;
- формат стиснення звуку: G711A;
- аудіо вхід: 8 каналів;
- інтерфейс відеовходу: RJ45;
- формат стиснення: H.265, H.264;

- підтримувані операційні системи: Microsoft Windows 98, Microsoft Windows 2000, Microsoft Windows XP, Microsoft Windows 7, Mac OS;
- підтримувані мобільні системи: ОС, Android
- режим IP: Статична IP-адреса
- мережевий протокол: TCP/IP, DHCP, SMTP, HTTP, DDNS, UPnP, PPPoE, FTP, DNS;
- мережевий інтерфейс: RJ45 10/100M.

У якості приймача відеосигналу на стороні станції прийому відео було обрано AR9271 USB Wireless Network Card за рахунок сумісності з Raspberry Pi та обраною платою роботи з відео.



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд AR9271 USB Wireless Network Card

Модуль бездротової мережевої карти, що використовує мікросхему AR9271/9271L, 11n, 1T1R, швидкість передачі 150 Мбіт/с, може відповідати промислового середовищу використання, може нормально працювати при -40~+60

градусах Цельсія, підходить для промислового обладнання, приставки ящик і т. д. необхідно підключитися до обладнання WIFI.

Характеристики AR9271:

- підтримка winxp32/64, VISTA32/64 WIN8 32/64, linux
- підтримує 64/128 WEP, WPA/WPA2, WPA-PSK/WPA2-PSK (TKIP і AES), підтримує IEEE 802.1x;
- підтримка режимів ad-hoc та інфраструктури;
- низьке енергоспоживання, низький нагрів.

Для керування процесом відправки та отримання даних на обох сторонах розробленої відеосистеми обрано Raspberry Pi 3b+.



Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд Raspberry Pi 3b+

Raspberry Pi 3 Модель B+ (RPI3-MODBP) — це повноцінний одноплатний комп'ютер розміром з банківську картку. Raspberry Pi 3 Модель B+ — це покращена версія Raspberry Pi 3 Модель B. Модель заснована на SoC (система-на-чипі) BCM2837B0, яка включає в себе 4-ядерний 64-бітний процесор ARMv8 з робочою частотою 1,4 ГГц і потужний відеопроцесор VideoCore IV.

Raspberry Pi 3 Модель B була першою Raspberry Pi, яка мала функцію бездротового зв'язку та Bluetooth. Модель Raspberry Pi B+ має такі ж можливості, але на відміну від предшественника, він має Bluetooth версії 4.2.

Відмінною особливістю мікрокомп'ютерів Raspberry Pi є наявність роз'єму 40-контактного GPIO для керування різними пристроями та його малий розмір, завдяки чому Raspberry Pi також може працювати як програмований контролер у найрізноманітніших додатках робототехніки та електроніки. Як варіант, він може бути об'єднаний з Pololu A-Star 32U4 Robot Controller LV з Raspberry Pi Bridge, для створення контролера для цієї маленької роботи.

Завдяки стандартному роз'єму 40-pin GPIO до мікрокомп'ютера можна об'єднати всі доступні плати розширення для додавання необхідного функціоналу.

Raspberry Pi може працювати з широким спектром дистрибутивів ARM GNU / Linux, включаючи Ubuntu Snappy Core, Debian, Fedora і Arch Linux, а також Microsoft Windows 10 IoT Core.

Характеристики Raspberry Pi 3b+:

- чип: Broadcom BCM2837B0 (CPU, GPU, DSP і RAM);
- процесор (CPU): 64-бітний 4-ядерний ARMv8 Cortex-A53 з тактовою частотою 1,4 ГГц;
- відеопроцесор (GPU): VideoCore IV 3D;
- пам'ять (RAM): 1 Гб LPDDR2 (900 МГц);
- роз'єми:
  - аудіо/відео цифровий: HDMI;
  - аудіо/відео аналоговий: роз'єм 3,5 мм (4 контакти);
  - порт USB: USB 2.0 - 4 шт;
  - накопичувач: microSD;
  - мережа: 10/100 Ethernet
  - порт дисплея: послідовний інтерфейс дисплея (DSI);
  - порт камери: Послідовний інтерфейс камери MIPI (CSI-2);
  - вхід-вивід: GPIO 40 pin
- бездротові інтерфейси:
  - WiFi: двохполосний 2,4 ГГц і 5 ГГц IEEE 802.11.b/g/n/ac 2,4 ГГц;
  - Bluetooth: 4.2 Classic і Low Energy (BLE).

Загальна схема з'єднання елементів наведена на рис.2.8.

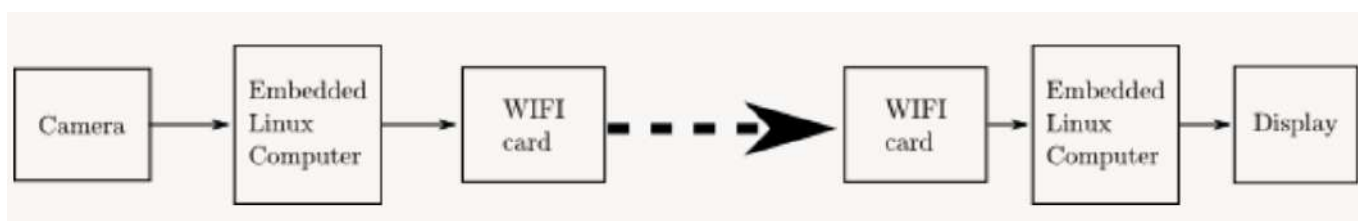


Рисунок 2.8 – Загальна схема роботи системи

Хоча може здатися, що ви можете просто підключити адаптер Wi-Fi до одного з USB-портів, подати живлення на Raspberry Pi і почати працювати з відеопотоком – це не зовсім так. Обрані Wi-Fi-модулі потребують більше енергії, ніж вони можуть отримати від USB-порту Raspberry Pi. Рішення для таких проблем полягає в тому, щоб припаяти живлення від ВЕС або іншого джерела живлення 5 В до адаптера(ів) Wi-Fi.

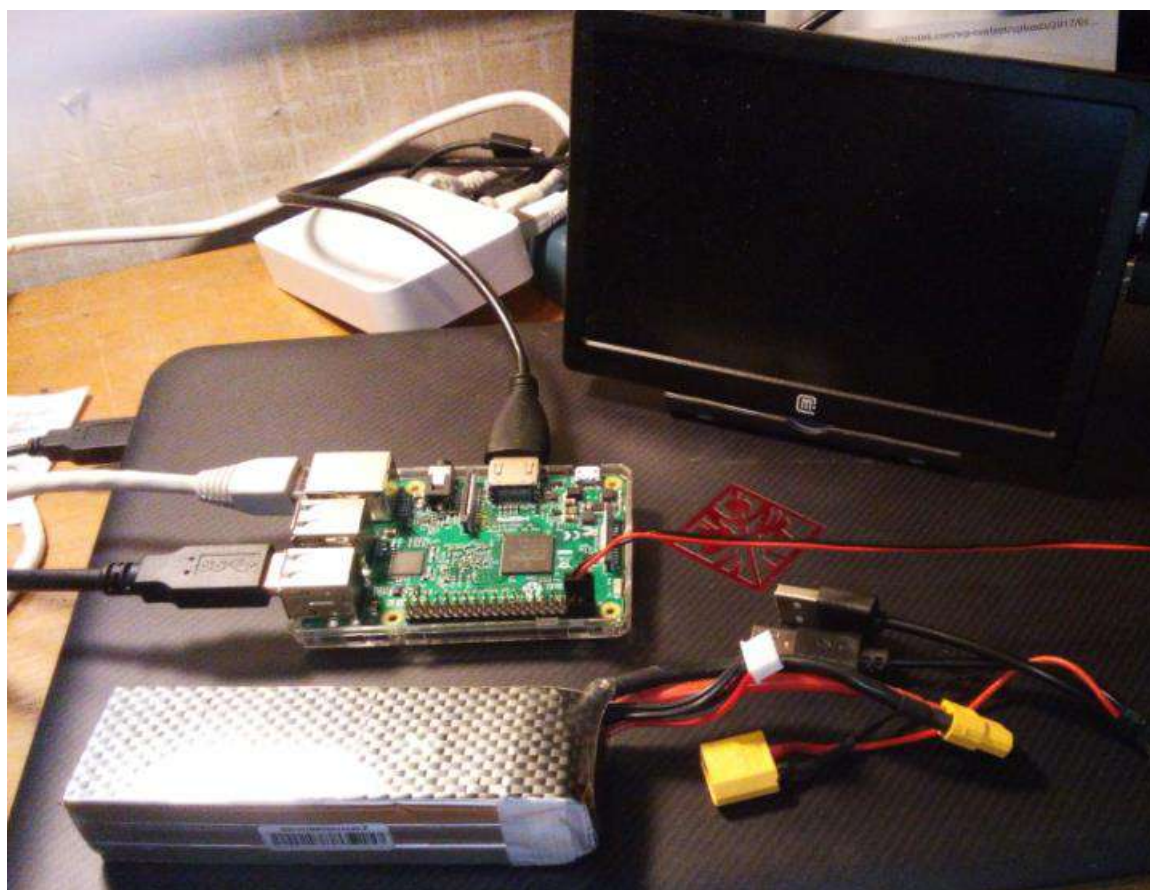


Рисунок 2.9 – Реалізація додаткового живлення модулів передачі

Також краще припаяти лінії даних USB, бо роз'єм особливо в бортовій частині може відходити і втратиться контакт, що призведе до пропадання відеосигналу.

## 2.3 Вибір програмної платформи для організації цифрової відеосистеми

В нашому проекті ми зупинилися на програмній реалізації цифрового зв'язку з відкритим кодом OpenIPC.

OpenIPC — це прошивка з відкритим кодом, розроблена спеціально для IP-камер. У порівнянні з комерційними прошивками, які постачальники зазвичай попередньо самостійно встановлюють на своє обладнання OpenIPC пропонує прозорість і ширшу сумісність. Обслуговуючи різноманітні процесори, він не зупиняється лише на заміні традиційного мікропрограмного забезпечення. OpenIPC підтримує такі функції, як потокове передавання безпосередньо на такі платформи, як YouTube і Telegram, і навіть підтримує зовнішнє хмарне сховище.

