

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Галузь знань 12 – Інформаційні технології

Спеціальність 123 –Комп'ютерна інженерія

на тему «Метод і кіберфізична система сканеру радіоєфіру для прийняття рішень вибору частотних діапазонів»

КвРКІП. 302176.23.02.44 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група КІ2м-23-2 Всц Володимир ГЕРИШ
Підпис Ім'я, прізвище

Керівник к.т.н., доцент Олександр Олексій ІВАНОВ
Науковий ступінь, вчене звання Підпис Ім'я, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри КІС, доктор філософії, доцент

Ольга ПАВЛОВА

05 2025 р.

Хмельницький, 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень МАГІСТР

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма ОСВІТНЬО-НАУКОВА ПРОГРАМА «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА

“ 01 ” 09 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Володимиру ГЕРИШУ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Метод і кіберфізична система сканеру радіоефіру для прийняття рішень вибору частотних діапазонів

Керівник проекту (роботи) Олексій ІВАНОВ, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 08.01.2025 №8

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.05.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на дипломне проєктування

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

Аналіз сучасних рішень у сфері зв'язку та спектрального моніторингу для БПЛА

Розробка методу прийняття рішень щодо вибору частотного діапазону

Проектування кіберфізичної системи сканування та керування частотами

Експериментальні дослідження та оцінка ефективності системи

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Сергій ЛИСЕНКО, професор кафедри КПС		
Антиплагіат	Андрій Нічепорук, доцент кафедри КПС		

7. Дата видачі завдання « 01 » 09 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики КвРМ з керівником	01.09.2024	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.10.2024	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі	01.11.2024	виконано
4	Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі	01.12.2024	виконано
5	Робота над науковою статтею	01.02.2025	виконано
6	Робота над розділом 3 – розробка методів для вирішення поставленої задачі	15.02.2025	виконано
7	Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина	01.04.2025	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	18.04.2025	виконано
9	Попередній захист ДРМ	29.04.2025	виконано
10	Захист ДРМ на засіданні ЕК	До 15.05.2025	

Студент


Підпис

Володимир ГЕРИЦЬ
Ім'я, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Олексій ІВАНОВ
Ім'я, прізвище

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: Метод і кіберфізична система сканеру радіоефіру для прийняття рішень вибору частотних діапазонів.

Автор роботи: Володимир Гериш.

Керівник роботи: Олексій Іванов, к.т.н., доцент.

Пояснювальна записка: 75 с., 18 рис., 4 табл., 5 дод., 82 джерел.

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, СКАНЕР РАДІОЕФІРУ, ЧАСТОТНИЙ ДІАПАЗОН, АНАЛОГОВЕ ВІДЕО, RSSI, EDGETX, CRSF, FPV-ДРОН.

Об'єктом дослідження є процес передачі відеосигналу від FPV-дрона до наземної станції керування у реальних умовах спектрального перевантаження.

Предметом дослідження є методи аналізу спектру та автоматизованого вибору частотного каналу для передачі відеосигналу у FPV-системах з використанням вбудованих мікроконтролерів і засобів телеметрії.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є підвищення надійності відеозв'язку FPV-дронів за рахунок розробки методу прийняття рішень і кіберфізичної системи сканера радіоефіру, яка дозволяє в реальному часі аналізувати спектральну обстановку та обирати оптимальний частотний діапазон для передачі відео.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи аналізу спектру за рівнем RSSI, моделювання сценаріїв завад, розробка сценаріїв перемикання каналів, візуалізація спектру на пристрої керування, реалізація алгоритмів у середовищі EdgeTX LUA, тестування затримки перемикання каналів.

Наукова новизна отриманих результатів:

- набув подальшого розвитку метод вибору частотного каналу за спектральною ситуацією, адаптований до умов аналогової передачі відео FPV-дронами;
- набула подальшого розвитку інформаційна технологія сканування радіоефіру з використанням відеоприймача як індикатора спектральної активності без потреби у додаткових SDR або сканерах.

На основі проведених досліджень розроблена архітектура і компоненти програмного забезпечення для EdgeTX, що реалізує прийняття рішень щодо перемикання каналів відеопередачі. Система містить скрипт на LUA, який аналізує сигнали на всіх частотах, візуалізує спектр, дозволяє ручний та автоматичний вибір каналів, і надсилає команду перемикання через CRSF-протокол.

Практична значимість отриманих результатів полягає у можливості інтеграції розробленої системи у вже наявні FPV-набори без апаратних змін. Рішення може бути застосоване для підвищення надійності зв'язку під час польотів у зонах спектрального конфлікту (наприклад, у військових або змаганнях), де швидка реакція на зміну спектру критично важлива.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	6
ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ ЗВ'ЯЗКУ ТА СПЕКТРАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ ДЛЯ БПЛА	10
1.1 Радіотракти, необхідні для польоту БПЛА	10
1.1.1 Керування та телеметрія	11
1.1.2 Передача відеосигналу	12
1.2 Проблеми аналогових систем передачі відео	18
1.2.1 Необхідність використання аналогових систем передачі відео	18
1.2.2 Недоліки аналогових систем передачі відео	20
1.3 Принципи визначення якості відео приймачами аналогового відео	24
1.3.1 За значенням RSSI	24
1.3.2 Візуальний контроль оператором	25
1.3.3 Аналіз відеосигналу апаратно	26
1.4 Висновки	28
2 РОЗРОБКА МЕТОДУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ВИБОРУ ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ	30
2.1 Застосування відео приймача, як сканера радіоефіру	30
2.2 Інтеграція сканера у типову систему зв'язку FPV	34
2.2.1 Типова архітектура зв'язку	34
2.2.2 Модифікація архітектури для інтеграції сканера	36
2.3 Методи прийняття рішень вибору частотного діапазон	41
2.3.1 Прийняття рішення за максимальним сигналом	41

2.3.2	Прийняття рішення за псевдовипадковим принципом	43
2.3.3	Прийняття рішення оператором	45
2.4	Висновки	46
3	ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ СКАНУВАННЯ ТА КЕРУВАННЯ ЧАСТОТАМИ	47
3.1	Реалізація методів прийняття рішень на базі прошивки EdgeTX	47
3.1.1	Інтеграція скрипта у EdgeTX	49
3.1.2	Реалізація GUI	51
3.1.3	Отримання інформації з сканера	53
3.1.4	Реалізація алгоритмів аналізу	54
3.2	Проектування вбудованого ПЗ для ESP32C3	57
3.2.1	Вибір мікроконтролера	57
3.2.2	Читання даних з відеоприймача	58
3.2.3	Передача даних до LUA скрипта	60
3.3	Модифікації ПЗ Betaflight та ELRS	62
3.4	Проектування схеми електричної принципової	66
3.5	Висновки	68
4	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ	70
4.1	Дослідження часу переключення	70
4.2	Покращення загального часу переключення з використанням сканеру	77
4.3	Висновки	79
	ВИСНОВКИ	81
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	84
	ДОДАТОК А Лістинг LUA скрипта сканера радіоефіру	92

ДОДАТОК Б Лістинг вбудованого програмного забезпечення сканера радіоефіру	97
ДОДАТОК В Схема сканера електрична принципова	99
ДОДАТОК Г Копія матеріалів конференції MIT 2025	100
ДОДАТОК Д Презентація до захисту кваліфікаційної роботи	104

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

БПЛА – Безпілотний Літальний Апарат

ADC (Analog-to-Digital Converter) – аналогово-цифровий перетворювач

CVBS (Composite Video Blanking and Sync) – композитний відеосигнал, що включає яскравість, колір і синхросигнали

CRSF (Crossfire Serial Protocol) – послідовний протокол зв'язку між пультом та польотним контролером (TBS Crossfire / ELRS)

DVR (Digital Video Recorder) – цифровий відеореєстратор

ELRS (ExpressLRS) – високошвидкісна система радіокерування з відкритим кодом, що підтримує CRSF

ESC (Electronic Speed Controller) – електронний регулятор обертів двигуна

FPV (First Person View) – режим польоту від першої особи

GUI (Graphical User Interface) – графічний інтерфейс користувача

IRC Tramp (Tramp Telemetry Protocol) – протокол керування параметрами VTX, альтернативний до SmartAudio

IMU (Inertial Measurement Unit) – інерціальна вимірювальна система (акселерометр + гіроскоп)

LoRa (Long Range) – протокол радіозв'язку з великою дальністю і низькою швидкістю передачі

LNA (Low Noise Amplifier) – малошумний підсилювач

LUA – Легка скриптова мова програмування, яку використовує EdgeTX

MSP (MultiWii Serial Protocol) – послідовний протокол обміну даними між FC і конфігуратором

NTSC (National Television System Committee) – аналоговий стандарт відео (60 Гц, 525 рядків)

OSD (On-Screen Display) – накладення телеметрії або даних поверх відео

PAL (Phase Alternating Line) – аналоговий стандарт відео (50 Гц, 625 рядків)

PCB (Printed Circuit Board) – друкована плата

PLL (Phase-Locked Loop) – фазова автопідстройка частоти (використовується в синтезаторах частот)

PPM (Pulse Position Modulation) – модуляція положення імпульсів, застосовується для передачі каналів RC

PWM (Pulse Width Modulation) – широтно-імпульсна модуляція, часто використовується для керування ESC

RSSI (Received Signal Strength Indicator) – індикатор сили прийнятого сигналу

RX (Receiver)– приймач

RX5808 – модуль аналогового відеоприймача 5.8 ГГц

SAW (Surface Acoustic Wave) – фільтр на поверхневих акустичних хвилях

SPI (Serial Peripheral Interface) – послідовний інтерфейс для обміну з периферійними пристроями

SmartAudio – однопровідний протокол керування параметрами відеопередавача (VTX)

UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) – універсальний асинхронний послідовний порт

VTX (Video Transmitter) – відеопередавач

VRX (Video Receiver) – відеоприймач

ВСТУП

Сучасний світ усе більше залежить від бездротових технологій зв'язку, особливо в умовах стрімкого розвитку дронів і автономних систем. FPV-дрони відіграють важливу роль у різних сферах, включаючи розвідку, моніторинг територій, забезпечення зв'язку та бойові операції. Однак ефективність таких дронів безпосередньо залежить від стабільності відеозв'язку, який є основним джерелом інформації для оператора під час виконання завдань.

Однією з основних проблем використання FPV-дронів у бойових умовах є перевантаження радіочастотного спектра, що призводить до втрати якості відеосигналу та появи взаємних завад між операторами. Аналогові системи передачі відео, які широко використовуються в FPV, мають обмежену кількість каналів, що суттєво ускладнює їхнє застосування у зонах активних бойових дій, де одночасно працює велика кількість безпілотних платформ.

Розробка систем моніторингу радіочастотного спектра та автоматичного вибору частотного діапазону дозволяє значно підвищити ефективність використання FPV-дронів. Такі системи можуть сканувати ефір у режимі реального часу, аналізувати рівень завад на доступних частотах та допомагати операторам вибрати оптимальний канал зв'язку. Це особливо важливо в умовах бойового застосування, де необхідно оперативно адаптуватися до змін у спектрі та уникати каналів, що вже зайняті іншими екіпажами або перебувають під впливом засобів радіоелектронної боротьби.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка методів та алгоритмів для кіберфізичної системи сканера радіоефіру, яка дозволить FPV-дронам ефективно обирати частотні діапазони, мінімізуючи ризик втрати сигналу та підвищуючи загальну ефективність виконання завдань.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- розробити метод прийняття рішень щодо вибору оптимального відеоканалу на основі сигналів спектрального сканування;

- проаналізувати існуючі підходи до моніторингу частотного спектра для аналогових FPV-систем;
- реалізувати кіберфізичну систему сканування радіоефіру з інтеграцією в пульт керування FPV-дрона;
- модифікувати програмне забезпечення OpenTX/EdgeTX та ELRS для реалізації автоматичного перемикання відеоканалу;
- провести експериментальне дослідження роботи системи в умовах частотного перевантаження та дії РЕБ.

Об'єктом дослідження є процес вибору частотного діапазону для передачі відеосигналу в FPV-дронах в умовах обмеженого спектрального ресурсу.

Предметом дослідження є методи аналізу спектра та алгоритми прийняття рішень у системах передачі відео в реальному часі для FPV-дронів.

Наукова новизна отриманих результатів:

- запропоновано новий метод вибору відеоканалу на основі аналізу рівня сигналу RSSI з додаткового приймача;
- вперше реалізовано інтеграцію алгоритму вибору частоти в EdgeTX за допомогою LUA-скрипта, що взаємодіє з системою керування через протокол CRSF;
- обґрунтовано доцільність модифікації прошивок ELRS і Betaflight для забезпечення перемикання відеоканалу навіть під час польоту.

Практична значимість отриманих результатів полягає у створенні працюючого прототипу системи, що дозволяє динамічно обирати відеоканал для FPV-дронів у складних умовах, зокрема бойових. Результати роботи можуть бути використані для вдосконалення FPV-комплексів, підвищення надійності зв'язку та захищеності від перешкод.

Для реалізації поставлених завдань використовувалися методи спектрального аналізу, алгоритмічні методи прийняття рішень, засоби програмування вбудованих систем, а також моделювання роботи систем зв'язку в умовах завад.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ ЗВ'ЯЗКУ ТА СПЕКТРАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ ДЛЯ БПЛА

1.1 Радіотракти, необхідні для польоту БПЛА

Радіотракти, необхідні БПЛА для забезпечення стабільного керування, передачі даних та отримання відеосигналу в режимі реального часу. Без якісного зв'язку між безпілотником і оператором його ефективне використання стає неможливим, особливо у складних умовах бойових дій або при польотах на великі відстані. В залежності від призначення та умов експлуатації БПЛА можуть використовувати різні технології зв'язку, які мають свої переваги та недоліки.

Основними функціональними компонентами радіотракту є канал керування, канал телеметрії, канал передачі відео та допоміжні канали, які можуть використовуватися для зв'язку з іншими дронами або наземними станціями [1]. На рисунку 1.1 зображується типова схема зв'язку наземної станції та бойового БПЛА.

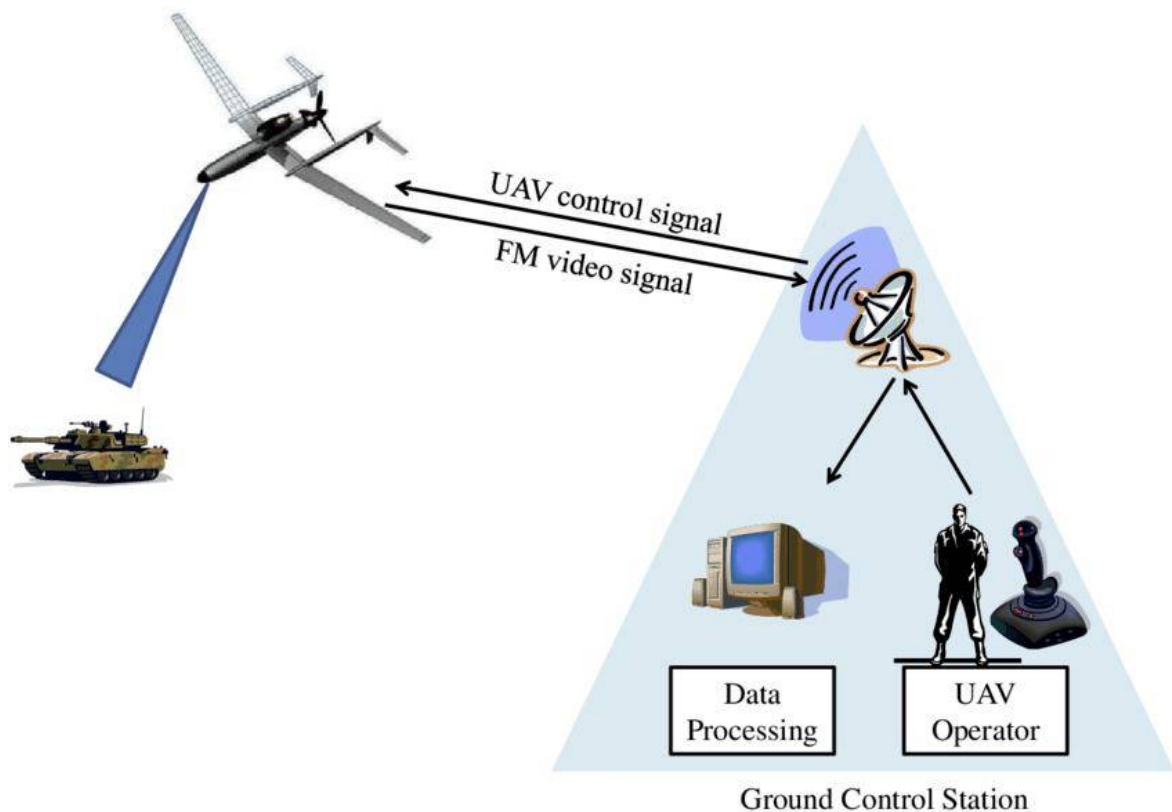


Рисунок 1.1 – Схема роботи БПЛА типу FPV [2]

1.1.1 Керування та телеметрія

Канал керування є критично важливим елементом радіотракту FPV-дронів, оскільки саме через нього оператор передає команди на безпілотник, включаючи керування польотом, зміну параметрів роботи систем і аварійні процедури. На сучасному ринку FPV-дронів домінують системи керування, що використовують модуляцію LoRa, яка забезпечує високу чутливість приймача навіть при дуже низькій швидкості передачі даних. Це дозволяє значно збільшити дальність керування у порівнянні з традиційними системами, що працюють у діапазоні 2.4 ГГц із частотною або амплітудною модуляцією.

Технологія LoRa (Long Range) була розроблена для застосування в низькошвидкісних мережах [3] Інтернету речей, однак її характеристики зробили її надзвичайно популярною у сфері FPV. Головною перевагою є здатність працювати з надзвичайно слабкими сигналами на низьких бітрейтах, що дозволяє підтримувати зв'язок навіть у складних умовах радіозавад, густої забудови або перешкод від рельєфу. Завдяки використанню вузькосмугової модуляції, системи LoRa мають відмінну завадостійкість і можуть проникати крізь перешкоди, що робить їх ідеальним вибором для польотів на далекі дистанції [4]. Водночас їх недоліком є низька пропускна здатність, що обмежує можливість передачі великих обсягів даних у реальному часі.

Більшість сучасних систем керування на базі LoRa інтегрують у себе також канал телеметрії. Хоча канал телеметрії зазвичай не є критичним для керування дроном, він дозволяє оператору отримувати інформацію про стан безпілотника, такі як напруга акумулятора, координати GPS, висоту, швидкість та інші параметри [5]. У бойових умовах цей канал може бути використаний для автономного повернення дрона в точку запуску у разі втрати основного каналу зв'язку. Водночас слід зазначити, що більшість критичних даних оператор отримує через OSD (On-Screen Display), який накладає основну інформацію безпосередньо на відеосигнал. Це робить канал телеметрії другорядним, оскільки при збереженні відеозв'язку

пілот завжди бачить основні параметри польоту навіть без доступу до окремого телеметричного потоку.

Прикладами популярних систем керування FPV-дронів на базі LoRa є TBS Crossfire, ExpressLRS (ELRS) та ImmersionRC Ghost.

ExpressLRS (ELRS) – це відкрите рішення, яке швидко завоювало популярність серед FPV-пілотів завдяки можливості гнучкого налаштування, високій чутливості приймача та ефективності протоколу зв'язку. Працюючи в діапазонах 2.4 ГГц та 868/915 МГц, ELRS використовує LoRa-модуляцію з динамічним бітрейтом, що дозволяє досягати затримок усього 5-10 мс [6] при низьких відстанях і високої стабільності сигналу при польотах на далекі дистанції. Завдяки відкритому коду та підтримці великої кількості апаратних платформ ця система активно використовується як серед аматорів, так і серед військових FPV-операторів.

TBS Crossfire – одна з перших і найпоширеніших систем довготривалого зв'язку для FPV, що працює в діапазоні 868/915 МГц. Вона використовує адаптивні протоколи, які змінюють потужність передавача та частоту оновлення залежно від якості сигналу, що дозволяє досягати великої дальності зв'язку, інколи понад 100 км у сприятливих умовах. Вбудований канал телеметрії дозволяє передавати GPS-дані, напругу батареї та інші параметри, хоча його пропускну здатність є обмеженою [7].

Завдяки широкому використанню систем на базі LoRa значно покращилася якість зв'язку та стабільність керування FPV-дронами навіть у складних умовах. Водночас розвиток цих технологій продовжується, з'являються нові алгоритми адаптації частоти та модуляції, що дозволяють ще більше покращити ефективність таких систем.

1.1.2 Передача відеосигналу

Відеозв'язок є одним із ключових компонентів системи FPV (First Person View), оскільки саме через нього пілот отримує візуальну інформацію про

положення дрона в просторі, навколишнє середовище та загальну ситуацію під час польоту. На відміну від традиційних безпілотних літальних апаратів, де телеметрія зазвичай передається окремим каналом у цифровому вигляді, у FPV-дронах роль каналу телеметрії часто виконує відеопотік із накладеною інформацією у вигляді OSD (On-Screen Display).

OSD – це технологія, яка дозволяє відображати текстову та графічну інформацію поверх відеозображення у реальному часі. Завдяки цьому пілот може отримувати важливі дані без необхідності перемикатися між різними каналами зв'язку.

OSD зазвичай накладає на відео інформацію про напругу акумулятора, рівень сигналу керування, швидкість, висоту, координати GPS, напрямок польоту, кут нахилу дрона та інші параметри. Ця інформація особливо критична в бойових умовах, де оператору потрібно швидко оцінювати ситуацію та приймати рішення без затримок [8].

Типово, FPV дрони літають на open-source прошивці Betaflight. Стандартною функцією системи на цій прошивці є екран OSD. Те, які дані відображаються і де, визначається в програмі – Betaflight Configurator. Вікно налаштування OSD в Betaflight Configurator можна спостерігати на рисунку 1.2.

Відеотрансляція може здійснюватися як у аналоговому, так і цифровому форматі. Аналогові системи передачі відео залишаються популярними завдяки своїй простоті, низькій затримці та високій чутливості до слабких сигналів. Однак вони мають низку обмежень, серед яких чутливість до перешкод, обмежена кількість доступних каналів і можливість перехоплення сигналу.

Цифрові системи пропонують вищу якість зображення та додатковий рівень безпеки, але мають вищу затримку ціну та чутливість, що критично для бойового застосування FPV-дронів.

Цифрові системи зв'язку використовують сучасні методи обробки та передачі даних, що забезпечує високу якість зображення, більшу роздільну здатність і можливість роботи з адаптивними алгоритмами корекції помилок.

Прикладом цифрових систем FPV є DJI O3, Walksnail Avatar та HDZero. Вони передають відеосигнал із мінімально можливими затримками, дозволяючи операторам отримувати чітку картинку навіть у складних умовах. Основною перевагою цифрових систем є здатність передавати HD-якість відео, що значно покращує ситуаційну обізнаність пілота. Водночас їхнім недоліком є вища затримка порівняно з аналоговими рішеннями, а також значно вищі вимоги до енергоспоживання та пропускної здатності радіоканалу [10]. Типову якість аналогового відео, порівняно з цифровим можна порівняти на рисунку 1.3.

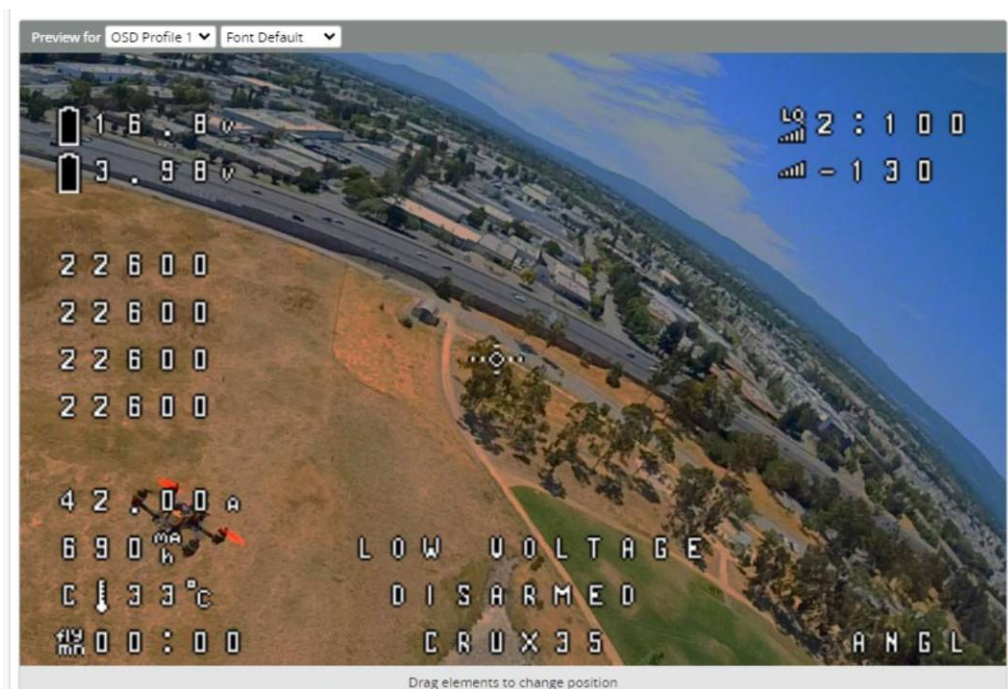


Рисунок 1.2 – Вікно налаштування OSD у програмі Betaflight Configurator [9]

Аналогові системи передачі відео є класичним рішенням у сфері FPV та домінують на ринку завдяки своїй простоті, низькій затримці та високій чутливості приймача. Вони використовують частотну модуляцію (FM) для передачі відеосигналу в реальному часі. Аналогові системи можуть працювати в різних частотних діапазонах, включаючи 1.2 ГГц, 2.4 ГГц та 5.8 ГГц. Однак найбільш поширеним є саме діапазон 5.8 ГГц, оскільки він забезпечує оптимальний баланс між дальністю зв'язку, розміром антен та стійкістю до перешкод.

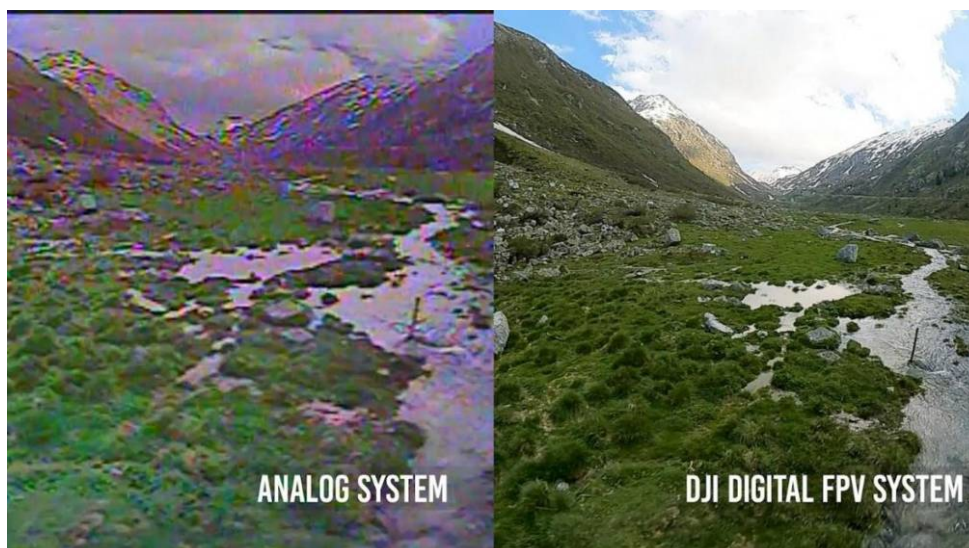


Рисунок 1.3 – Порівняння якості відео аналогової (зліва) та цифрової систем передачі відео [11]

Крім того, аналогові системи мають широкую екосистему доступних компонентів – від камер і передавачів до приймачів та антен – що сприяє їх масовому використанню серед ентузіастів і професіоналів. Простота інтеграції та невисока вартість роблять їх привабливими для самостійного складання FPV-дронів, а також для проєктів, де критичним є мінімальне енергоспоживання та компактність. Незважаючи на деякі обмеження щодо якості зображення, аналогове відео досі залишається стандартом у змаганнях FPV-дронів завдяки своїй практичності та стабільності в умовах динамічних польотів.

Аналогові відеосистеми використовуються у військових FPV-дронах через їхню відмінну чутливість, що дозволяє отримувати зображення навіть за дуже слабкого сигналу. Це критично в умовах глушіння або роботи в складному середовищі, де цифрові системи можуть повністю втратити зв'язок через значне погіршення сигналу.