Поєднання OpenIPC з WFB-NG (WiFi Broadcast - Next Generation) забезпечує найкраще використання для FPV. Основними причинами цього є наступні фактори:

- підтримка власного кодування H265;
- передача відео високої чіткості;
- забезпечення відеопотоку в реальному часі з низькою затримкою;
- невелика ціна реалізації;
- незрівнянна гнучкість;
- безперебійна інтеграція з WFB-NG.

Сумісність OpenIPC із певними камерами, зокрема gk7205v200/300-IMX307/355, дозволяє використовувати власне кодування H265. Це вдосконалене кодування значно підвищує продуктивність системи FPV. Він забезпечує високу якість відеопотоків зі значно зниженою швидкістю потоку в порівнянні зі старішими кодеками. Це дає вашому бортовому блоку повітря RPI більше ЦП для інших функцій.

У світі FPV час має суттєве значення. Поєднання OpenIPC із WFB-NG забезпечує відеоз'єднання з мінімальною затримкою, гарантуючи відео в реальному часі, необхідне для точної навігації та контролю.

Сумісність OpenIPC із безліччю доступних IP-камер робить його економічно ефективною альтернативою для тих, хто шукає кращі системи FPV, не витрачаючи гроші.

OpenIPC передає керування налаштуваннями користувачам, дозволяючи їм налаштовувати функції та налаштування камери, щоб ідеально відповідати їхнім унікальним вимогам FPV.

Коли OpenIPC об'єднує зусилля з WFB-NG, необробленим пакетним радіозв'язком великої дальності на основі радіостанції WiFi, результатом є уніфікований канал передачі. Цей канал ефективно передає відео високої чіткості, двосторонню телеметрію БПЛА, аудіо та навіть сигнали керування з пульта дистанційного керування.

## 3 РОЗРОБКА ВЛАСНОГО АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ

Обрані компоненти не є ідеальними по двом причинам:

- наявні зайві компоненти на платах, що може бути перешкодою при зостовування на дронах невеликого розміру;

- модуль передачі видає потужність лише 1Вт, що відразу ставить його на рівень нижче покупних цифрових систем.

Отже було прийнято рішення розробки власного апаратного забезпечення модуля захоплення відео з матриці камери та бортового модуля передачі відеопотоку.

### 3.1 Розробка модуля обробки сигналу відеоматриці

За основу роботи модуля обробки відеосигналу було обрано матрицю OV4689 та мікроконтролер STM32H743.

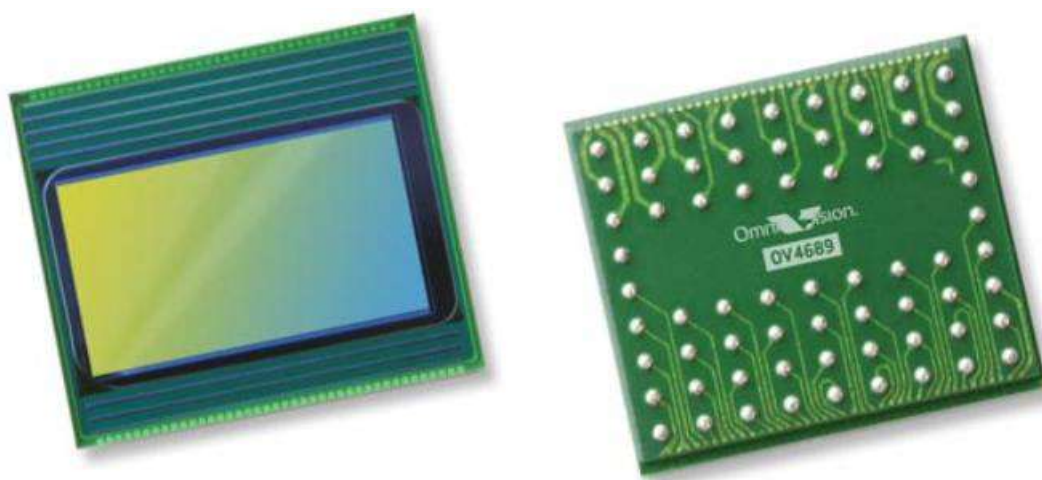


Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд датчика OV4689

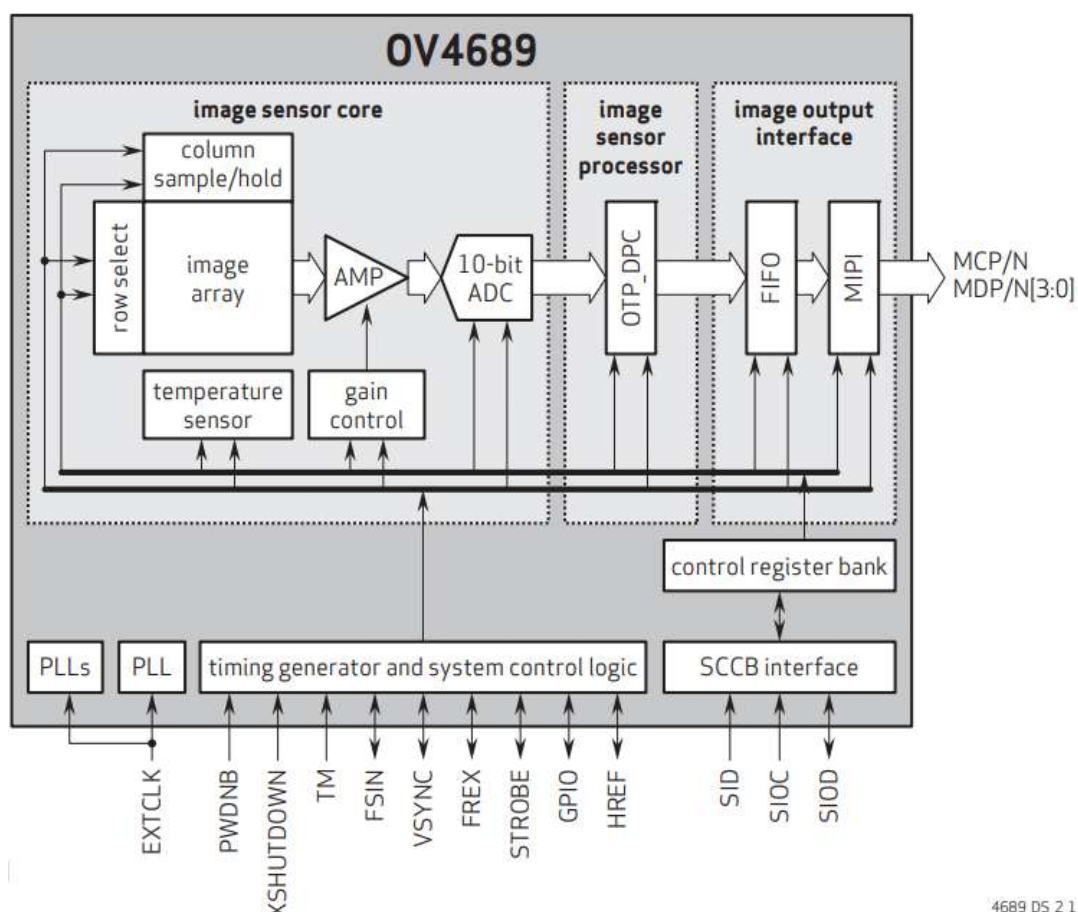
OV4689 характеризується кращими в класі показниками світлочутливості та динамічного діапазону. Датчик сімейства CameraChip, який отримав позначення

OV4689, має роздільну здатність 4 Мп при співвідношенні сторін кадру 16:9. У неї використовується архітектура OmniBSI-2 з розміром пікселів 2 мкм. До якості датчика виробник дає можливість зйомки відео високої четкості з високою кадровою частотою.

У повному розширенні датчик може формувати відео з частотою до 90 к/с, у дозволі 1080p — до 120 к/с (з електронною стабілізацією зображення), а в дозволі 720p — до 180 к/с.

Оптичний формат OV4689 — 1/3 дюйма. Площа самого приладу у виконанні CSP — 6,6 x 5,8 мм.

Час експозиції контролюється регулюванням інтервалу часу між попереднім зарядженням і відбором. Після вибірки даних пікселів у рядку вони обробляються за допомогою аналогової схеми, щоб виправити зміщення та помножити дані на відповідне посилення. Після аналогової обробки йде АЦП, який виводить до 10-бітних даних для кожного пікселя в масиві.



4689 DS 2 1

Рисунок 3.2 – Функціональна схема датчика OV4689



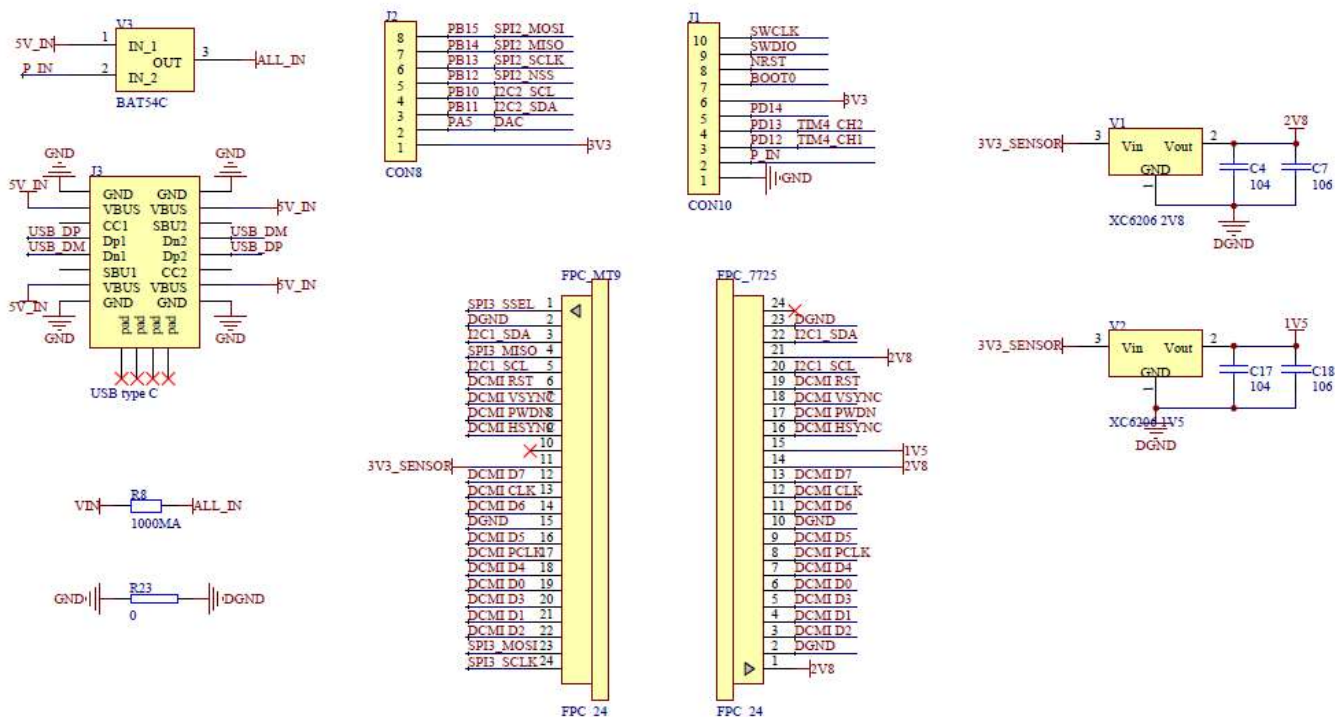


Рисунок 3.5 – Схема комутації з матрицею

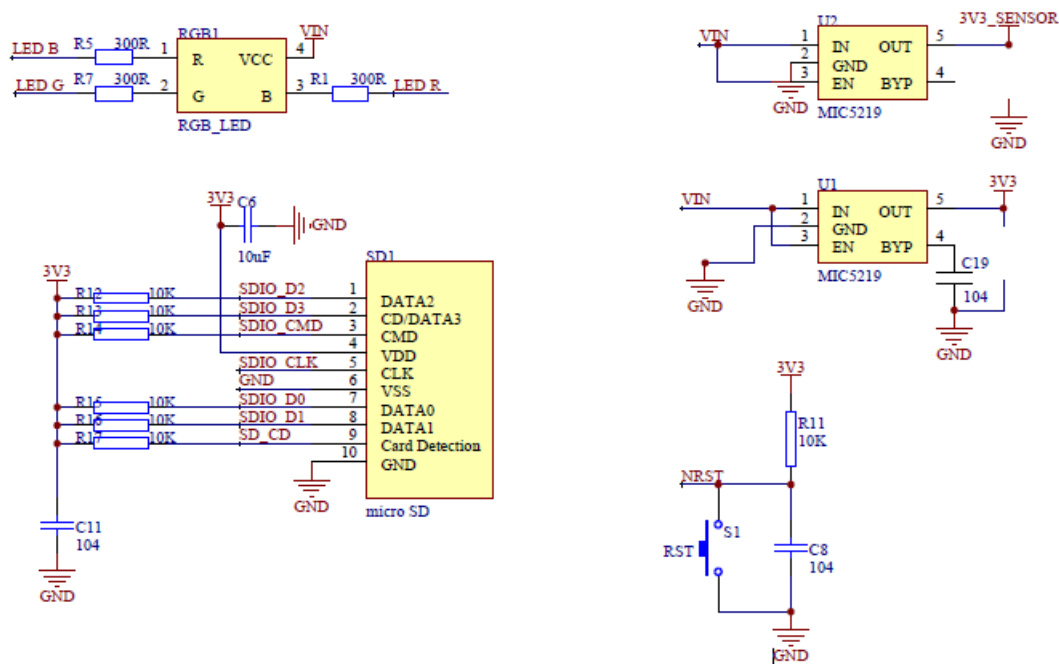


Рисунок 3.6 – Схема живлення бортового відеомодуля

Наступним етапом на основі схеми було проведено розробку друкованої плати в програмі EasyEDA.

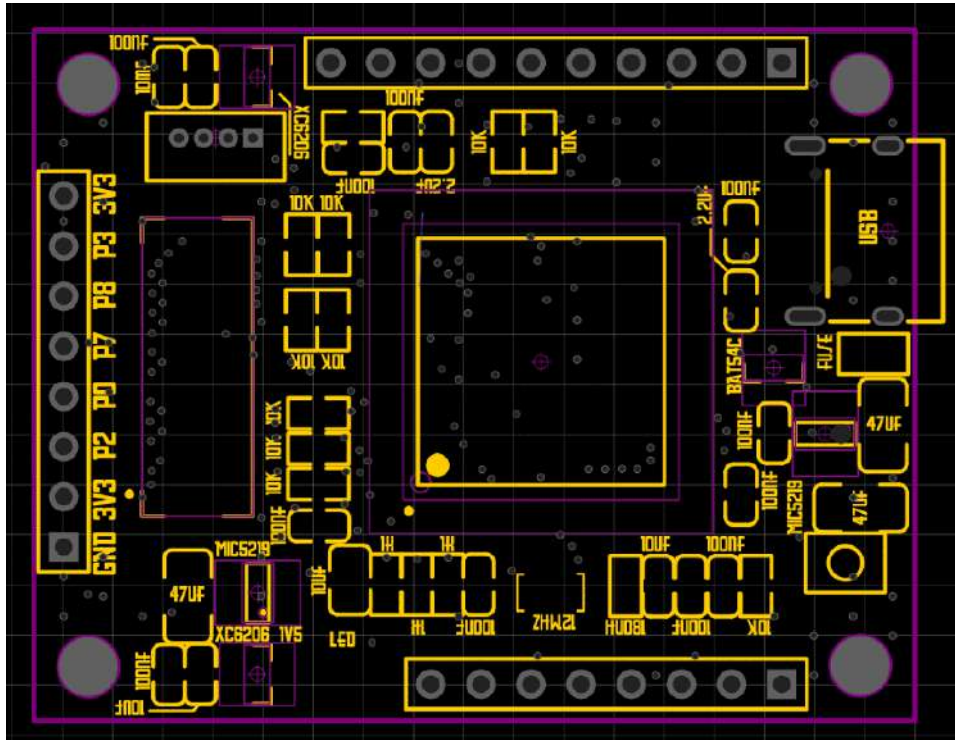


Рисунок 3.7 – Розташування елементів на розробленій платі бортового модуля роботи з відео

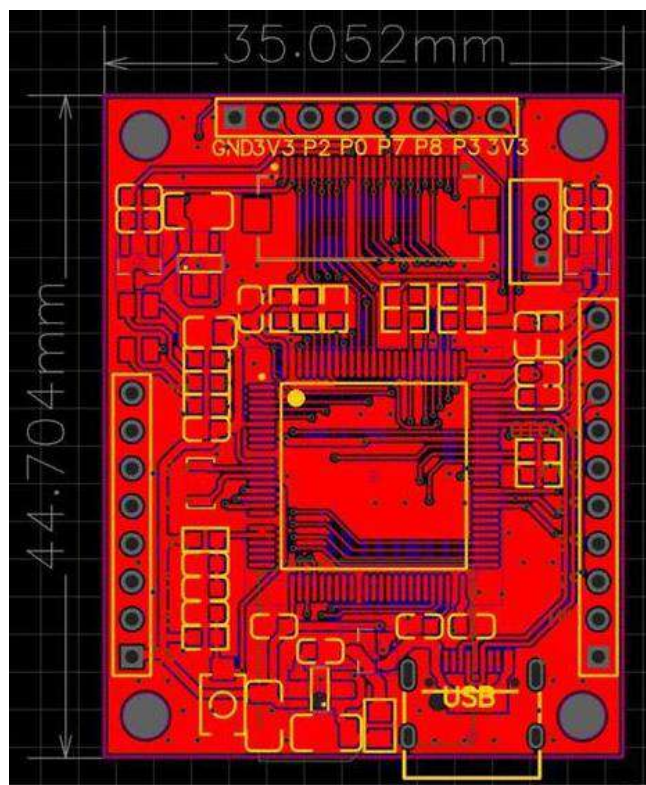


Рисунок 3.8 – Трасування друкованих провідників розробленої плати бортового модуля роботи з відео



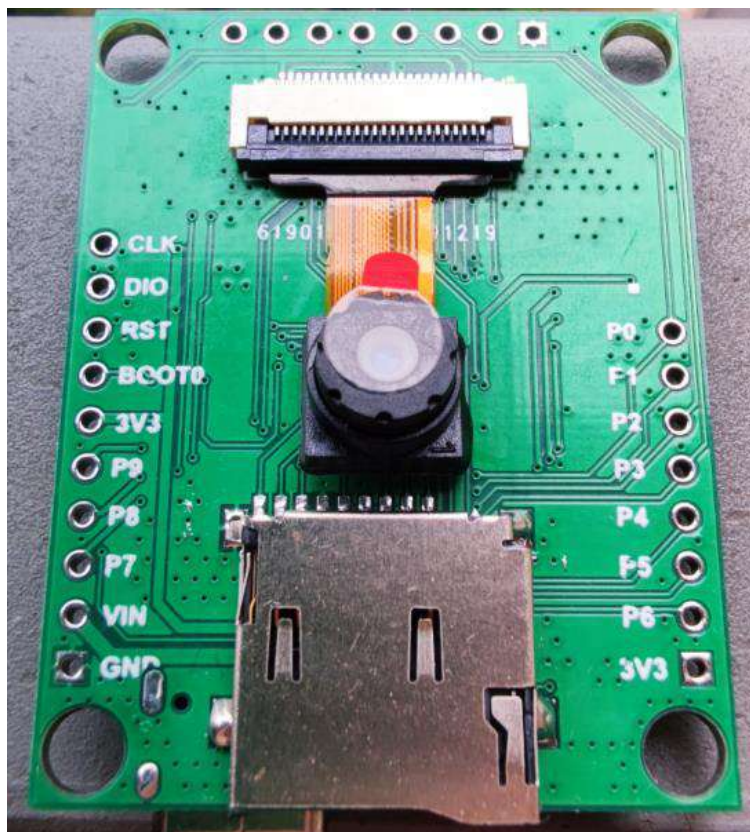


Рисунок 3.11 – Виготовлений бортовий модуль роботи з відео (сторона приєднання камери)