Цифрові та аналогові системи передачі відео мають суттєві відмінності, що визначають їхню ефективність у різних умовах експлуатації. Цифрові системи забезпечують високу якість зображення, що дозволяє отримувати чітку та деталізовану картинку. Це особливо корисно для цивільних FPV-додатків, де важлива візуальна інформативність та зручність для оператора. Аналогові системи,

навпаки, мають нижчу роздільну здатність, проте їхньою перевагою є можливість збереження сигналу навіть при низькій якості зв'язку, що критично в умовах бойового застосування.

Одним із ключових аспектів є затримка сигналу. У аналогових системах вона мінімальна, що дозволяє пілотам швидко реагувати на зміни у середовищі. Це особливо важливо для FPV-дронів, що виконують маневрені польоти на високих швидкостях або працюють у зонах підвищеного ризику. У цифрових системах затримка є вищою через необхідність обробки та компресії відеопотоку, що може створювати проблеми в динамічних сценаріях.

Незважаючи на прогрес у цифрових технологіях, саме аналогові системи залишаються домінантними в бойових FPV-дронах через свою простоту, передбачуваність та здатність працювати в умовах часткового зашумлення. У ситуаціях, коли зв'язок критично важливий і навіть частково зіпсоване зображення краще, ніж його повна втрата, аналогова передача відео забезпечує вищу надійність. Саме ця властивість робить її незамінною для реального часу та управління в агресивному радіочастотному середовищі.

Щодо стійкості до перешкод, аналогові відеопередавачі можуть працювати навіть при значному рівні шумів у каналі зв'язку, хоча це призводить до появи статичних завад і спотворень зображення. Водночас цифрові системи або забезпечують ідеальну якість відео, або повністю втрачають сигнал, якщо рівень перешкод перевищує певний поріг. Також цифрові рішення вимагають більшої пропускної здатності радіоканалу та є більш чутливими до якості зв'язку.

Аналогові системи також мають перевагу у дальності зв'язку. Вони можуть працювати з дуже слабким сигналом, що дозволяє FPV-дронам літати на значні відстані без необхідності використання надто високопотужних передавачів. Такі системи дозволяють виконати завдання, навіть в умовах недоступності великої кількості початкової інформації. В таких умовах зображення буде сильно спотвореним, але бойова робота може бути продовжена до останнього.

Цифрові системи, у свою чергу, потребують стабільного рівня сигналу для коректної роботи, що обмежує їхню ефективність у складних умовах, таких як густі міські забудови або зони з високим рівнем електромагнітних завад.

Ще однією важливою характеристикою є кількість доступних каналів. Аналогові відеосистеми зазвичай використовують широкосмугову модуляцію, що значно обмежує кількість одночасно доступних частот у певному діапазоні [12]. Це може створювати проблеми у зонах із великою кількістю FPV-дронів, які використовують один і той самий частотний спектр. Цифрові системи більш гнучкі у цьому відношенні, оскільки можуть застосовувати складні методи модуляції та адаптивного вибору каналів для мінімізації взаємних завад.

Крім того, питання захищеності сигналу також є критично важливим. Аналоговий потік відео практично завжди є відкритим для стороннього спостерігача, що є дуже не бажаним в бойових умовах.

До того ж аналогові системи легко піддаються глушінню, оскільки їхній сигнал не має шифрування та працює на фіксованих частотах. Цифрові системи можуть використовувати алгоритми шифрування та адаптивні частотні протоколи, що робить їх більш стійкими до навмисного придушення сигналу.

З урахуванням усіх цих факторів вибір між цифровими та аналоговими системами передачі відео залежить від конкретного сценарію використання. Цифрові системи є чудовим рішенням для цивільних FPV-застосувань, де важлива висока якість зображення, відсутність шумів та стабільність сигналу. Водночас у бойових умовах, де першочергову роль відіграє мінімальна затримка, висока чутливість приймача та можливість роботи в складних радіочастотних середовищах, аналогові системи залишаються найкращим варіантом. Незважаючи на стрімкий розвиток цифрових технологій, аналогові рішення продовжують широко використовуватися у FPV-дронах завдяки своїй простоті, ефективності та надійності у критичних ситуаціях.

1.2 Проблеми аналогових систем передачі відео

Аналогові системи передачі відео залишаються ключовим вибором для FPV-дронів у бойових умовах завдяки поєднанню низької вартості, високої надійності та сумісності з широким спектром обладнання. Незважаючи на значний прогрес у розробці цифрових систем, аналогові рішення продовжують домінувати в тактичних сценаріях, де критично важливо забезпечити стабільність відеозв'язку навіть у складних радіочастотних умовах.

1.2.1 Необхідність використання аналогових систем передачі відео

Однією з головних переваг аналогових систем є їхня низька вартість у порівнянні з цифровими рішеннями. Бойові FPV-дрони часто використовуються як одноразові засоби ураження або розвідки, тому вартість складових частин відіграє важливу роль. Цифрові системи, такі як DJI O3 або Walksnail Avatar, значно дорожчі через необхідність використання потужних процесорів для обробки сигналу, високошвидкісних передавачів та спеціалізованих приймачів. Аналогові ж системи базуються на простих модуляторах та демодуляторах, що робить їх доступними у великій кількості і дозволяє масово оснащувати FPV-дрони без надмірних витрат.

Ще одним критично важливим фактором є висока чутливість аналогових приймачів. Вона дозволяє підтримувати прийнятний рівень сигналу навіть у ситуаціях, коли цифрова система вже повністю втратила відеозв'язок. Аналогові приймачі можуть працювати з дуже слабким сигналом, поступово погіршуючи якість зображення, але не припиняючи передачу повністю. Це дозволяє оператору продовжувати керувати дроном навіть за умови значного послаблення сигналу або появи потужних завад. На відміну від цього, цифрові системи мають характерний ефект «чорного екрану», коли втрата пакету даних призводить до повного зникнення відео, і зображення не відновлюється [13], поки дрон не повернеться у зону стабільного зв'язку. Така поведінка є надзвичайно небезпечною в бойових

умовах, оскільки втрата відеозв'язку навіть на кілька секунд може зробити керування неможливим і призвести до невиконання завдання або повної втрати дрона.

Ефективна дальність роботи аналогових систем також значно перевищує можливості цифрових FPV-рішень. Завдяки модуляції FM та меншій залежності від рівня сигналу, аналогові передавачі можуть працювати на великих дистанціях навіть за несприятливих умов [14]. Це особливо важливо для польотів у складному рельєфі, наприклад, у міській забудові або в умовах лісної місцевості, де цифрові системи швидко втрачають стабільність через відбиття сигналу від перешкод та перевантаженість спектру. У реальних бойових умовах це означає, що оператори можуть ефективно контролювати FPV-дрони на більших відстанях, ніж це можливо при використанні цифрових передавачів.

Ще одним важливим фактором є доступність аналогових систем. Вони не потребують складних алгоритмів обробки сигналу, цифрових декодерів та спеціальних інтегрованих схем. Це означає, що аналогові передавачі та приймачі можуть вироблятися без необхідності складних ланцюгів постачання, що робить їх особливо привабливими для використання у зонах бойових дій, де доступ до високотехнологічної електроніки може бути обмежений. Аналогові модулі також можуть легко інтегруватися у вже наявні системи без необхідності додаткової розробки програмного забезпечення або оновлення прошивки.

Крім того, важливим аспектом є сумісність аналогових систем. Завдяки стандартизації частотних діапазонів та форматів модуляції оператори можуть використовувати передавачі та приймачі від різних виробників без необхідності спеціального налаштування або калібрування. Це дозволяє гнучко комбінувати компоненти та оперативно замінювати обладнання в польових умовах [15]. У випадку цифрових систем ситуація значно складніша: кожен виробник використовує власний стандарт шифрування та передачі даних, що унеможливорює взаємодію різних платформ між собою.

Проблемою цифрових рішень є складність їхнього відтворення у незалежних розробках. Китайські виробники, які лідирують у сегменті цифрових FPV-систем, мають великий досвід у розробці та оптимізації таких технологій, однак створення власного аналогу цифрових систем передачі відео є надзвичайно складним завданням. Це пов'язано з необхідністю використання передових методів компресії, швидкої обробки сигналу та синхронізації даних у реальному часі. У результаті навіть потужні технологічні компанії стикаються з труднощами у розробці та виробництві конкурентоспроможних цифрових FPV-рішень, що робить аналогові системи ще більш привабливими для масового використання.

Таким чином, незважаючи на розвиток цифрових систем передачі відео, аналогові рішення залишаються найкращим варіантом для бойових FPV-дронів. Вони забезпечують високу чутливість, значну ефективну дальність, плавне погіршення сигналу без різкого обриву, низьку вартість та високу сумісність між різними пристроями. У бойових умовах стабільність зв'язку та можливість продовження керування дроном навіть при слабкому сигналі є критично важливими, що робить аналогові системи незамінним рішенням для FPV-операторів.

1.2.2 Недоліки аналогових систем передачі відео

Аналогові системи передачі відео, хоч і мають низьку затримку та високу чутливість, стикаються з серйозними обмеженнями, особливо щодо кількості доступних каналів та рівня взаємних завад. Використання широкосмугової модуляції в умовах насиченого ефіру призводить до накладання сигналів та втрати якості відео. Порівняльна ширина каналів та ширина доступних бендів зображена на рисунку 1.4.

Однією з основних проблем аналогових систем є мала кількість доступних каналів, що суттєво обмежує можливості одночасної роботи великої кількості FPV-екіпажів. В більшості випадків аналогові системи працюють у вузькому частотному діапазоні 5.8 ГГц, який є найбільш популярним серед FPV-операторів.

Однак через використання широкосмугової частотної модуляції кожен передавач займає значний діапазон спектра, що призводить до швидкого заповнення доступних каналів навіть при відносно невеликій кількості одночасно працюючих FPV-дронів.

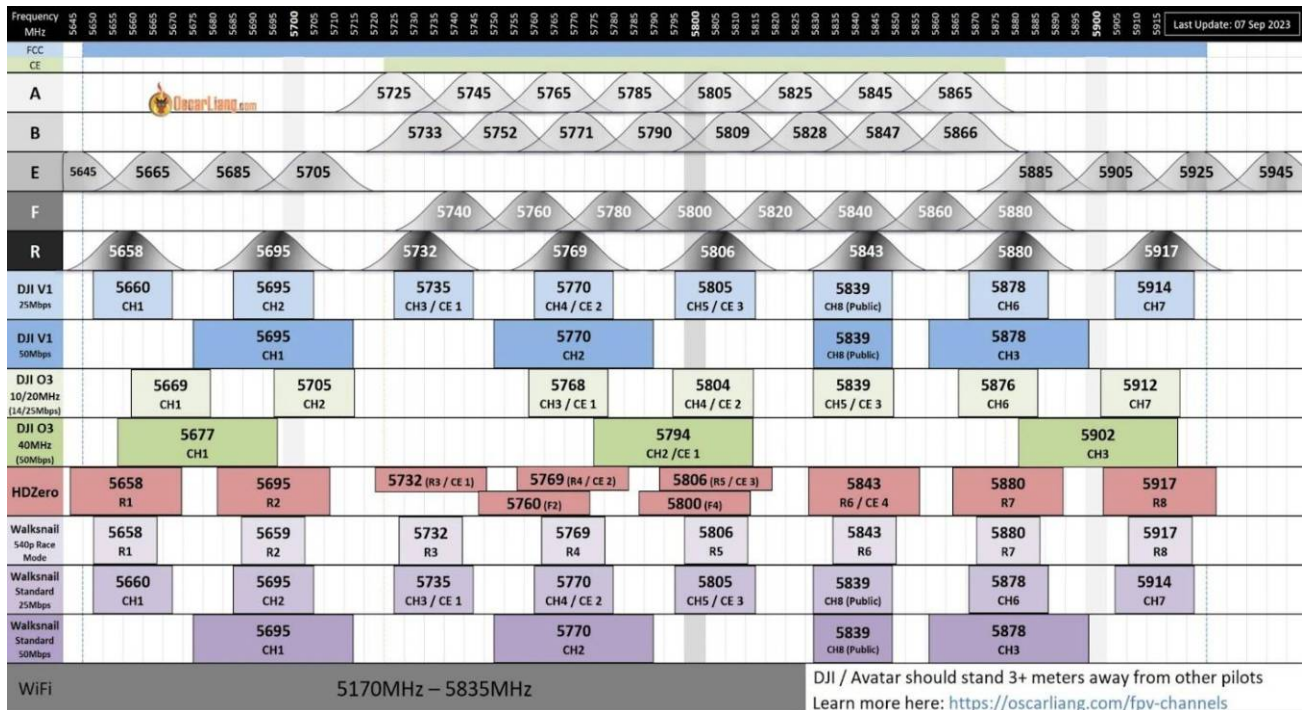


Рисунок 1.4 – Таблиця взаємного місцезнаходження каналів різних бендів та систем в частотному спектрі [16]

Як приклад можна розглянути мікросхему RTC6715, яка використовується в усіх FPV-відеопередавачах діапазону 5.8 ГГц. Вона підтримує набір стандартних каналів у межах діапазону, при цьому ширина одного каналу складає 20-25 МГц. Враховуючи, що загальна ширина доступного спектру становить приблизно 300 МГц (від 5650 МГц до 5950 МГц), теоретично можна розмістити не більше 10 окремих каналів [17]. Однак у реальних умовах ефективна кількість робочих каналів є ще меншою через взаємне перекриття спектра сусідніх каналів та ефект інтерференції. Вигляд сигналу модулятора RTC6715 на спектроаналізаторів зображено на рисунку 1.5.