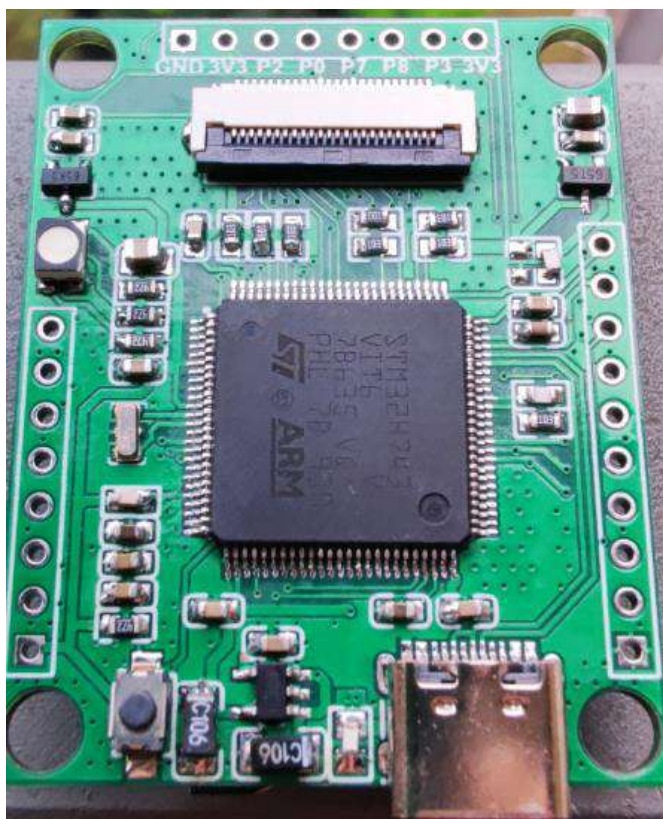


Рисунок 3.12 – Виготовлений бортовий модуль роботи з відео (сторона мікроконтролера)

### 3.2 Розробка модуля передачі підвищеної потужності

Як і у базому модулі передачі в якості основи використовується мікросхема RTL8812AU однак при розробці власної конструкції плати було підвищено потужність роботи модуля передачі за рахунок використання підсилювачів, а також зроблено задвоєння каналу для забезпечення роботи не лише на частоті 2,4ГГц, а й на частоті 5,8ГГц, що надасть змогу при відсутності зв'язку на одному частотному діапазоні зробити переключення на другий.

Схема розробленого модуля передачі з підвищеною потужністю наведена на рис.3.13.

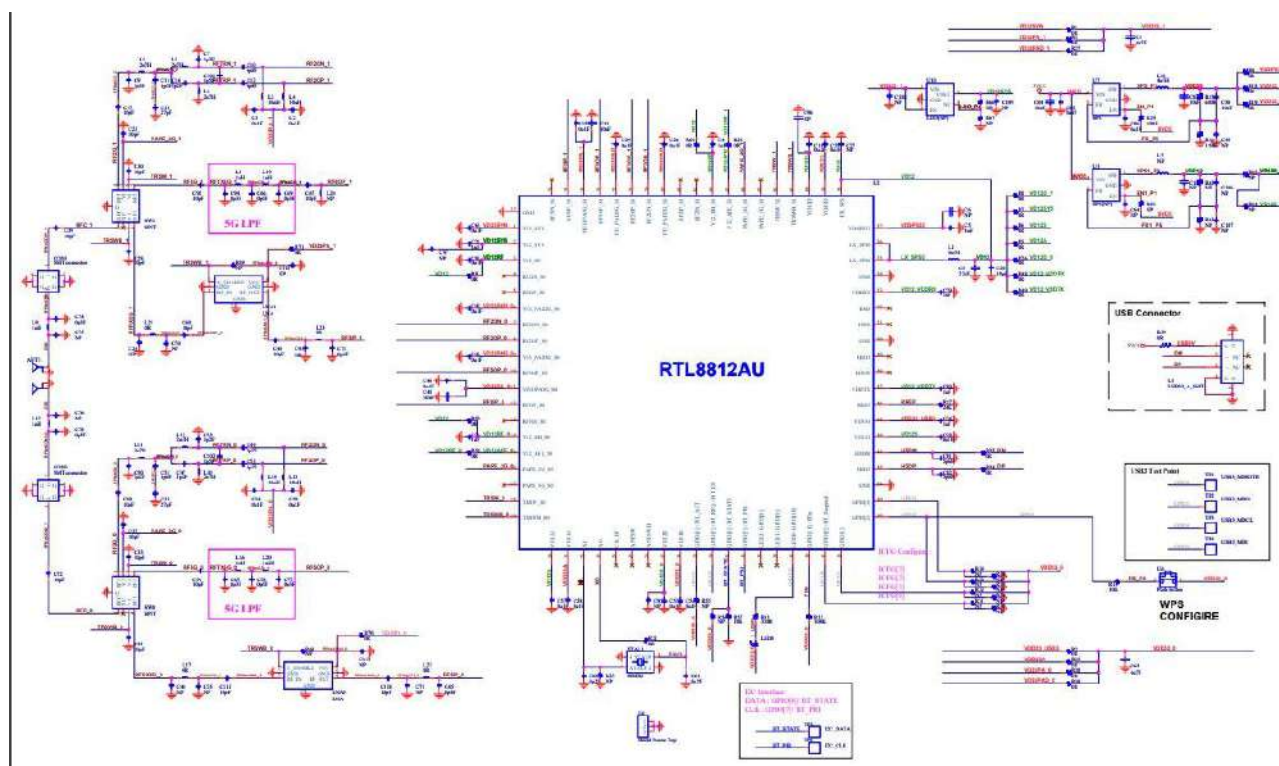


Рисунок 3.14 – Схема модуля передачі з підвищеною потужністю

На основі схеми було проведено розробку друкованої плати у EasyEDA та замовлено виготовлення пристрою.

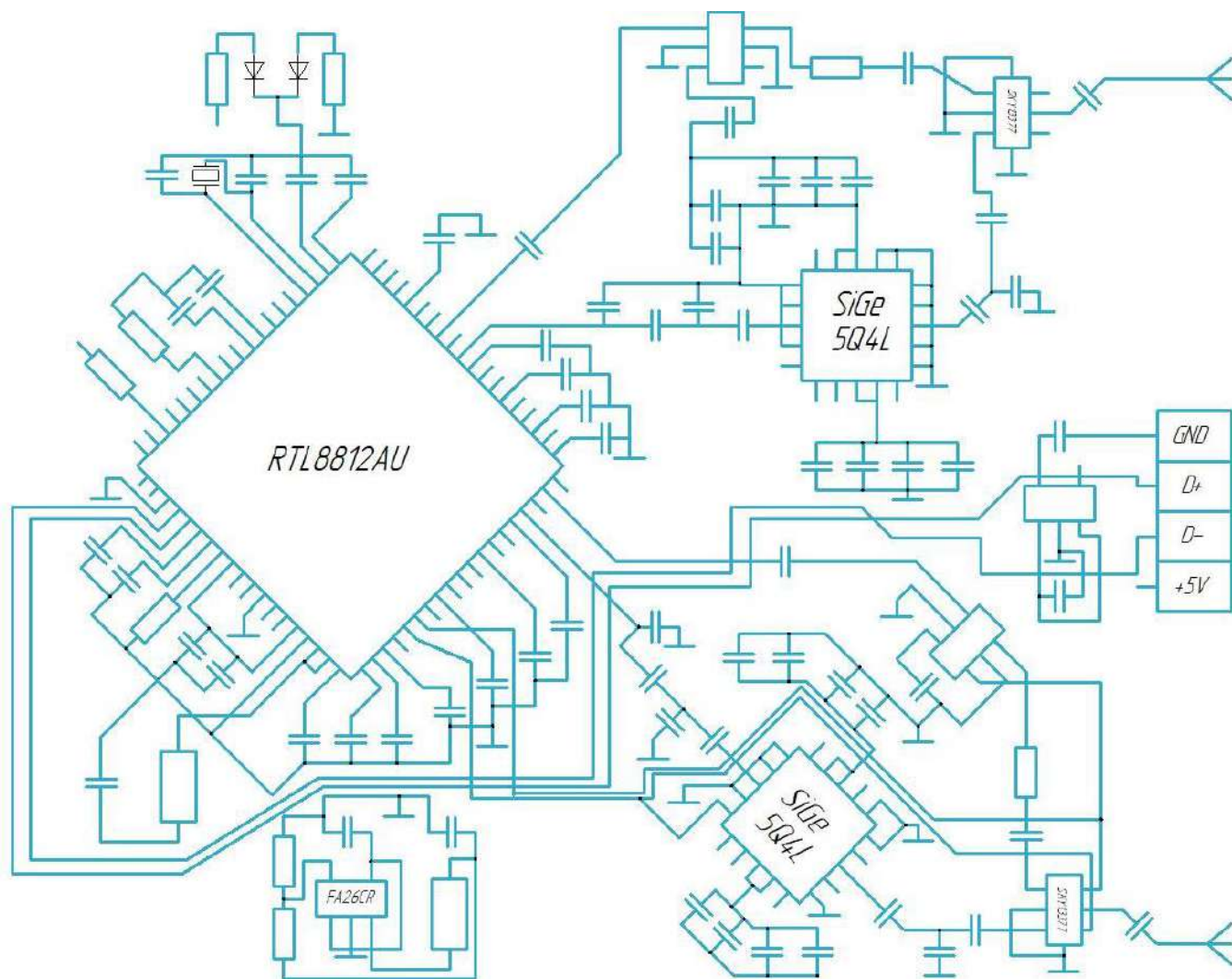


Рисунок 3.15 – Схема модуля з підвищеною потужністю відповідність елементів розміщенню на платі