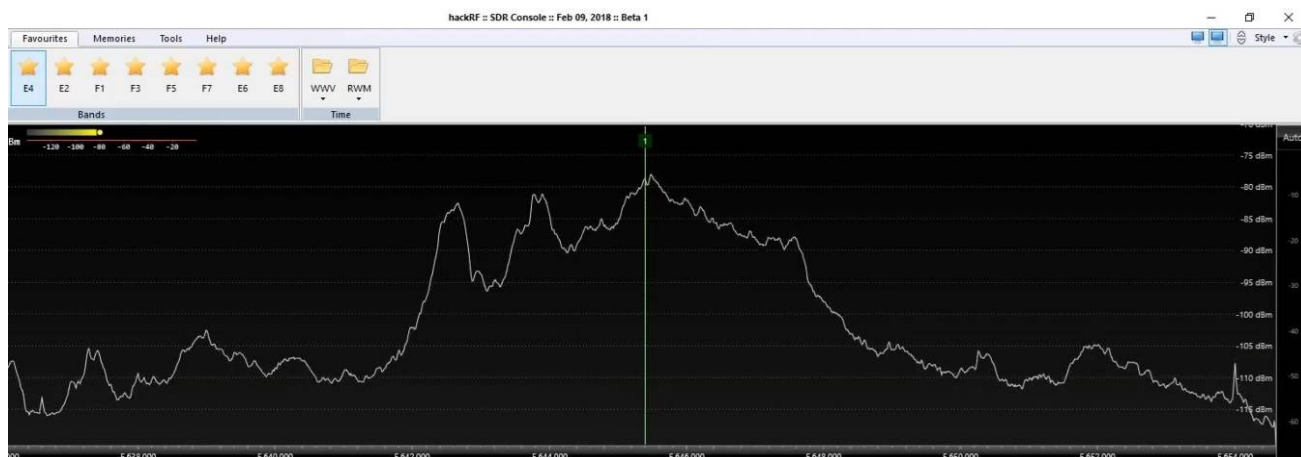


Рисунок 1.5 – Вигляд сигналу RTC6715 знятий за допомогою HackRF у програмі SDR Console [18]

Взаємне перекриття частотних каналів є ще однією серйозною проблемою. Оскільки аналогові системи використовують широкий спектральний ресурс, передача відео з одного FPV-дрона впливає на сусідні канали, створюючи перешкоди. Унаслідок цього при значній кількості FPV-дронів у повітрі ефективний спектр звужується до мінімальних значень. У бойових умовах, коли у вузькому просторі можуть одночасно працювати десятки FPV-дронів, рівень взаємних перешкод зростає настільки, що оператори змушені ділити канали між екіпажами або перемикаються на менш завантажені частоти вручну.

У реальних умовах ефективна кількість стабільно працюючих каналів є вдвічі меншою, ніж їхня теоретична кількість. Якщо використовується 8 стандартних каналів у діапазоні 5.8 ГГц із кроком 20-25 МГц, то через ефект спектрального накладання реально стабільно функціонувати можуть лише 3-4 канали [19]. Це означає, що у бойових умовах одночасно може працювати не більше 3-4 FPV-екіпажів без значного погіршення якості зв'язку.

На відміну від цифрових систем, які мають алгоритми адаптивного вибору частот, корекцію помилок та можливість стиснення відеопотоку для мінімізації завад, аналогові системи позбавлені цих механізмів. Це означає, що у випадку перевантаження ефіру або раптового появи перешкод оператор не може

компенсувати втрату сигналу, окрім як шляхом ручного перемикання на інший канал або наближенням дрона до приймача.

Ще одним серйозним недоліком аналогових відеосистем, який виходить з попереднього, є неможливість ефективного масштабування. Оскільки кількість доступних каналів обмежена, розширення мережі FPV-дронів у межах однієї зони стає надзвичайно складним завданням. Теоретично, можна використовувати інші частотні діапазони, такі як 1.2 ГГц або 2.4 ГГц, проте більшість FPV-обладнання розраховано саме на 5.8 ГГц, і перехід на інші частоти потребує заміни всієї інфраструктури зв'язку.

Останнім значним недоліком аналогових систем є їхня вразливість до глушіння та навмисного створення перешкод. Оскільки аналогові передавачі працюють на фіксованих частотах, вони легко піддаються придушенню шляхом спрямованого сигналу в тому ж діапазоні. У цифрових системах, навпаки, використовуються адаптивні методи частотного стрибка, що дозволяє їм уникати перешкод. У бойових умовах це означає, що аналогові системи значно менш захищені від засобів радіоелектронної боротьби, що може зробити FPV-дрони уразливими для противника.

Аналогові системи передачі відео, хоч і мають низьку затримку та високу чутливість, стикаються з серйозними обмеженнями, особливо щодо кількості доступних каналів та рівня взаємних завад. Використання широкосмугової модуляції в умовах насиченого ефіру призводить до накладання сигналів та втрати якості відео. Це створює серйозні обмеження, особливо у зонах з великою кількістю одночасно працюючих FPV-дронів.

У бойових умовах ця проблема стає особливо критичною, оскільки ефективна кількість FPV-екіпажів, що можуть працювати без значних завад, є вкрай малою. Оператори змушені постійно змінювати канали вручну, намагатися знайти вільні ділянки спектра або миритися зі зниженням якості зображення.

Для вирішення цієї проблеми необхідно впроваджувати системи автоматичного вибору частот, а також розглядати можливість використання

додаткових частотних діапазонів для розвантаження 5.8 ГГц. Однак навіть у такому випадку аналогові системи залишаються вразливими до перевантаження ефіру, що вимагає подальших досліджень і розробки методів оптимізації розподілу частотних ресурсів у FPV-системах.

1.3 Принципи визначення якості відео приймачами аналогового відео

Оцінка якості відеосигналу в аналогових FPV-системах є ключовим аспектом для забезпечення надійного зворотного каналу між дроном і оператором. У цифрових системах є безліч формалізованих метрик якості – таких як PSNR (peak signal-to-noise ratio), SSIM (structural similarity index), затримка в мілісекундах або втрати кадрів. Але аналогова система не має чіткої межі присутності сигналу і часто демонструє поступову деградацію. Тому в аналоговому FPV необхідно використовувати інші підходи, які дозволяють оцінити якість сигналу в реальному часі – або для показу оператору, або для автоматизованого прийняття рішень про перемикання каналів.

1.3.1 За значенням RSSI

Найбільш розповсюджений і простий метод оцінки якості сигналу – це використання параметра RSSI (Received Signal Strength Indicator). RSSI є числовим значенням, яке відображає потужність радіосигналу, що приймається приймачем, і зазвичай використовується як індикатор сили сигналу. Це відносний показник, який не має строгої одиниці виміру і може мати різну шкалу в залежності від типу приймача, протоколу чи реалізації.

У системах зв'язку RSSI застосовується як загальноприйнята метрика для оцінки того, наскільки сильний або слабкий сигнал, що надходить від передавача. Його значення може варіюватися, наприклад, у межах від 0 до 100%, або ж у децибелах, або ж у вигляді нормалізованих рівнів за внутрішньою шкалою пристрою. RSSI не завжди є точним відображенням абсолютної потужності

сигналу в ефірі, але він добре підходить для порівняння між різними каналами або для виявлення зміни умов передачі.

Цей показник може бути отриманий різними способами – як на апаратному рівні (через аналоговий вихід або внутрішній реєстр приймача), так і на програмному (через телеметрію, цифрові інтерфейси, внутрішню статистику радіомодуля). Важливо, що незалежно від способу отримання, RSSI дає змогу побудувати уявлення про спектральну ситуацію навколо, визначити присутність сигналу або перешкод на певних частотах, а отже – є базовим інструментом для аналізу завантаженості ефіру та прийняття рішень щодо частоти передачі.

Цей підхід має кілька важливих переваг. По-перше, він забезпечує швидкий доступ до інформації про стан сигналу, оскільки не вимагає обробки самого відео. Достатньо зчитати параметр з інтерфейсу приймача. По-друге, значення RSSI дає змогу виконувати відносну оцінку якості сигналу, тобто порівнювати рівень сигналу на різних частотах або каналах і на цій основі обирати найкращий варіант.

Однак RSSI не враховує спотворення відеосигналу, які можуть виникати при високому рівні завад, фазовому шумі, або паразитних сигналах. Тобто може бути сильний сигнал, але з поганою картинкою [20]. Цей підхід добре працює в чистому ефірі, але недостатньо точний у зашумленому середовищі.

1.3.2 Візуальний контроль оператором

Найбільш архаїчний, але досі поширений метод – візуальна оцінка якості відео оператором. Людина може швидко розпізнати появу шуму, смуг, пропадань кадрів, збоїв синхронізації або спотворення кольору. Це дозволяє приймати рішення – наприклад, вручну перемикає канал, змінювати положення антен, зменшувати дистанцію польоту.

Коли оператор має достатньо досвіду польотів в умовах поганого зв'язку, такий рівень сигналу, як зображений на рисунку 1.6, може сповістити багато додаткової інформації, як от рівень завади РЕБ та його тип, або мінімальну висоту, де все ще можлива робота і тд.



Рисунок 1.6 – Приклад вигляду аналогового відео безпосередньо перед втратою сигналу [21]

Недолік цього методу в тому, що він потребує постійної уваги оператора і не підходить для автоматизації. У критичних ситуаціях, наприклад, при втручанні засобів РЕБ, цей метод може виявитись запізним – відео вже втрачено, а рішення ще не прийняте.

1.3.3 Аналіз відеосигналу апаратно

Більш просунутий, але складний підхід – це апаратне зчитування відеосигналу на рівні композитного виходу, його цифрування за допомогою високошвидкісного ADC, та подальший аналіз шуму, синхроімпульсів, відсутності кадрів або коливань рівня.

Це також відкриває можливість для створення більш об'єктивної системи оцінювання якості зображення. Завдяки прямому аналізу відеосигналу можна не лише визначити загальний рівень якості, а й виявити конкретні типи спотворень, таких як шуми, збої синхронізації чи втрати кольору. У свою чергу, це дає змогу реалізувати інтелектуальну систему автоматичного контролю, яка не потребує постійного втручання оператора і може самостійно реагувати на погіршення сигналу.

Недолік – потреба у складному обладнанні, високій частоті оцифрування (для композитного відео потрібно 10–20 МГц мінімум), обробці великих об’ємів даних у реальному часі. Такий підхід практично не використовується у портативних FPV-системах через свою складність.

Ще одним варіантом апаратного контролю є виявлення вертикальних і горизонтальних синхроімпульсів у композитному сигналі. Якщо відео стабільне і синхронізоване – можна вважати, що сигнал якісний. При втраті синхроімпульсів або їх спотворенні зображення «пливе», або зникає зовсім.

Для реалізації цього підходу потрібно зчитувати композитний сигнал, фільтрувати і виділяти синхроімпульси. Це дозволяє швидко діагностувати втрату відео. Такий підхід використовують деякі DVR-рекордери, які зупиняють запис при зникненні синхроімпульсів.

Інша варіація підходу – це оцифрувати відео сигнал (через захоплення відео USB-грабером або вбудованим модулем) і проводити обробку кадрів за допомогою алгоритмів комп’ютерного зору. Наприклад, аналізувати рівень шуму на зображенні, відсутність кольору, наявність руху тощо. Це дозволяє точніше оцінити не лише наявність сигналу, а й його корисність – чи видно, що знімає камера, чи все перекрито шумом.

Такий підхід часто застосовується у військових або наукових системах, але дуже рідко в аматорських FPV-рішеннях через потребу у потужному обчислювальному ядрі (Raspberry Pi, Jetson Nano тощо), низьку затримку обробки, додаткову апаратуру. [22]

Загальна картина така: для повноцінного контролю якості відео в аналогових FPV-системах доводиться обирати між простотою і точністю. Найдоступнішим методом є опитування RSSI, який забезпечує базову функціональність і дає змогу реалізувати автоматизовані алгоритми прийняття рішень щодо частоти передачі. Інші методи – або занадто складні, або не підходять для реального часу.

У цій роботі розглядається саме підхід на основі RSSI, як достатньо точний для задач вибору вільного каналу, простий у реалізації, енергоефективний та вже інтегрований у типовий приймач RX5808.

1.4 Висновки

У першому розділі було проведено комплексний аналіз сучасних рішень у сфері бездротового зв'язку та спектрального моніторингу для безпілотних літальних апаратів, з особливим акцентом на передачі відеоінформації у FPV-системах. Розглянуто типову структуру радіотрактів, необхідних для польоту БПЛА: канал управління, телеметричний канал та канал відеопередачі. Проаналізовано технічні вимоги до кожного з них, включно з затримкою, стійкістю до перешкод, дальністю та надійністю передачі.

Найбільшу увагу приділено аналоговим системам передачі відео, які, незважаючи на стрімкий розвиток цифрових технологій, залишаються домінуючим рішенням у військових FPV-дронах завдяки надзвичайно малій затримці, невибагливості до ресурсоємної обробки та стійкості до часткових завад. У ході аналізу підкреслено і їхні суттєві обмеження – вузька кількість доступних каналів, повна відсутність механізмів шифрування, вразливість до навмисного перешкодження та неможливість масштабування в умовах насиченого радіоефіру.

Окремий підрозділ було присвячено огляду методів радіоелектронної боротьби, зокрема підходам до виявлення та активного придушення аналогового відеосигналу. Розглянуто як прості методи широкосмугового глушіння, так і складніші інтегровані системи, як-от «Штора», які реалізують автоматичне сканування спектра та вплив на виявлені відеопотоки. Показано, що аналогові FPV-системи, через відкриту природу сигналу та відсутність захисту, є легкою мішенню для засобів РЕБ, що особливо критично в умовах бойових дій.

У наступному підрозділі було проаналізовано поточний стан технологій спектрального моніторингу. Розглянуто професійні спектроаналізатори, портативні приймачі, SDR-пристрої та системи, вбудовані в протоколи

бездротового зв'язку. Доведено, що переважна більшість сучасних рішень є надмірно складними або дорогими для використання в малогабаритних FPV-комплексах, де критичними є масогабаритні показники, енергоспоживання та вартість.

Окрема увага приділена вивченню підходів до визначення якості прийнятого відеосигналу. Було розглянуто три основні методи: візуальна оцінка оператором, апаратна обробка відео та аналіз рівня RSSI. Показано, що найпростішим і найменш затратним способом є оцінка рівня сигналу RSSI на виході аналогового відеоприймача (наприклад, RX5808). Цей сигнал може бути зчитаний мікроконтролером та використаний для побудови спектральної картини завантаження частотного діапазону.

На основі проведеного аналізу сформульовано висновок про доцільність створення спеціалізованої кіберфізичної системи спектрального моніторингу на базі аналогового відеоприймача. Така система може в режимі реального часу проводити сканування ефіру, оцінювати рівні сигналу на типових каналах, виявляти найбільш вільний частотний діапазон та автоматично ініціювати перемикання відеопередавача FPV-дрона через пульт керування. Це створює технічне та методологічне підґрунтя для подальшої розробки методу прийняття рішень, алгоритмів перемикання та програмної реалізації, що буде докладно розглянуто у наступних розділах.