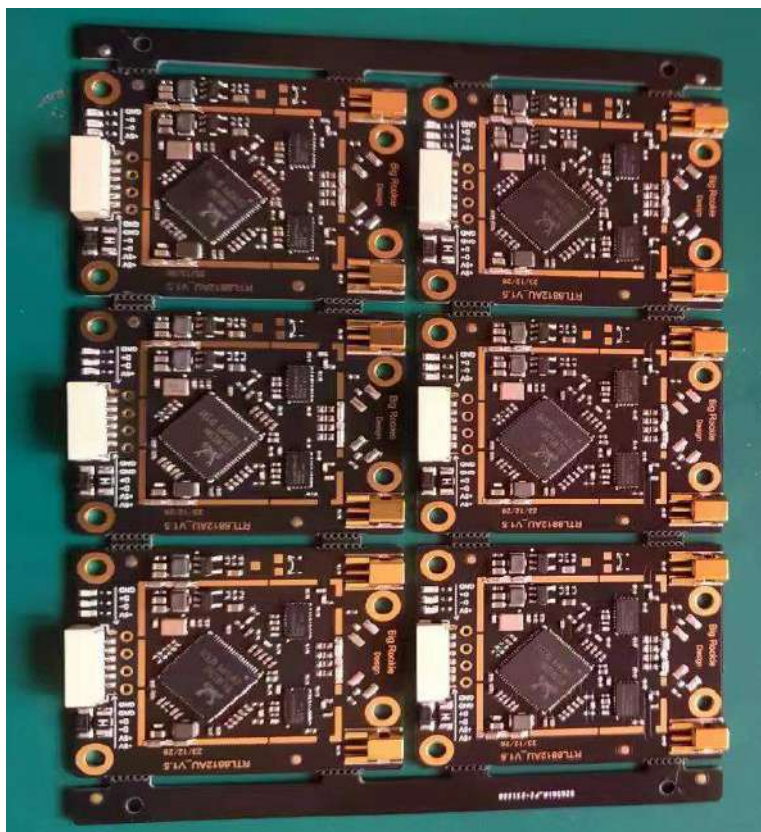


Рисунок 3.16 – Виготовлені згідно розробленої документації бортові модулі передачі цифрового відеопотоку (сторона встановлення елементів)

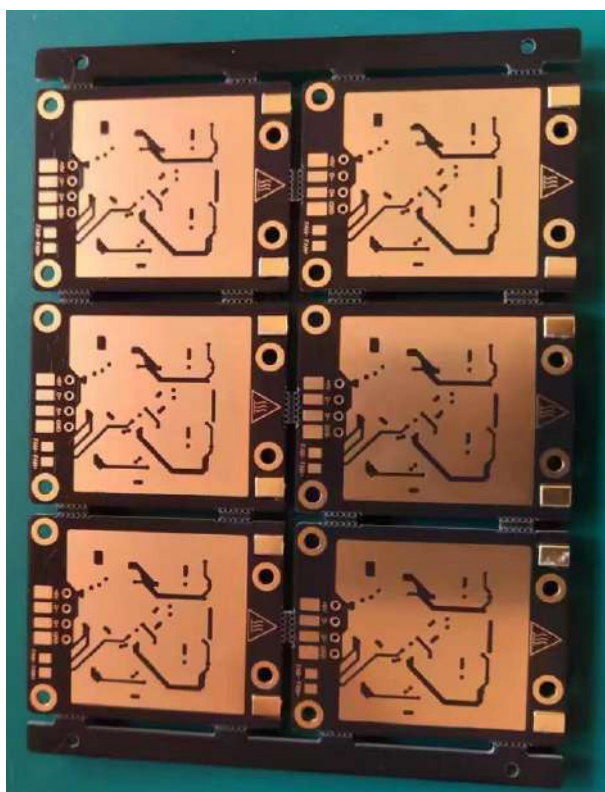


Рисунок 3.17 – Виготовлені згідно розробленої документації бортові модулі передачі цифрового відеопотоку (сторона встановлення радіатора)

## 4 НАЛАШТУВАННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

### 4.1 Налаштування розробленої системи цифрової передачі відеопотоку

Після завершення всіх етапів апаратного проектування системи було проведення її налаштування, що включала встановлення драйверів на мінаккомпютери Raspberry Pi 3b+ та налаштування каналів зв'язку. На обидва Raspberry Pi 3b+ було встановлено операційну систему Linux (Ubuntu) оскільки вона потребує менше системних ресурсів ніж Windows.

Спочатку було завантажено образ OpenIPC для Raspberry PI з сайту спільноти. Через USB образ було записано Raspberry PI, що розташовується на бортовому модулі.

Після встановлення було зроблено перезавантаження з ssh зі стандартними обліковими даними (pi/raspberry). Далі виконали дії для ролі air, як прописано в motd. Завантажте Pis і ssh у них за допомогою наступної команди (замініть 192.168.0.111 їхньою IP-адресою). Пароль: raspberry.

```
ssh pi@192.168.0.111
```

Для налаштування конвеєру даних з камери відкрили /etc/systemd/system/fpv-camera.service та розкоментували конвеєр відповідно до вашої камери (камера PI).

В файлі /etc/wifibroadcast.cfg налаштували канал Wi-Fi відповідно до налаштувань вашої антени (або використовуйте #165 за замовчуванням для 5,8 ГГц)

Було зроблено налаштування модуля відеозахоплення для виведення відеопотоку зі швидкістю 1500 Кбіт/с (інші швидкості UART погано відповідають дільникам частоти RPI).

```
sudo systemctl enable wifibroadcast@drone
```

```
sudo systemctl enable fpv-camera
```

```
sudo reboot
```

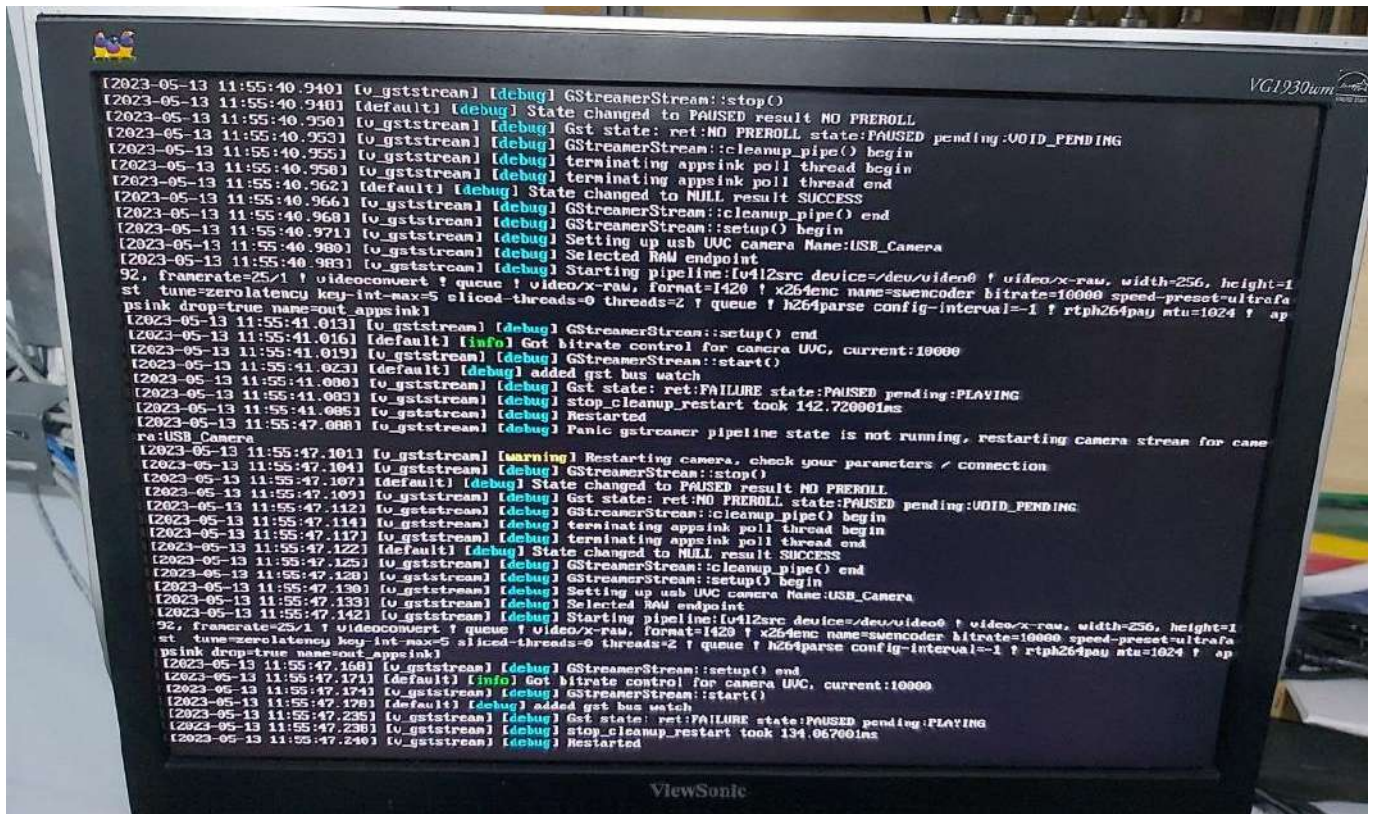


Рисунок 4.1 – Налаштування параметрів відеомодулю на бортовій частині

На наземному модулі було виконано дії як наведено на рис.4.2.

```
sudo apt install libpcap-dev libsodium-dev python3-all python3-twisted
git clone -b stable https://github.com/svpcow/wfb-ng.git
cd wfb-ng && make deb && sudo apt install ./deb_dist/wfb-ng*.deb
```

Рисунок 4.2 – Команди налаштування наземного мінікомп'ютеру

Команди для виконання налаштування:

```
sudo systemctl enable wifibroadcast@gs
```

```
sudo systemctl enable rtsp
```