2 РОЗРОБКА МЕТОДУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ВИБОРУ ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ

2.1 Застосування відео приймача, як сканера радіоефіру

Системи передачі відео в FPV-дронах зазвичай реалізуються в аналоговому вигляді через свою простоту, низьку затримку та доступність. Найбільш поширеним діапазоном є 5.8 ГГц, де використовуються відеопередавачі (VTX) і відеоприймачі (VRX), які підтримують десятки попередньо визначених каналів. На стороні приймача встановлюється модуль, який виконує функцію демодуляції відеосигналу та передає його на пристрій для відображення відео (екран, окуляри або записуючий пристрій DVR). У бюджетних системах найчастіше використовується модуль RX5808, який в основі має мікросхему RTC6715. Ця мікросхема забезпечує прийом сигналу на певній частоті та дозволяє перемикати частоти через SPI-інтерфейс або через паралельну шину.

Типовий VRX діапазону 5.8 на ринку складається з одного або двох модулів RX5808 та мікроконтролера, який забезпечує інші додаткові функції VRX, як от керування за допомогою клавіш та екрану, або визначенням найкращого приймача на теперішній момент та комутацією його відео на вихід.

У багатьох випадках, навіть за наявності двох приймачів, VRX працює у режимі автоматичного вибору кращого сигналу та не дозволяє втручатися в процес комутації зовнішнім алгоритмам. Це створює обмеження при спробі використати вбудовані VRX-модулі для спектрального сканування, оскільки вони вже задіяні для безперервного приймання відео. Приклад VRX діапазону 5.8 можна побачити на рисунку 2.1. і АКК Diversity VRX якраз має два модуля RX5808. На рисунку добре видно один з них, розташований посередині задньої плати. З обох модулів виходить роз'єм для підключення антени.

На нижній платі цього VRX знаходять контролер та екран з кнопками. Контролера якраз виконує функцію Diversity – вибору найкращого відеосигналу з

двох приймачів на теперішній момент та комутацією його відеосигналу на вихід з VRX.

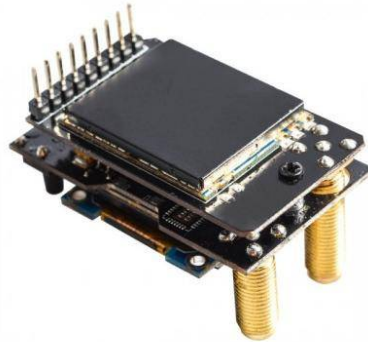


Рисунок 2.1 – Модуль RX5808 у складі АКК Diversity VRX [23]

Внутрішня будова приймача RX5808 продемонстрована на рисунку 2.2. Функціонально RX5808 побудований на базі мікросхеми RTC6715, яка виконує основні операції приймання, перетворення і демодуляції радіосигналу. Вхідний сигнал із діапазону 5.8 ГГц подається на антену та проходить через вхідний фільтр, зазвичай реалізований у вигляді SAW-фільтра. Цей фільтр обмежує смугу пропускання і відсікає сторонні сигнали поза робочим діапазоном. Після цього сигнал підсилюється низькошумовим підсилювачем, інтегрованим у мікросхему.

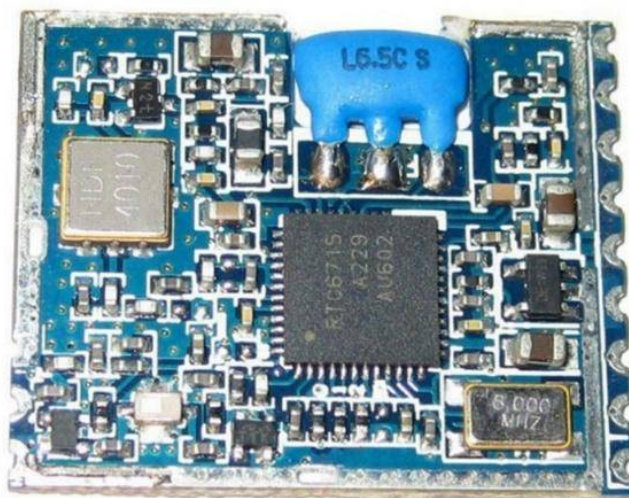


Рисунок 2.2 – Внутрішня будова модуля RX5808 [24]

Оснoву роботи RTC6715 становить синтезатор частоти PLL, що дозволяє налаштувати приймач на будь-яку з підтримуваних частот у межах від 5645 до 5945 МГц. Частота встановлюється через SPI-інтерфейс шляхом передачі конфігураційного слова розміром 24 біти, з яких три старші біти визначають адресу регістру, а решта 21 біт – значення параметра. Зазвичай для вибору частоти використовується таблиця відповідності між каналами (наприклад, A1–A8) і бітовими комбінаціями, яку можна знайти в документації чи відкритих проектах.

Прийнятий сигнал з частоти, обраної синтезатором, надходить до змішувача, де виконується його перетворення у базову смугу частот. Далі відбувається демодуляція – відновлення композитного відеосигналу (CVBS), який виводиться на відповідний відеовихід модуля RX5808. Цей сигнал є стандартним аналоговим відеопотоком, що може бути поданий на монітор, відеоокуляри або пристрій запису.

На відміну від цифрових відеосистем, де якість зображення легко оцінюється за такими параметрами як затримка, роздільна здатність чи наявність артефактів компресії, в аналогових системах якість визначається візуально за такими ознаками як наявність шуму, смуг, відблисків, пульсацій та інших викривлень, які виникають при зниженні рівня сигналу або в присутності перешкод. Проте для автоматизованого аналізу якості цього недостатньо, оскільки візуальні методи потребують складної обробки зображення і додаткових цифрових ресурсів. Тому в практиці застосовується опосередкований підхід: оцінка рівня сигналу на вході відеоприймача. Саме цю функцію виконує аналоговий вихід RSSI (Received Signal Strength Indicator), який присутній у багатьох аналогових приймачах, зокрема в RTC6715 [25].

Крім формування відео, мікросхема RTC6715 також забезпечує вихід параметра RSSI (Received Signal Strength Indicator). Це внутрішнє вимірювання сили прийнятого сигналу, що виводиться у вигляді аналогового сигналу напруги, пропорційної потужності вхідного радіосигналу. Цей вихід часто позначається як DAC RSSI OUT. Значення RSSI може бути використано для оцінки рівня сигналу

на кожному з частотних каналів, що відкриває можливість використання RX5808 як спектрального сканера. Важливо підкреслити, що RSSI не є обов'язково аналоговим – його можна отримувати й іншим способом, наприклад, у вигляді цифрового значення через телеметрію або внутрішній регістр, однак у випадку RX5808 саме аналоговий вихід є найбільш доступним і використовуваним.

Для використання цієї функції необхідно виконати наступні дії. По-перше, після налаштування частоти приймача (через SPI) потрібно зробити невелику паузу – не менше 20–30 мс – щоб PLL генератор, а RSSI-сигнал вийшов на стабільний рівень [26]. По-друге, ADC мікроконтролера повинен бути сконфігурований для зчитування напруги у межах 0–3.3 В або 0–1.1 В залежно від роздільної здатності і джерела опорної напруги. Отримане значення можна перевести у шкалу 0–100% або відносно калібрувати, якщо провести вимірювання в контрольованих умовах (наприклад, підвести сигнал з відомим рівнем з генератора). Щоб зменшити похибки і флуктуації, бажано зчитувати кілька значень RSSI підряд і усереднювати їх. Також можливе використання ковзного середнього, медіанного фільтру або інших методів фільтрації. Це дозволяє зменшити вплив перешкод, випадкових сплесків чи раптових змін у каналі.

У контексті побудови сканера радіоефіру, принцип дії наступний: мікроконтролер або зовнішній скрипт по черзі перемикає приймач на кожен з каналів, затримується, зчитує RSSI, зберігає значення, переходить до наступного каналу. В результаті формується масив значень, що відображає спектральну активність у певний момент часу. Це дозволяє отримати "знімок" стану ефіру і прийняти рішення – наприклад, який канал є найбільш вільним або навпаки – де спостерігається активність супротивника чи сторонніх джерел.

Перевага цього підходу полягає в тому, що для реалізації не потрібно окремого спектроаналізатора чи складної радіоапаратури. Сканування проводиться самим відеоприймачем, який вже наявний у складі системи. Це здешевлює розробку і спрощує інтеграцію в типову наземну станцію FPV-дрону. Недоліком є

обмежена точність та обмежений діапазон (тільки 5.8 ГГц), але для задач вибору оптимального каналу в рамках FPV цього цілком достатньо.

Загалом, модуль RX5808 є компактним, енергоефективним та зручним у використанні для задач моніторингу частотного спектру. Його функціональні можливості, зокрема підтримка SPI-керування та наявність RSSI, роблять його придатним для реалізації недорогих, але ефективних сканерів радіоефіру для FPV-додатків.

2.2 Інтеграція сканера у типову систему зв'язку FPV

Для розуміння яким чином і в яку частину системи можна інтегрувати додатковий пристрій-сканер спершу потрібно розібрати типову архітектуру зв'язку.

Сучасний спосіб комунікації з FPV дроном не надто відрізняється від початкового спортивного підходу. В уже існуючі і працюючі компоненти вносяться найнеобхідніші зміни в порядку пріоритетів.

2.2.1 Типова архітектура зв'язку

У типовій FPV-системі зв'язку дрона реалізується кілька паралельних каналів обміну даними, кожен з яких виконує окрему функцію: управління дроном, передача відео, зворотній канал телеметрії, а також допоміжні сигнали (навігація, управління відеопередавачем, аварійне вимкнення тощо).

Всі ці канали побудовані на основі конкретних протоколів і фізичних інтерфейсів, які взаємодіють як на борту дрона, так і з наземною станцією.

На рисунку 2.3 показані обов'язкові компоненти зв'язку та способи зв'язку між ними.

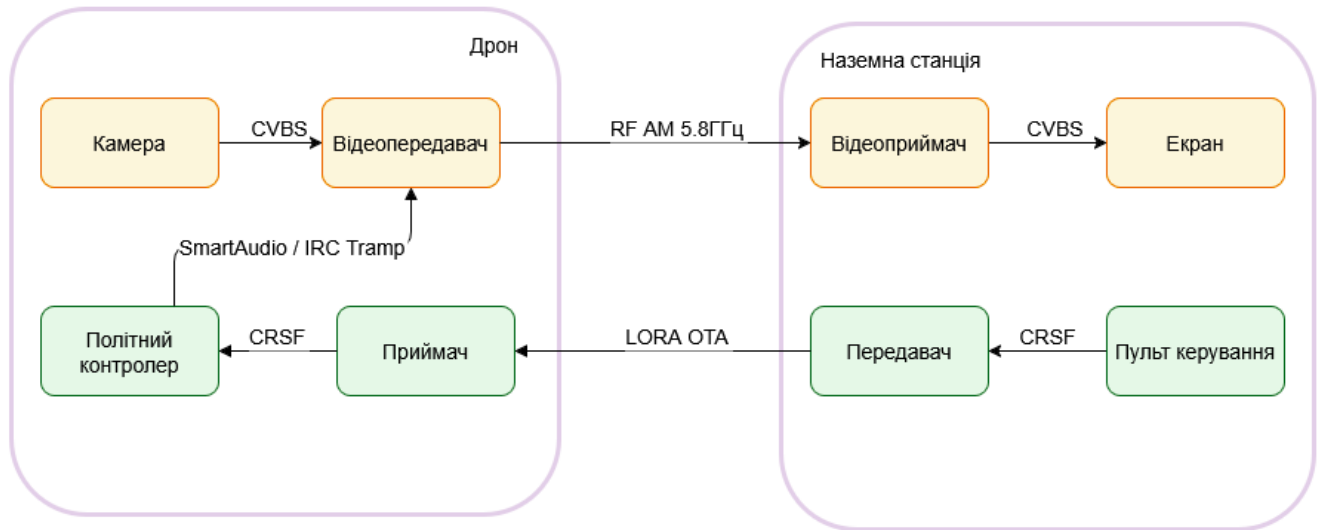


Рисунок 2.3 – Найважливіші елементи системи зв'язку FPV дрона

Схема, представлена на зображенні, ілюструє типову архітектуру системи зв'язку FPV-дрона, в яку може бути інтегровано сканер радіоефіру як окремий інтелектуальний модуль. Така схема розділена на дві частини – бортову частину дрона та наземну станцію керування. Вона демонструє, як побудована взаємодія між основними компонентами передачі відео, каналу керування та зворотного зв'язку, і яким чином між ними реалізовано обмін даними на базі сучасних протоколів.

В схемі упущений канал телеметрії, що згадувався раніше. Його немає серед обов'язкових компонентів, бо його функцію може успішно виконувати система OSD, яка накладає найважливішу інформацію зворотного зв'язку на відео. Тому на практиці канал телеметрії хоч і є бажаним, але часто не потрібен для виконання бойової задачі.

У центрі бортової частини дрона знаходиться польотний контролер, який отримує керуючі команди через приймач по протоколу CRSF. Цей протокол, який підтримує низьку затримку та високу частоту оновлення, забезпечує стабільний зв'язок з наземною станцією, де встановлено передавач. Зі свого боку, передавач приймає сигнали з пульта керування та пересилає їх у напрямку дрона через

технологію LoRa. Таким чином формується двосторонній цифровий канал, по якому не лише передаються керуючі команди, а й повертається телеметрія з борта.

Паралельно з каналом керування функціонує окремий тракт відеозв'язку. Камера, встановлена на дроні, генерує аналоговий композитний відеосигнал формату CVBS, який передається на відеопередавач. Останній транслює цей сигнал у радіоефір на частоті 5.8 ГГц, зазвичай з використанням амплітудної модуляції. На стороні наземної станції сигнал приймається відеоприймачем і передається далі на екран для візуального спостереження оператором. Це повністю незалежний канал без зворотного зв'язку, що робить його вразливим до перешкод, втрати якості або зовнішнього втручання.

Водночас відеопередавач може змінювати свій робочий канал або потужність за запитом з польотного контролера. Для цього між ними реалізовано однопровідне з'єднання за допомогою протоколів SmartAudio або IRC Tramp [27]. Це дозволяє контролеру програмно конфігурувати VTX під час або до польоту. Команди на зміну параметрів відеопередачі можуть надходити від пульта – через той самий CRSF-канал, яким передаються основні команди керування.