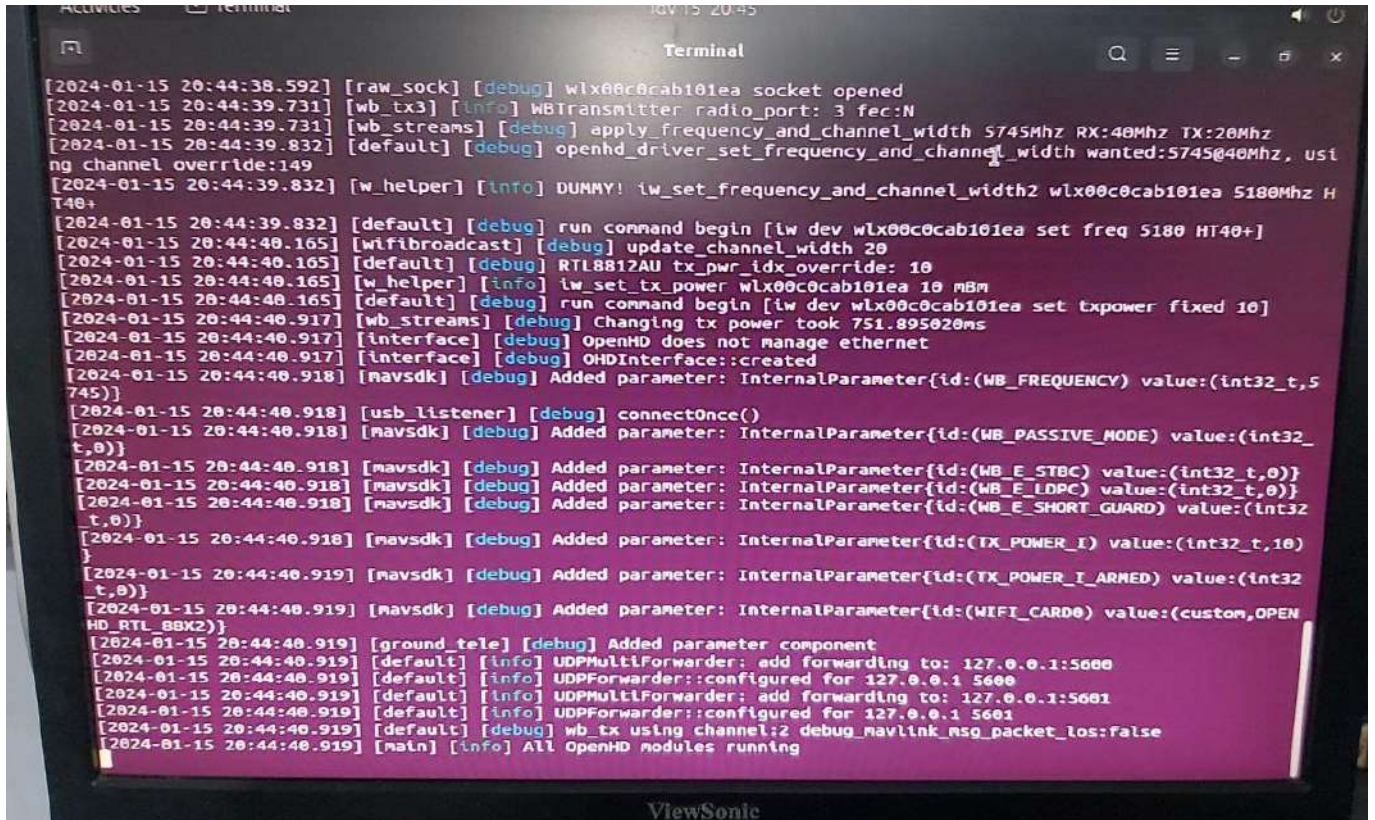
```
sudo systemctl enable fpv-video
```

```
sudo systemctl enable osd
```

```
sudo reboot
```

З настройками WFB за замовчуванням використовуйте радіоканал 165 (5825 МГц), ширину 20 МГц, MCS #1 (QPSK 1/2) з довгим GI. Це забезпечує ~7 Мбіт/с

ефективної швидкості (тобто корисної швидкості після FEC і пакетного кодування) в обох напрямках загалом, оскільки WiFi є напівдуплексним. Таким чином, він підходить для низхідного потоку відео 720p@49fps (4 Мбіт/с) + два повношвидкісних телеметричних потоку (висхідний і низхідний). Якщо вам потрібна більша пропускна здатність, ви можете використовувати інший індекс MCS (наприклад, 2 або більше).



```

[2024-01-15 20:44:38.592] [raw_sock] [debug] wlx00c0cab101ea socket opened
[2024-01-15 20:44:39.731] [wb_tx3] [info] WBTransmitter radio_port: 3 fec:N
[2024-01-15 20:44:39.731] [wb_streams] [debug] apply_frequency_and_channel_width 5745Mhz RX:40Mhz TX:20Mhz
[2024-01-15 20:44:39.832] [default] [debug] openhd_driver_set_frequency_and_channel_width wanted:5745@40Mhz, using channel override:149
[2024-01-15 20:44:39.832] [w_helper] [info] DUMMY! iw_set_frequency_and_channel_width2 wlx00c0cab101ea 5180Mhz HT40+
[2024-01-15 20:44:39.832] [default] [debug] run command begin [iw dev wlx00c0cab101ea set freq 5180 HT40+]
[2024-01-15 20:44:40.165] [wifibroadcast] [debug] update_channel_width 20
[2024-01-15 20:44:40.165] [default] [debug] RTL8812AU tx_pwr_idx_override: 10
[2024-01-15 20:44:40.165] [w_helper] [info] iw_set_tx_power wlx00c0cab101ea 10 MBM
[2024-01-15 20:44:40.165] [default] [debug] run command begin [iw dev wlx00c0cab101ea set txpower fixed 10]
[2024-01-15 20:44:40.917] [wb_streams] [debug] Changing tx power took 751.895020ms
[2024-01-15 20:44:40.917] [interface] [debug] OpenHD does not manage ethernet
[2024-01-15 20:44:40.917] [interface] [debug] OHDInterface::created
[2024-01-15 20:44:40.918] [navsdk] [debug] Added parameter: InternalParameter{id:(WB_FREQUENCY) value:(int32_t,5745)}
[2024-01-15 20:44:40.918] [usb_listener] [debug] connectOnce()
[2024-01-15 20:44:40.918] [navsdk] [debug] Added parameter: InternalParameter{id:(WB_PASSIVE_MODE) value:(int32_t,0)}
[2024-01-15 20:44:40.918] [navsdk] [debug] Added parameter: InternalParameter{id:(WB_E_STBC) value:(int32_t,0)}
[2024-01-15 20:44:40.918] [navsdk] [debug] Added parameter: InternalParameter{id:(WB_E_LDPC) value:(int32_t,0)}
[2024-01-15 20:44:40.918] [navsdk] [debug] Added parameter: InternalParameter{id:(WB_E_SHORT_GUARD) value:(int32_t,0)}
[2024-01-15 20:44:40.918] [navsdk] [debug] Added parameter: InternalParameter{id:(TX_POWER_I) value:(int32_t,10)}
[2024-01-15 20:44:40.919] [navsdk] [debug] Added parameter: InternalParameter{id:(TX_POWER_I_ARMED) value:(int32_t,0)}
[2024-01-15 20:44:40.919] [navsdk] [debug] Added parameter: InternalParameter{id:(WIFI_CARD0) value:(custom,OPENHD_RTL_88X2)}
[2024-01-15 20:44:40.919] [ground_tele] [debug] Added parameter component
[2024-01-15 20:44:40.919] [default] [info] UDPMultiForwarder: add forwarding to: 127.0.0.1:5600
[2024-01-15 20:44:40.919] [default] [info] UDPForwarder::configured for 127.0.0.1 5600
[2024-01-15 20:44:40.919] [default] [info] UDPMultiForwarder: add forwarding to: 127.0.0.1:5601
[2024-01-15 20:44:40.919] [default] [info] UDPForwarder::configured for 127.0.0.1 5601
[2024-01-15 20:44:40.919] [default] [debug] wb_tx using channel:2 debug_mavlink_msg_packet_loss:false
[2024-01-15 20:44:40.919] [main] [info] All OpenHD modules running
  
```

Рисунок 4.3 – Процес налаштування мінікомпютерів

Встановлюємо виправлений драйвер RTL8812AU:

```
sudo apt-get install dkms
```

```
git clone -b v5.2.20 https://github.com/svpcom/rtl8812au.git
```

```
cd rtl8812au/
```

```
sudo ./dkms-install.sh
```

Впевляємось що драйвери встановлені вірно

```
nmcli
```

З цими налаштуваннями WFB-NG слухатиме порт 14550 на дроні та підключатиметься до udp://127.0.0.1:14550 на GS.

Обираємо підключення телеметрії автопілота через uart або через udr. Привибори uart, коли його пристрій недоступний, wfb-ng не запуститься.

Це конфігурація для UDP, яка не пропонує з'єднань, але якщо запустити QGroundControl і він буде слухати вхідні UDP-пакети, тоді він зможе надсилати відповіді джерелу UDP. Таким чином, ми можемо говорити про двонаправлене з'єднання.

Якщо треба перевизначити тип модуляції за замовчуванням (MCS#1, довгий GI, 20 МГц BW, STBC 1), можна зробити це для кожного потоку. Налаштування потоку незалежні. Можна використовувати різну модуляцію для кожного з них. Наприклад:

```
[drone_video]
bandwidth = 20 # bandwidth 20 or 40 MHz
short_gi = False # use short GI or not
stbc = 1 # stbc streams: 1, 2, 3 or 0 if unused
mcs_index = 1 # mcs index

[drone_mavlink]
bandwidth = 20 # bandwidth 20 or 40 MHz
short_gi = False # use short GI or not
stbc = 1 # stbc streams: 1, 2, 3 or 0 if unused
mcs_index = 1 # mcs index

[gs_mavlink]
bandwidth = 20 # bandwidth 20 or 40 MHz
short_gi = False # use short GI or not
stbc = 1 # stbc streams: 1, 2, 3 or 0 if unused
mcs_index = 1 # mcs index
```

Налаштування наземної станції. Для отримання виводу телеметрії використовуємо QGroundControl (для телеметрії та керування) + WifibroadcastOSD (для відео та OSD) на GS. Потрібно вимкнути відображення відео в QGroundcontrol, щоб уникнути конфлікту

Налаштуємо потокове відео RTP на безпілотнику на `udp://127.0.0.1:5602` або перевизначте порт прослуховування в `/etc/wifibroadcast.cfg` (`wfb_ng/conf/master.cfg` з описом функцій)

Вимикаємо `wpa_supplicant` та інші демони в інтерфейсі WFB-NG `wlan`. Використовуємо `ps uaxwww | grep wlan` для перевірки.

Перевіряємо, чи картка перебуває в некерованому стані у виводі `nmcli`, і `ifconfig wlanXX` не показує жодної адреси, а стан картки не працює.

Редагуємо `/etc/default/wifibroadcast` і заміняємо `wlan0` на правильну назву інтерфейсу Wi-Fi. Також додаємо до `/etc/NetworkManager/NetworkManager.conf` такий розділ:

[ключовий файл]

`unmanaged-devices=інтерфейс-назва:wlan0`

Якщо доступний `/etc/dhclient.conf`, треба відредагувати його та додати:

- заборону інтерфейсів `wlan0`;
- ігнорування інтерфейсу WFB-NG.

Виконуємо `systemctl daemon-reload`, `systemctl` запустить `wifibroadcast@gs` на GS і `systemctl` запускаємо `wifibroadcast@drone` на дроні.

Запускаємо `wfb-cli gs` на стороні GS, щоб відстежувати стан посилення

Для IPoWB (IPv4 через тунель Wifibroadcast) потрібен лише драйвер ядра `tun/tap` (`tun.ko`). Тунель буде налаштований і працюватиме з коробки. Сторона дрона матиме адресу `10.5.0.2/24`, а GS – `10.5.0.1/24`. Тунель використовує менш ефективну швидкість кодування (для мінімізації затримки), ніж потоки відео та `mavlink`, і використовує його лише для трафіку з низькою пропускну здатністю (наприклад, `ssh`), а не як загальне посилення для потоків відео та телеметрії.

На наземній станції можна вказати кілька мереж (у `/etc/default/wifibroadcast`), якщо є кілька адаптерів із спрямованими та/або всенаправленими антенами. TX адаптер буде вибрано за допомогою RSSI сигналу RX. У випадку карт `rtl8812au` з двома антенами можна дозволити STBC використовувати обидві для передачі одночасно.

Якщо виникають такі помилки:

```
2023-12-28 14:57:15+0300 [-] Log opened.
2023-12-28 14:57:15+0300 [-] # iw reg set BO
2023-12-28 14:57:15+0300 [-] # ifconfig wlan1 down
2023-12-28 14:57:16+0300 [-] # iw dev wlan1 set monitor otherbss
2023-12-28 14:57:16+0300 [-] SIOCSIFFLAGS: Operation not possible due to RF-kill
2023-12-28 14:57:16+0300 [-] Stopping reactor due to fatal error: RC 255: ifconfig wlan1 up
2023-12-28 14:57:16+0300 [-] Main loop terminated.
2023-12-28 14:57:16+0300 [-] Exiting with code 1 тоді потрібно вимкнути RFKill: Виконуємо команду rfkill для їх блокування.
```

## 4.2 Тестування роботи розробленої системи

Після проведення всіх налаштувань було зроблено тестування розробленої системи цифрової передачі відеопотоку.

На першому етапі було перевірено на персональному компютері можливість отримання відеопотоку з розробленого відеомодуля.



Рисунок 4.4 – Перший тест системи

Після підтвердження працездатності було розроблено та виготовлено на 3Д принтері корпуси для блоків, що встановлюються в дрон з метою запобігання їх пошкодженню під час експлуатації.



Рисунок 4.5 – Бортова частина системи у набруківаному корпусі

Для попереднього тестування роботи розробленої системи у якості відеопотоку подавались сигнали перевірки кольоровості.

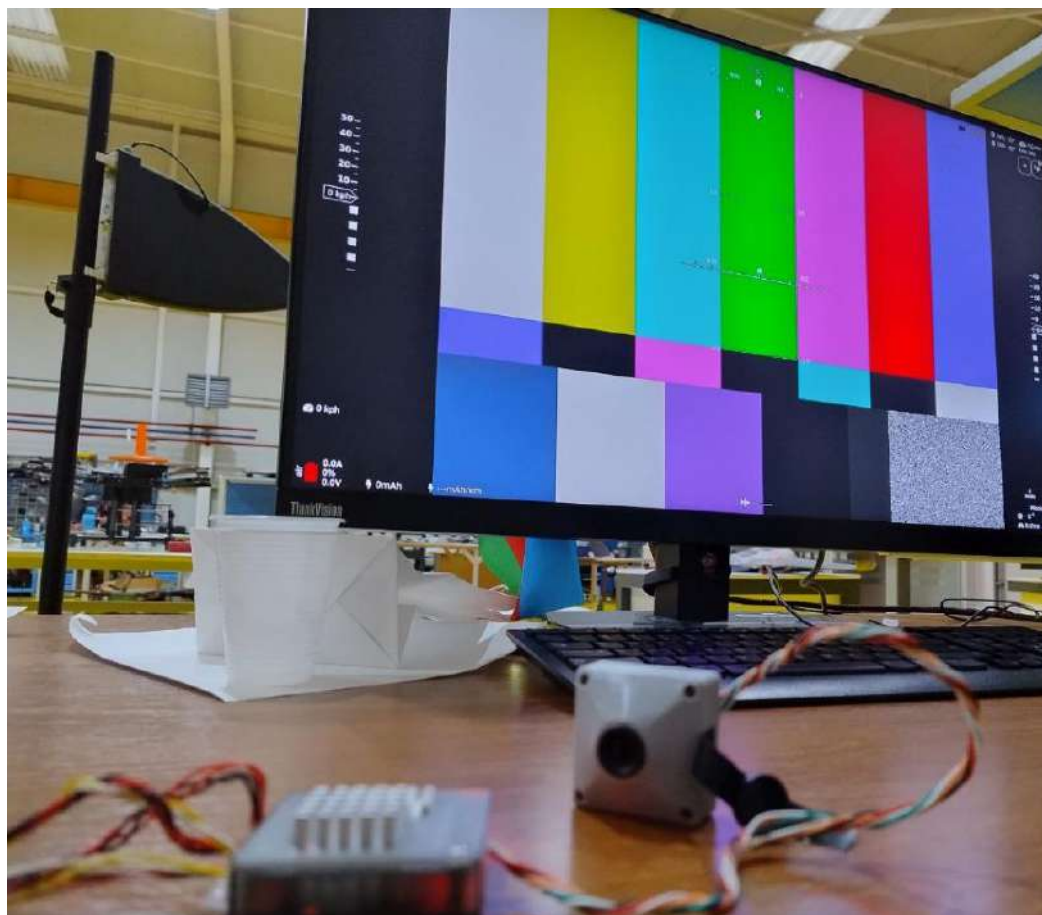


Рисунок 4.6 – Тестування правильності передачі кольорів

Після підтвердження працездатності роботи було перевірено роботу виводу телеметрії з польотного контролера.

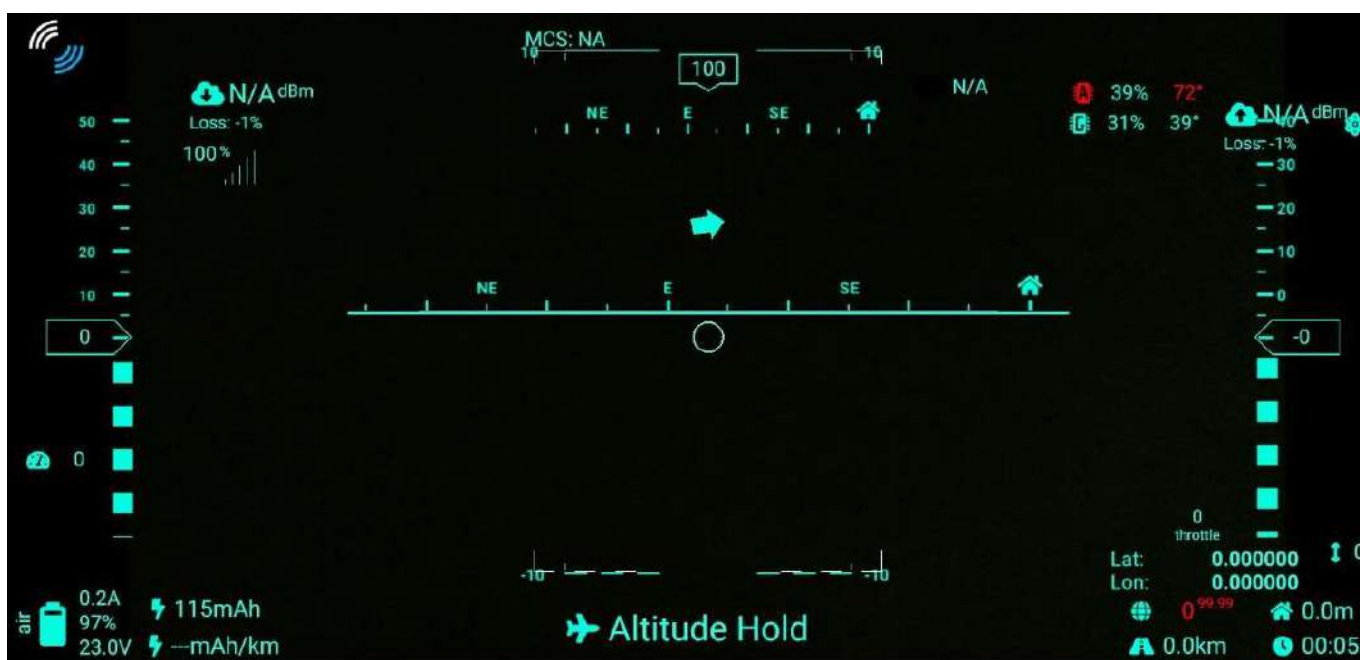


Рисунок 4.7 – Тестування виведення телеметрії на дисплей

Останнім етапом безпольотного тестування було отримання повного відеопотоку з телеметрію через радіоканал