Цей контекст є критично важливим для визначення того, де і як інтегрувати сканер частотного діапазону, не порушуючи цілісності та функціональності існуючої системи.

2.2.2 Модифікація архітектури для інтеграції сканера

У вищезазначеній архітектурі з'являється можливість інтегрувати сканер радіоефіру, який також є частиною наземної станції. Його функція полягає у вимірюванні рівня сигналу (RSSI) на кожному з відеоканалів. Він зобов'язаний працювати автономно, адже наявний VRX повністю зайнятий прийомом відеосигналу, незважаючи на справжню кількість VRX модулів у ньому.

Для того, щоб система на основі автономного сканера була не лише джерелом даних, а й активно впливала на вибір частоти відеопередачі, виникає необхідність у реалізації графічного інтерфейсу користувача (GUI) та програмної платформи,

яка б поєднувала в собі обробку отриманих значень, алгоритмічне прийняття рішення та формування команди на перемикання. Цю роль логічно покласти на пульт керування, який і так є основною точкою взаємодії оператора з системою.

Пульти, що працюють під керуванням EdgeTX, мають потужний механізм розширення функцій за допомогою LUA-скриптів, які дозволяють реалізувати кастомну логіку аналізу, побудову графіки на дисплеї та доступ до каналів керування. Це відкриває можливість створити модуль сканування частот у вигляді вбудованої програми на пульті, яка зчитує інформацію зі сканера, будує в реальному часі спектр зайнятості, дає оператору можливість візуально оцінити ефір, і у ручному або автоматичному режимі – обирає наступний канал. [28]

Як тільки вибір частоти буде зроблено, необхідно передати команду на перемикання до дрона. Цей етап потребує формування керуючого сигналу, який має пройти повний цикл: від скрипта на пульті – через передавач – до приймача на борту дрона – і далі до польотного контролера, який фізично реалізує перемикання відеопередавача. У межах цієї архітектури для передачі сигналу використовуються вже наявні канали, зокрема – цифрова лінія зв'язку, що працює за протоколом CRSF, реалізованим у системі радіозв'язку ExpressLRS.

CRSF дозволяє передавати не лише стандартні керуючі сигнали (газ, крен, тангаж тощо), а й кастомні дані – значення з LUA-скриптів, змінні телеметрії, та навіть MSP-повідомлення [29]. Це дає змогу без додаткового каналу зв'язку вбудувати інформацію про вибраний відеоканал у загальний потік, який іде від пульта до приймача.

Скрипт, що виконується на пульті, має формувати команду у вигляді MSP-повідомлення або значення у спеціальному каналі. Цей сигнал приймається приймачем на борту дрона та передається політному контролеру по UART-інтерфейсу. Польотний контролер, своєю чергою, інтерпретує значення (наприклад, номер каналу), і через один із VTX-протоколів (SmartAudio або IRC Tramp) надсилає команду до відеопередавача.

З погляду архітектури, ця система зберігає повну сумісність з типовим FPV-дроном [29]. Всі інтерфейси: CRSF, SmartAudio, CVBS – залишаються стандартними, і жоден з базових модулів не потребує заміни. Єдиною умовою інтеграції є наявність відкритого пульта керування з підтримкою LUA та можливість доступу до одного або кількох вхідних каналів (наприклад, аналогового PPM або цифрового UART). Такий підхід дозволяє реалізувати адаптивне перемикання відеоканалів без втручання в бортову частину, що робить систему не лише ефективною, а й практичною для реального використання.

На рисунку 2.5 зображений сканер відеосигналу жовтим. Враховуючи апаратні особливості більшості передавачів, а також потребу в простому і надійному аналоговому інтерфейсі, оптимальним рішенням можна вважати використання PPM (Pulse Position Modulation).

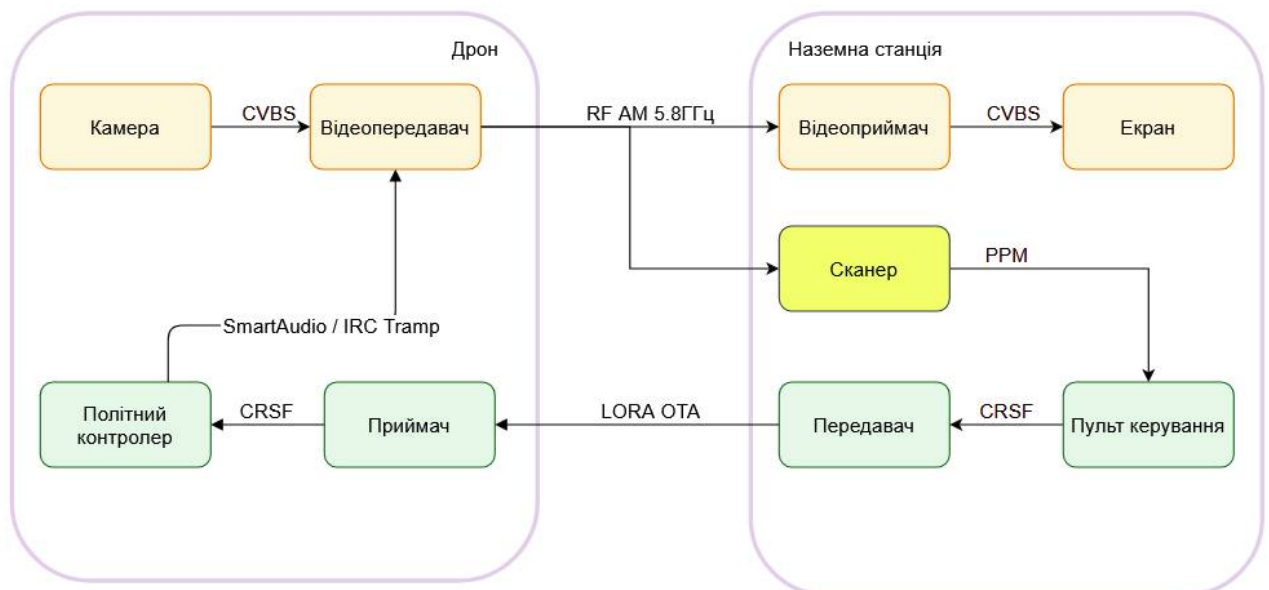


Рисунок 2.5 – Модифікована схема зв'язку

Таким чином, сканер визначено як окремий наземний пристрій, який виконує періодичне сканування ефіру, аналізує спектр частот та формує набір даних, який необхідно передати до пульта управління.

Для реалізації такої передачі доведеться внести низку модифікацій до системи, зокрема на рівні інтерфейсів.

Першим етапом стане реалізація зв'язку між сканером і пультом. Було вирішено використати PPM-сигнал – послідовність імпульсів, кожен з яких кодує певний рівень RSSI для окремого частотного каналу. Скрипт на пульті декодує ці сигнали, створюючи карту частотної завантаженості.

Цей формат передбачає передачу послідовності імпульсів різної тривалості, де кожен імпульс відповідає певному каналу, а його довжина – значенню в межах, наприклад, 1000–2000 мкс [30]. Такий формат передачі даних називається PWM та історично використовується в моделювання, а саме для керування аматорськими сервоприводами.

На рисунку 2.6 зображено часову діаграму згортання кількох PWM сигналів у один PPM сигнал. PPM став наслідником PWM, в системах, де потрібно передавати кілька каналів керування по одному сигнальному проволу.

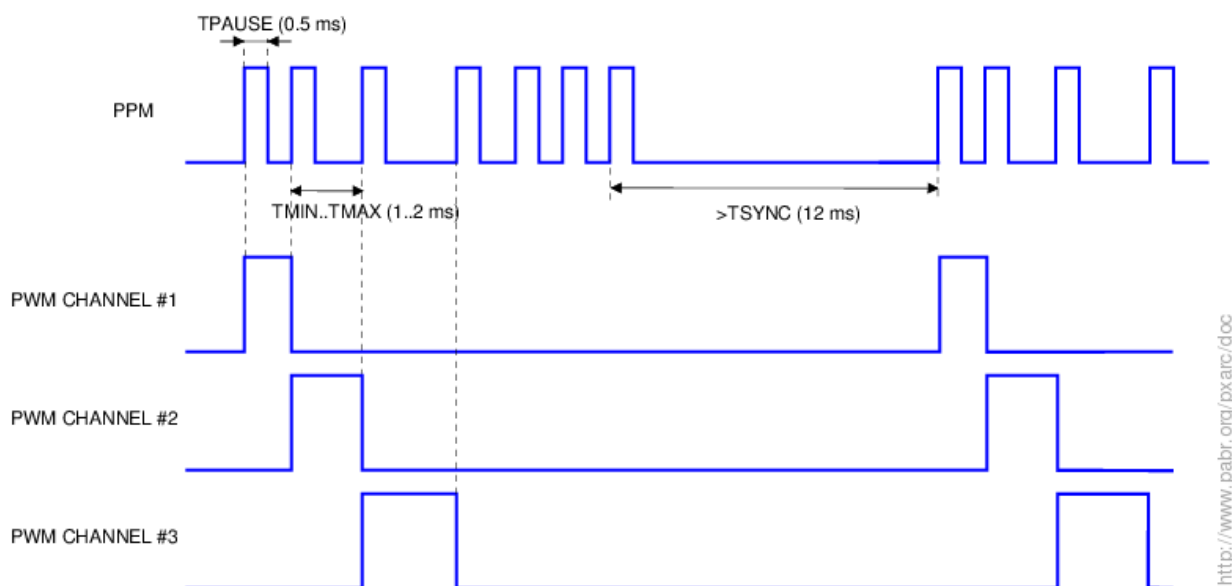


Рисунок 2.6 – Відношення PPM сигналу до PWM аналогу [31]

Використання PPM дозволяє сканеру передавати значення рівня сигналу (RSSI) на кожному каналі спектру у вигляді набору каналів PPM, де кожен канал відповідає окремій частоті. Такий сигнал легко підключається до одного з входів

пульта керування, який працює під управлінням відкритої прошивки EdgeTX, і може бути зчитаний засобами LUA-скриптів.

Другий крок – це використання CRSF у межах ELRS для передачі сигналу з пульта на дрон. Цей протокол дозволяє передавати не лише основні канали керування, а й параметри VTX, що робить його ідеальним для цієї задачі. CRSF підтримує MSP-over-CRSF – режим, у якому скрипт формує MSP-команду, яка доставляється політному контролеру безпосередньо через приймач. Саме цей механізм потрібно використати для передачі нового каналу роботи для VTX. Ця система працює у прошивці ELRS, якщо використовувати штатні методи зміни каналів, а саме – спеціальний скрипт для переключення каналів або безпосередньо меню на екрані передавача.

Ці дані потрапляють на польотний контролер, який працює під керуванням Betaflight. У Betaflight є підтримка SmartAudio або IRC Tramp [32] – це протоколи, які дозволяють змінювати частоту відеопередавача програмно, через UART. Таким чином, польотний контролер зчитує CRSF-канал, перетворює отримане значення у відповідну команду зміни частоти VTX, і передає її через відповідний порт.

Цей механізм формує повністю замикаючу петлю: сканер аналізує спектр → пульт отримує інформацію і визначає найкращу частоту → ця інформація передається дрону → дрон змінює частоту відеопередавача.

Третій компонент – це відповідне налаштування прошивки польотного контролера для приймання таких команд. У Betaflight реалізовано підтримку MSP VTX Control – тобто систему, де відеопередавач змінює частоту на основі параметра, який надходить через MSP. Ця система гарно працює з стандартними налаштуваннями, але обмежена для роботи в стані Disarmed. Цей стан відповідає заблокованим моторам, отже переключення в польоті при стандартній прошивці – неможливі.

У результаті, навіть у межах типових протоколів та інтерфейсів (PPM, CRSF, MSP), вдасться реалізувати повноцінний цикл інтеграції: вимірювання спектра, вибір каналу, передача команди, перемикання частоти на дроні. Такий підхід не

потребує окремого радіозв'язку, не втручається в канал відео і повністю зберігає сумісність з існуючими системами FPV.

Таким чином, шляхом послідовного аналізу, випробувань і технічного моделювання була розроблена система, яка дозволяє інтегрувати сканер радіоефіру у сучасний FPV-комплекс з мінімальними затратами, зберігаючи при цьому високу ефективність і адаптивність до умов роботи.

2.3 Методи прийняття рішень вибору частотного діапазон

Після інтеграції сканера радіоефіру як окремого пристрою, здатного вимірювати рівень сигналу на кожному частотному каналі, постає ключова задача – визначити, як саме має відбуватись вибір оптимального каналу для передачі відео. У запропонованій архітектурі рішення приймається не на самому сканері, а на рівні пульта керування, який отримує набір RSSI-значень через інтерфейс PPM та обробляє їх за допомогою LUA-скрипта. Такий підхід дозволяє легко змінювати логіку прийняття рішень без перепрошивки мікроконтролера або втручання в сканер, обмежуючись лише зміною скрипта на пульті.

Залежно від цілей польоту, умов середовища, бажаного ступеня автоматизації та довіри до алгоритмів, можливі різні стратегії вибору частотного каналу. У рамках цієї роботи було запропоновано три основні методи прийняття рішень, кожен з яких має свої особливості, переваги та недоліки.

2.3.1 Прийняття рішення за максимальним сигналом

Найочевидніший та інтуїтивно зрозумілий метод – це вибір частоти, на якій зафіксовано найнижчий рівень сигналу, тобто мінімальне значення RSSI, що у нашому випадку трактується як найменша спектральна завантаженість або найменша кількість завад. Оскільки RSSI у контексті сканера базується на виході аналогового відеоприймача (наприклад, RX5808), його високі значення

відповідають присутності потужного сигналу на відповідній частоті – незалежно від того, корисний це сигнал чи перешкода.

Для реалізації цього підходу LUA-скрипт на пульті повинен отримувати всі доступні канали та проводити просте порівняння з максимальним та вибраним каналами, як показано на рисунку 2.7.

Потрібно шукати максимальний рівень RSSI, бо у відеоприймачах на базі RTC6715 RSSI сигнал зростає разом із рівнем шуму або наявного сигналу на частоті. Тобто, високе значення RSSI означає, що канал зайнятий – там або вже є відеопередача, або присутня завада. Натомість, низький RSSI свідчить про відсутність активності на частоті, тому такий канал вважається вільним.