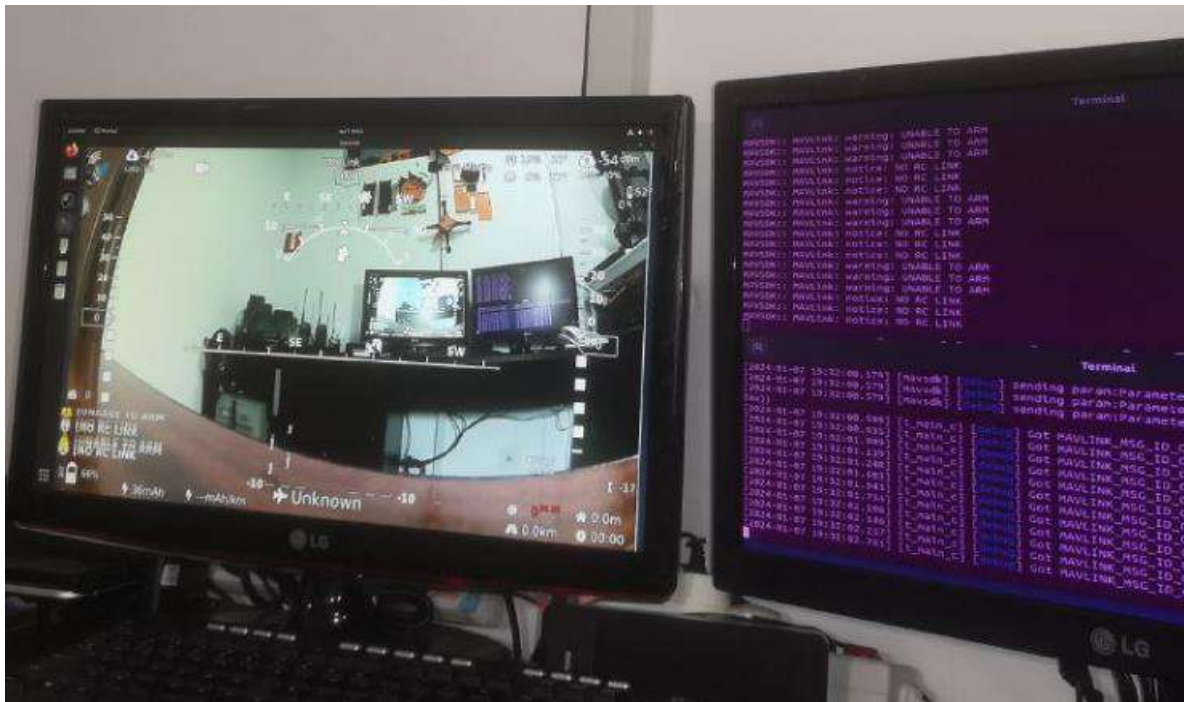


Рисунок 4.8 – Тестування системи в зборі

Ще до отримання розроблених модулів передачі з підсиленим рівнем сигналу було проведено тестування роботи цифрової системи у складі дрону з використанням покупних елементів для реалізації бортової частини.



Рисунок 4.9 – Встановлення розробленої системи в БПЛА

Тестування показало повноцінну роботу розробленої системи у складі дрону. Через організаційні обмеження не вдалось виміряти дальність передачі сигналу однак враховуючи, що розроблено модуль з вихідною потужністю 2Вт можна прогнозувати, що дальність роботи розробленої системи при прямій відимості буде складати не менше 20км.

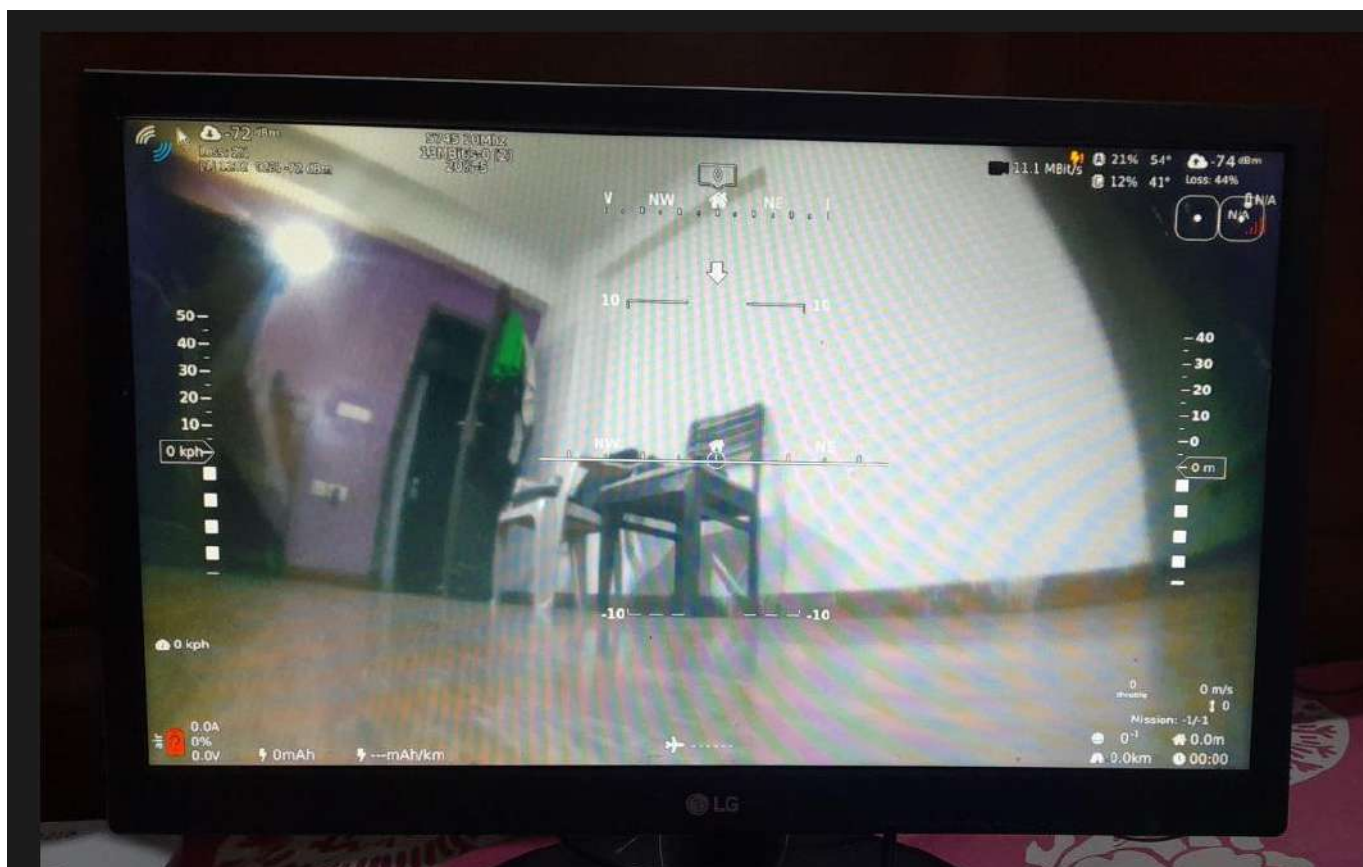


Рисунок 4.10 – Тестування відображення зображення отриманого з бортової розробленої системи, встановленої в дроні

## ВИСНОВКИ

В магістерській роботі

- проведено аналіз існуючих систем передаванн відеопотоку;

- проведено аналіз існуючих як комерційних цифрови хсистем так і цифрових систем з відкритим кодом;

- розроблено структуру та обрано апаратне забезпечення для реалізації власної цифрової системи FPV на основі програмного забезпечення з відкритим кодом OpenIPC;

- для зменшення габаритів та збільшення швидкості обробки відео було розроблено та виготовлено згідно документації на виробництві бортовий модуль захоплення віде;

- для збільшення відстані роботи цифрової системи було розроблено та виготовлено бортовий модуль передачі даних на базі мікросхеми RTL8812AU з потужністю до 2Вт;

- наведено порядок налаштування розробленої системи;

- проведено тестування розробленої системи на кожному кроці проектування.

Розроблена цифрова система FPV має меншу вартість у порівнянні з комерційними системами, через відкритість коду дозволяє роботи ретрансляцію, а більш потужний модуль передавання надає змогу збільшити відстань роботи.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE 802.15 Working Group for wireless personal area networks at <http://www.ieee802.org/15/>,"
2. Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE Standard 802.11-1999, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," IEEE Standard 802.11-1999.
3. S. Chikkerur, V. Sundaram, M. Reisslein, and L. J. Karam, "Objective video quality assessment methods: A classification, review, and performance comparison," *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 57, pp. 165-182, Jun. 2011.
4. A. M. Kholaf, T. D. Todd, P. Koutsakis, and A. Lazaris, "Energy efficient h.263 video transmission in power saving Wireless LAN infrastructure," *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 12, pp. 142-153, Feb. 2010.
5. H. Hu, Y. Guo, and Y. Liu, "Peer-to-peer streaming of layered video: Efficiency, fairness and incentive," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Techn.*, vol. 21, pp. 1013-1026, Aug. 2011.
6. E. B. Rodrigues and F. Casadevall, "Control of the trade-off between resource efficiency and user fairness in wireless networks using utility-based adaptive resource allocation," *IEEE Commun. Magazine*, vol. 49, pp. 90-98, Sep. 2011.
7. M. Li, Z. Chen, and Y.-P. Tan, "Cross-layer optimization for SVC video delivery over the IEEE 802.11e wireless networks," *J. Visual Commun. Image Represent.*, vol. 22, pp. 284-296, Apr. 2011.
8. H. Park and M. van der Schaar, "Fairness strategies for wireless resource allocation among autonomous multimedia users," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Techn.*, vol. 20, pp. 297-309, Feb. 2010.
9. G. Marfia and M. Roccetti, "Dealing with wireless links in the ERA of bandwidth demanding wireless home entertainment," in *IEEE Conf. Multimedia Expo*, pp. 13761381, 2010.

10. J. Liu, Y. Cho, Z. Guo, and C.-C. J. Kuo, "Bit allocation for spatial scalability coding of H.264/SVC with dependent rate-distortion analysis," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Techn.*, vol. 20, pp. 967-981, July 2010.
11. Z. Chen, "Quality of experience issues in media delivery," *IEEE MMTC E-Letter*, vol. 6, Aug. 2011.
12. Z. Ma, M. Xu, and Y. Wang, "Modeling video rate as a function of frame size, frame rate and quantization stepsize," in *Proc. of IEEE MMSP*, Oct. 2011.
13. M. Li, Z. Chen, and Y.-P. Tan, "On Quality of Experience of scalable video adaptation," *J. Visual Commun. Image Represent.*, vol. 24, no. 5, pp. 509-521, 2013.
14. Y.-F. Ou, Y. Xue, Z. Ma, and Y. Wang, "A perceptual video quality model for mobile platform considering impact of spatial, temporal, and amplitude resolutions," in *IEEE IVMSWP Workshop*, pp. 117-122, Jun. 2011.
15. H. Hu, Z. Ma, and Y. Wang, "Optimization of spatial, temporal and amplitude resolution for rate-constrained video coding and scalable video adaptation," in *IEEE Conf. Image Process.*, Sep. 2012.
16. M. Li, Z. Chen, and Y.-P. Tan, "QoE-aware resource allocation for scalable video transmission over multiuser MIMO-OFDM systems," in *IEEE Visual Commun. Image Process.*, Nov. 2012.

## **ДОДАТОК А – ПРЕЗЕНТАЦІЯ**