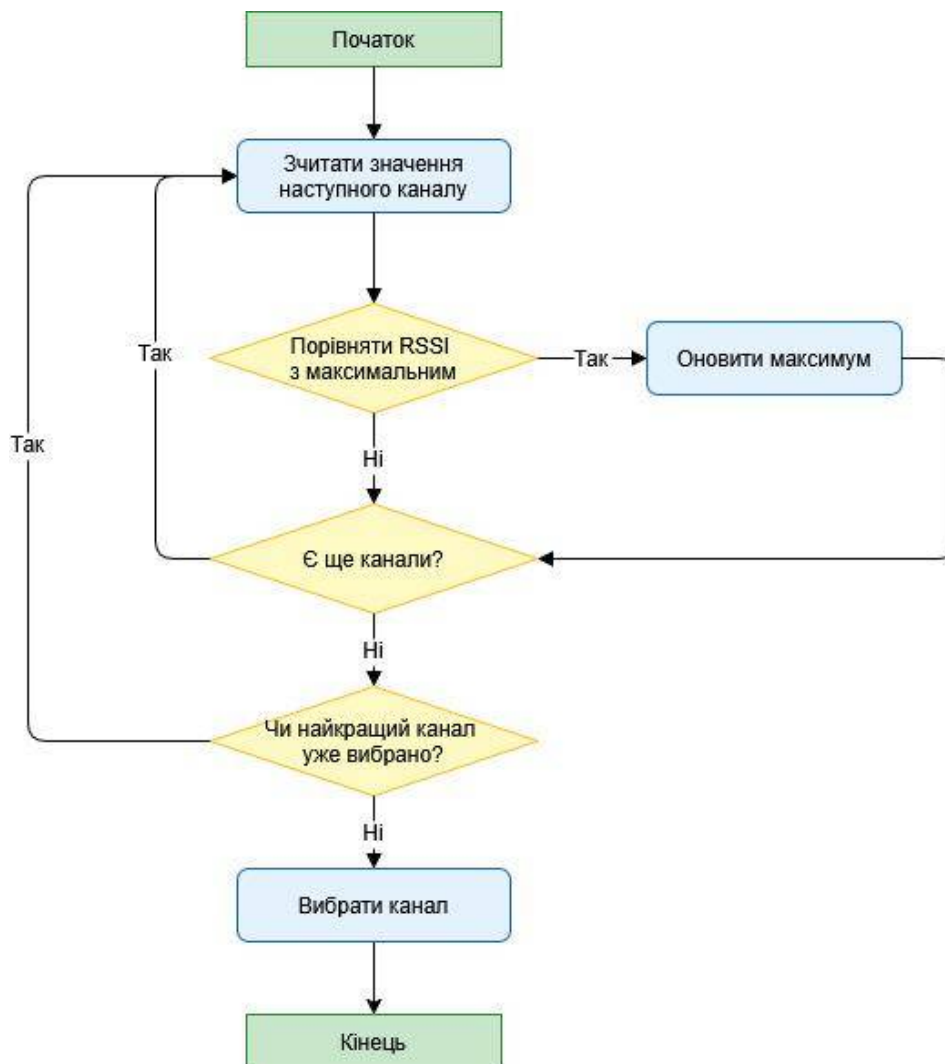


Рисунок 2.7 – Блок схема алгоритму прийняття рішення за максимальним сигналом

Цей підхід є найпростішим у реалізації і добре працює у відкритому ефірі, де завади розподілені випадково або є один-два активних джерела. [33] Він дозволяє швидко обрати оптимальний канал без участі оператора і з мінімальною затримкою. Водночас він має і недоліки: у деяких випадках рівень RSSI може бути знижений через антену з вузькою направленістю або інші неочевидні фактори, що призводить до помилкового вибору. Також при наявності активного протидіючого сигналу (РЕБ), система може регулярно перемикатись, не знаходячи стабільного варіанту.

2.3.2 Прийняття рішення за псевдовипадковим принципом

Альтернативним методом, який дозволяє уникнути пасток, пов'язаних з надмірною довірою до RSSI, є псевдовипадковий вибір частотного каналу. У цьому випадку система не намагається знайти найкращий варіант у класичному сенсі, а обирає канал випадково з-поміж тих, що мають прийнятний рівень шуму – тобто RSSI вище певного порогу. Наприклад, скрипт формує список усіх каналів, де RSSI вище 30% (умовна шкала), і вибирає один із них випадковим чином.

Цей підхід особливо корисний у ситуаціях, коли в ефірі присутня періодична або спрямована активність РЕБ, яка намагається передбачити частоту роботи системи [34]. У таких умовах випадкове перемикання ускладнює задачу придушення сигналу для противника, а також зменшує ймовірність блокування відразу всіх можливих каналів. Крім того, псевдовипадковий вибір дозволяє уникати «залипання» на одному й тому самому каналі, що може бути вразливим до цілеспрямованого подавлення.

Також цей підхід дозволить впевненіше працювати кільком екіпажам на одній ділянці фронту з запропонованою системою сканера. Так як спрямованість антени приймача може зіграти негативну роль у взаємодії з сусідніми екіпажами. Через вузький кут зору, сканер добре бачить лише РЕБ, що працює безпосередньо по ньому та сигнал дрону. Отже для сусідніх екіпажів найбажаніший канал може виявитись однаковим. Саме в цьому випадку корисно добавляти фактор

випадковості у вибір найоптимальнішого каналу роботи, для мінімізації шансу завадити суміжному екіпажу.

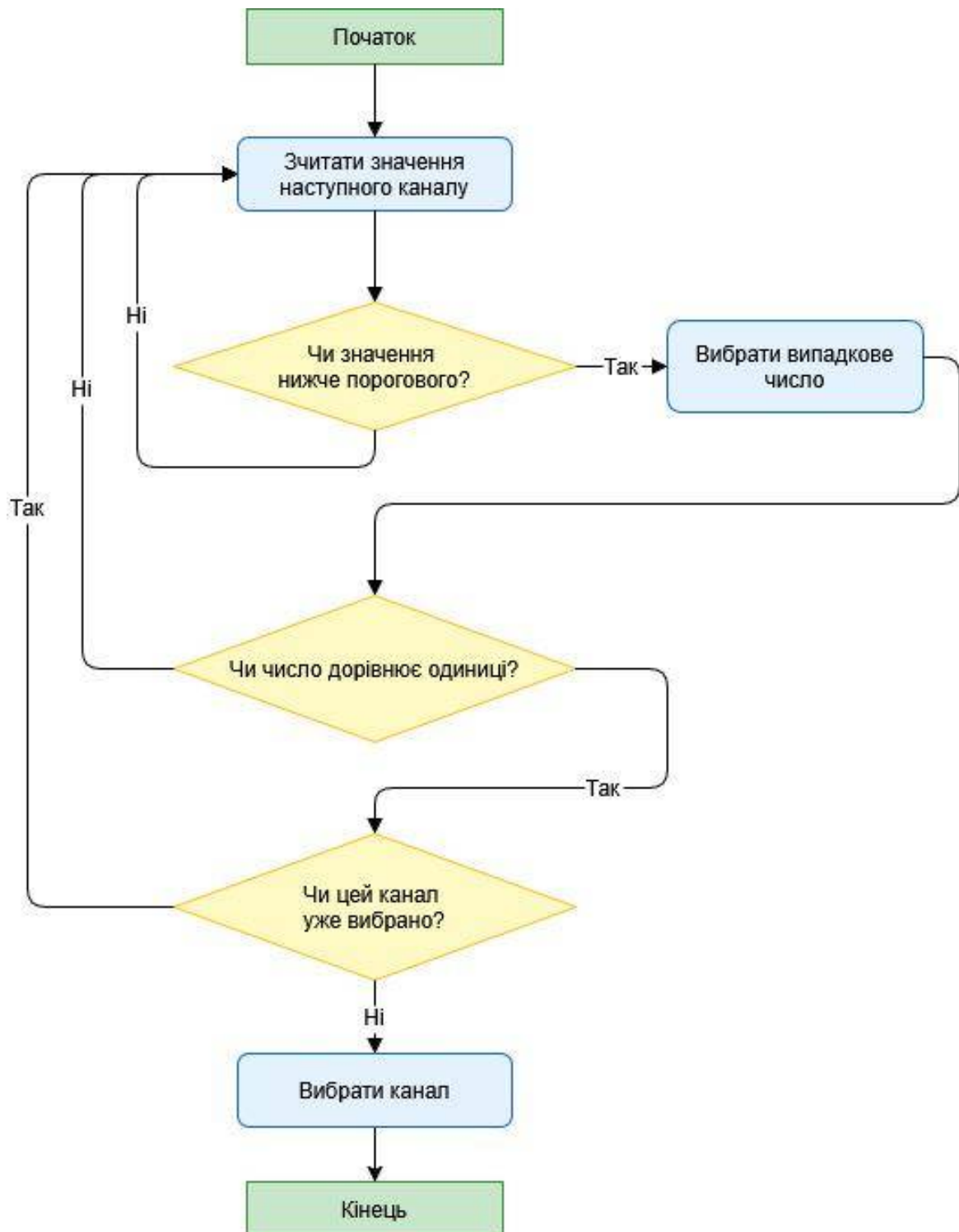


Рисунок 2.7 – Блок схема алгоритму прийняття рішення за псевдовипадковим принципом

З технічної точки зору, LUA-скрипт може реалізувати генерацію випадкового числа (з використанням ентропії з годинника або послідовного зсуву), фільтрує список каналів і вибирає один. Передача цього каналу здійснюється так само, як і в попередньому випадку – через ELRS.

Цей метод демонструє хорошу стійкість у нестабільному ефірі, однак не гарантує, що буде обраний канал з найкращою якістю, що може призвести до короткочасного погіршення відео.

Втім, у системах, де перемикання каналів можливе без надмірної паузи, це допустимо.

2.3.3 Прийняття рішення оператором

Незважаючи на розвиток автоматичних методів, в багатьох випадках найнадійнішим залишається втручання людини. У запропонованій системі передбачено можливість ручного вибору каналу оператором на основі візуалізації спектру на екрані пульта. LUA-скрипт у такому випадку працює як засіб аналізу та відображення даних, але фінальне рішення приймає пілот.

На екрані пульта виводиться гістограма, де кожна колонка відповідає певному частотному каналу, а її висота – рівню RSSI. Оператор бачить, які канали є «зайнятими» і які – потенційно вільними.

На основі досвіду, поточної ситуації в польоті або інформації з інших каналів (наприклад, телеметрії), він вибирає оптимальний варіант. Обраний канал підтверджується через інтерфейс скрипта, після чого передається через ELRS на дрон.

Цей метод є найгнучкішим, дозволяє враховувати неочевидні обставини (наприклад, затримки у відео, знання про позицію противника, прогноз завад) та поєднується з іншими – автоматичний вибір може працювати за замовчуванням, а оператор має можливість втрутитись за потреби.

2.4 Висновки

У другому розділі було розроблено метод прийняття рішень щодо вибору частотного діапазону для системи передачі відеосигналу FPV-дрона.

У подальшому було обґрунтовано можливість використання стандартного модуля відеоприймача, зокрема – RX5808 на основі RTC6715, як сенсора спектральної активності. Такий підхід дозволив відмовитися від складного обладнання, застосувавши доступну мікросхему для сканування частот і формування профілю завантаження ефіру у вигляді серії аналогових вимірювань.

Розроблена система інтеграції сканера у наземну станцію керування побудована на використанні PPM-інтерфейсу для передачі даних до пульта, а також LUA-скрипта в прошивці EdgeTX для аналізу, візуалізації та прийняття рішень. Команди перемикання каналу відеопередавача передаються до дрона за допомогою протоколу CRSF у складі системи ExpressLRS, після чого виконуються польотним контролером через стандартні інтерфейси керування VTX (SmartAudio або IRC Tramp).

Було запропоновано та реалізовано три методи прийняття рішень щодо вибору частоти:

- за найменшим рівнем сигналу (як найвірогіднішим індикатором вільного каналу);
- за псевдовипадковим принципом (для підвищення живучості системи в умовах впливу РЕБ);
- за рішенням оператора (для складних, експериментальних або критичних сценаріїв).

Кожен з методів має свої особливості та може застосовуватись у відповідних умовах, що забезпечує гнучкість системи в реальному застосуванні. Загалом, запропонований метод прийняття рішень є придатним для впровадження в FPV-системах, дозволяє адаптивно реагувати на зміни в ефірі та підвищує надійність передачі відеосигналу в умовах перешкод або навмисного впливу.

3 ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ СКАНУВАННЯ ТА КЕРУВАННЯ ЧАСТОТАМИ

3.1 Реалізація методів прийняття рішень на базі прошивки EdgeTX

Сучасні пульти керування для дистанційного управління безпілотними літальними апаратами зазнали суттєвих змін у порівнянні з ранніми поколіннями апаратури. Їх розвиток став можливим завдяки впровадженню відкритих апаратно-програмних платформ, високопродуктивних мікроконтролерів, а також зростанню вимог з боку спільноти FPV-ентузіастів, розробників автономних систем та професійних операторів. Серед сучасних пультів особливу популярність здобули моделі компанії Radiomaster, зокрема TX12, TX16S, Voxxer [35], також вироби Jumper та FrSky з відкритим доступом до прошивки. Вони поєднують у собі компактність, модульність, підтримку новітніх радіопротоколів та гнучкість у налаштуванні.

Модель Radiomaster Pocket зображена на рисунку 3.1, яка була обрана для реалізації системи в даній роботі, є компактним рішенням у сегменті бюджетного, але функціонально повного апаратного забезпечення. Вона підтримує всі сучасні стандарти зв'язку, зокрема ExpressLRS (ELRS), що дозволяє здійснювати надійний контроль з великої відстані. При цьому пульт має кольоровий дисплей з високою яскравістю, потужний мікроконтролер STM32 з достатнім обсягом оперативної пам'яті, а головне – працює під керуванням прошивки EdgeTX, яка відкриває перед користувачем широкі можливості зі створення власних сценаріїв керування та автоматизації.

EdgeTX є модернізованим відгалуженням прошивки OpenTX, яка багато років була стандартом де-факто у сфері апаратури керування моделями. У свою чергу, EdgeTX привніс низку покращень, зокрема перехід до сучасного графічного інтерфейсу з сенсорним управлінням, оптимізацію продуктивності, а також удосконалення підтримки скриптів, написаних мовою програмування Lua. Саме можливість використання Lua є ключовою для побудови розумної логіки

прийняття рішень безпосередньо на пульті керування, без необхідності у сторонніх обчислювальних пристроях.



Рисунок 3.1 – Пульти керування Radiomaster Pocket [36]

Lua-скрипти в EdgeTX поділяються на кілька типів залежно від їх призначення та контексту виконання. Зокрема, існують так звані *telemetry scripts*, які дозволяють динамічно обробляти телеметричні дані з дрона та відображати їх у зручному форматі, а також *background scripts*, які працюють постійно у фоні, не порушуючи основного циклу керування, і можуть бути використані для реалізації складних алгоритмів аналізу сигналів, прийняття рішень, перемикання каналів тощо.

На базі документації на EdgeTX був обраний найоптимальніший спосіб використання скрипта – *telemetry scripts* [37]. Причиною вибору стало те, що такі скрипти, при активації, дозволяють працювати у фоновому режимі. На відміну від інших можливих застосувань, скрипт сканера має бути активним завжди при роботі пульта керування.

Необхідність переключення каналів керування має випадковий характер, тому система зобов'язана надати можливість переключення оператору в будь який момент.

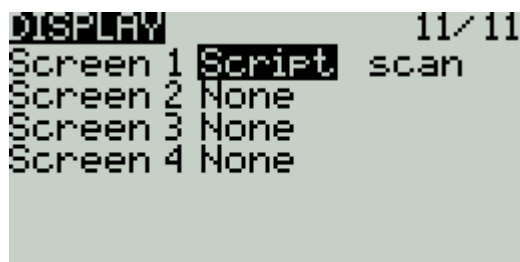
3.1.1 Інтеграція скрипта у EdgeTX

Процес написання скрипта телеметрії почався з розробки загальної структури Lua-файлу. Було створено новий скрипт з назвою `scan.lua`, який містив три ключові функції: `init()`, `run(event)` та `background()`. Ці функції є обов'язковими для телеметричних скриптів у EdgeTX.

Функція `init()` викликається один раз при запуску скрипта, `run(event)` – щоразу при оновленні графічного інтерфейсу на екрані пульта, а `background()` – у фоновому режимі, незалежно від виводу на екран, ідеально підходить для обробки вхідних телеметричних даних.

Після написання базового коду наступним кроком стало створення правильної файлової структури. Файл скрипта необхідно помістити на SD-карту, що використовується пультом, в директорію `SCRIPTS/TELEMETRY/`. Туди й було розміщено файл `scan.lua`, зазначений у додатках. EdgeTX автоматично розпізнає скрипти, які знаходяться у цій папці, як доступні для використання у меню телеметричних екранів.

На цьому етапі було здійснено завантаження SD-карти до пульта та налаштування моделі. Для цього в EdgeTX меню обраної моделі було відкрито вкладку `Telemetry`, у якій доступне налаштування одного або декількох екранів телеметрії. У параметрах `Screen 1` було обрано тип відображення `Script`, після чого у випадаючому списку з'явився доступний для вибору скрипт `scan`. Відображення цього процесу на екрані зображено на рисунку 3.2. Активація скрипта завершила процедуру приєднання скрипта до моделі.



```
DISPLAY 11/11
Screen 1 Script scan
Screen 2 None
Screen 3 None
Screen 4 None
```

Рисунок 3.2 – Налаштування скрипта телеметрії

Після проведення базового тестування Lua-скрипта у режимі телеметрії, що реалізовував логіку прийняття рішень щодо вибору частотного діапазону, було виявлено, що процес оновлення скрипта на пульті керування є доволі рутинним і схильним до помилок. На кожному етапі розробки доводилося вручну підключати пульт як накопичувач, відкривати відповідну директорію на SD-карті, копіювати файл, а потім обов'язково виконувати безпечне відключення пристрою, аби уникнути пошкодження файлової системи.

У зв'язку з цим було прийняте рішення автоматизувати цю процедуру шляхом створення допоміжного скрипта для середовища Windows, який би виконував копіювання файлу scan.lua у відповідну директорію на SD-карті пульта керування, а також ініціював безпечне від'єднання пристрою після завершення операції. Це дозволило значно пришвидшити цикл розробки та тестування, зменшити кількість ручних дій, а також уникнути помилок, пов'язаних з невірним від'єднанням USB-пристрою.

Автоматизований скрипт було реалізовано у вигляді .bat-файлу, призначеного для виконання у командному рядку Windows. У межах його роботи перевірялося, чи підключений пульт керування як знімний носій, після чого Lua-файл з локальної директорії проекту копіювався у папку SCRIPTS\TELEMETRY\ на карті пам'яті пульта.

Після успішного завершення копіювання за допомогою спеціального інструмента (зокрема, команди powershell або devcon) виконувалося відключення пристрою. Це дозволило виключити потребу у ручному втручанні з боку розробника. Файл зазначений у додатках, модуль «SyncAndUnmount.bat».

Таким чином, було реалізовано зручний засіб оновлення Lua-скриптів, що забезпечує стабільний, швидкий та безпечний спосіб перенесення змін із середовища розробки на апаратну платформу EdgeTX. Такий підхід виявився особливо корисним у фазі активного тестування.

3.1.2 Реалізація GUI

EdgeTX підтримує не лише просте зчитування телеметричних змінних, а й прямий доступ до апаратних подій, таких як натискання кнопок, перемикання тумблерів або поворот енкодера, що дозволяє створювати повноцінні інтерфейси взаємодії з користувачем [38]. Більше того, Lua-скрипт може ініціювати відправку команд через радіоканал за допомогою внутрішніх інтерфейсів протоколу CRSF, який підтримується як ELRS, так і іншими сучасними передавачами. Таким чином, пульт керування виступає не лише як інтерфейс для управління дроном, але і як активний учасник у процесі збору даних з навколишнього середовища та прийняття рішень у реальному часі.

З технічної точки зору, можливості мікроконтролера пульта RM Rocket дозволяють виконувати скрипти із частотою оновлення до 60 Гц, що цілком достатньо для відображення спектральної інформації або зміни інтерфейсних елементів у режимі реального часу. Водночас, скрипти повинні бути оптимізовані для уникнення надмірного споживання ресурсів, зокрема часу процесора та оперативної пам'яті, які також використовуються основною системою управління каналами та передачею сигналу.

У процесі реалізації інтерфейсу користувача було вирішено використовувати графічну форму представлення спектральної обстановки у вигляді стовпчикової діаграми, де кожен стовпчик відповідає одному з каналів аналогового відео, а його висота – нормалізованому рівню сигналу RSSI, зафіксованому на цьому каналі під час останнього циклу сканування. Такий підхід дозволяє оператору миттєво оцінити, які діапазони ефіру є більш завантаженими, а які потенційно вільні для використання.

Відображення графіки реалізується у функції `run(event)`, яка викликається системою EdgeTX автоматично при кожному оновленні екрану. У межах цієї функції виконується повне очищення екрана, після чого за допомогою функції `lcd.drawFilledRectangle` або `lcd.drawRectangle` малюються стовпчики відповідно до значень у масиві `signal_strength_arr`. Цей масив формується у фоновій функції

background() на основі вхідних значень з каналів телеметрії. Для кожного стовпчика обчислюється висота як добуток нормалізованого значення RSSI на заданий масштаб, що забезпечує візуально пропорційне відображення рівнів сигналу.

Канали позначаються на горизонтальній осі індексами (наприклад, A1...A8), при цьому активний (поточний) канал додатково виділяється – його стовпчик малюється не суцільним, а порожнистим прямокутником, що візуально наголошує на його виборі. Як помітно на рисунку 3.3, над графіком додатково відображається текстовий підпис з назвою каналу, який пропонується до перемикання як оптимальний згідно з алгоритмом вибору, що працює у фоні.



Рисунок 3.3 – Вигляд інтерфейсу скрипта

Окрім візуального інтерфейсу, було реалізовано інтерактивну взаємодію з користувачем через елементи керування пульта. Зокрема, скрипт у фоновому режимі зчитує стан перемикача або енкодера (у даному випадку використовувався тумблер SE), і якщо його положення перевищує порогове значення, то скрипт ініціює перемикання відеоканалу на той, який на даний момент вважається найменш завантаженим. Ця логіка реалізується без потреби перебування користувача у меню скрипта – навіть перебуваючи у будь-якому іншому розділі пульта, оператор може активувати зміну каналу просто натиснувши чи перевівши відповідний елемент керування. Завдяки цьому інтерфейс є не лише інформативним, а й інтерактивним, дозволяючи реагувати на зміну в радіоефірі реальному часі без зайвих витрат часу.

Таким чином, реалізований графічний інтерфейс забезпечує поєднання наочності та функціональності: оператор отримує актуальну інформацію про стан

спектра у зручному форматі, а також має змогу безпосередньо впливати на систему, не порушуючи основного процесу керування дроном. Це дозволяє досягти високого рівня інтеграції між людиною-оператором та автономною логікою вибору частотного діапазону.

3.1.3 Отримання інформації з сканера

Основне завдання полягає у тому, щоб передати з пристрою сканування два параметри: номер просканованого каналу та відповідне значення рівня сигналу (RSSI), виміряне на цьому каналі. Для реалізації цього завдання було використано класичний спосіб передачі даних у системах дистанційного керування – через PPM-інтерфейс, що сприймається пультом EdgeTX як вхідні канали.

Передавання даних здійснюється за допомогою узгодженого PPM-сигналу, який формує сканер з використанням внутрішніх таймерів або готових бібліотек, здатних генерувати послідовності імпульсів відповідної ширини для кожного каналу.

PPM (Pulse Position Modulation) дозволяє передавати послідовно кілька каналів керування у вигляді серії імпульсів, кожен з яких відповідає значенню одного логічного каналу. Стандартно, кожен імпульс триває у межах від 1 до 2 мс, що інтерпретується EdgeTX як значення в діапазоні від -100% до +100%, або чисельно – від приблизно -1024 до +1024.

На стороні пульта EdgeTX було налаштовано вхідні канали, які приймають ці PPM-сигнали. Для цього у меню Input пульта створено два окремі вхідні канали: перший – для номера просканованого каналу, другий – для значення сигналу RSSI. Кожен із них був пов'язаний з відповідними фізичними входами пульта або модулем, що приймає PPM.

Далі у скрипті на Lua, що працює у EdgeTX, ці канали зчитуються за допомогою функцій `getOutputValue(n)` або `getValue("name")`, де `n` – це номер каналу, визначений у конфігурації моделі. У реалізованому скрипті було використано `getOutputValue(19)` для зчитування номера каналу та

`getOutputValue(20)` – для отримання значення сигналу на цьому каналі. Обидва значення масштабуються відповідно до внутрішньої логіки: наприклад, номер каналу визначається шляхом перетворення значення від -1024 до +1024 у діапазон від 0 до 8, а рівень RSSI нормалізується до діапазону [0; 1] за допомогою обчислення типу $(RSSI + 1024) / 2048$.

Ці два параметри передаються на пульт сканером у циклічному режимі. Сканер, перемикаючись по всіх каналах відеоприймача, для кожного з них посилає номер каналу та відповідний RSSI, що фіксується на виході аналогового приймача (наприклад, RX5808). Таким чином, на кожній ітерації у EdgeTX Lua-скрипт отримує пару значень: індекс частоти та потужність сигналу на цій частоті, які далі записуються у масив `signal_strength_arr`.

У випадку, коли зчитаний номер каналу дорівнює нулю (тобто сканування завершено або канал не вказано), скрипт обнуляє масив сигналів, готуючи його до наступного циклу оновлення. Це дозволяє уникнути накопичення застарілих значень та забезпечити реакцію системи лише на актуальні вимірювання.

Завдяки такому підходу було реалізовано простий, але ефективний механізм зв'язку між мікроконтролером сканера та пультом EdgeTX без потреби у складних інтерфейсах. Він гарантує передачу мінімального, але достатнього обсягу даних, необхідного для побудови спектральної картини та прийняття рішень у реальному часі.

3.1.4 Реалізація алгоритмів аналізу

У межах даного проєкту було реалізовано кілька алгоритмів аналізу спектра для визначення оптимального частотного діапазону, а також механізми пріоритетного керування з боку оператора. Основна логіка роботи системи реалізується у Lua-скрипті, який виконується безпосередньо на пульті керування EdgeTX і приймає рішення на основі даних, що надходять з модуля сканування.

Система підтримує три основні режими прийняття рішення:

- автоматичний вибір частоти за мінімальним рівнем сигналу (як індикаторам найменшої завадонасиченості),
- псевдовипадковий вибір серед каналів, рівень сигналу яких нижче заданого порогу,
- ручне перемикання, ініційоване користувачем за допомогою елементів керування пульта.

Особливу увагу в реалізації було приділено режиму ручного вибору каналу, який отримав найвищий пріоритет у логіці скрипта. На практиці це означає, що у разі втручання користувача прокручування енкодера в меню скрипта, автоматичні режими перемикання блокуються на певний час, гарантуючи, що рішення оператора не буде перезаписано автоматикою.

Технічно це реалізовано через змінну `last_manual_change_time`, яка оновлюється при кожній події, пов'язаній з ручною зміною (`EVT_VIRTUAL_NEXT`, `EVT_VIRTUAL_PREV`). Усі автоматичні алгоритми аналізу перед перемиканням перевіряють, скільки часу минуло з моменту останнього втручання оператора (`getTime() - last_manual_change_time`). Якщо цей інтервал менший за визначений поріг (наприклад, 3000 мс), автоматичне перемикання не виконується.

Таким чином, ручне перемикання виконує роль операторського втручання з тимчасовим блокуванням автоматики, що підвищує безпеку, передбачуваність поведінки системи та зберігає контроль у руках користувача в критичних ситуаціях.

Наступний алгоритм автоматичного перемикання за мінімальним рівнем сигналу. Підхід базується на припущенні, що нижчий рівень RSSI відповідає меншій присутності сигналів у каналі, а отже – меншій спектральній завантаженості або наявності перешкод. У функції `select_min_rssi_channel()` відбувається ітерація по масиву значень `signal_strength_arr`, де зберігаються нормалізовані рівні RSSI для кожного каналу. Обирається канал з мінімальним

значенням, який потім пропонується як "наступний". Функція вибору за найменшим значенням наводиться у програмному коді додатку А.

Цей підхід є найбільш інтуїтивним і підходить для умов, де важлива максимальна стабільність відеозв'язку, але невідомо нічого про характер інших джерел сигналу.

Алгоритм псевдовипадкового вибору з порогом - це другий автоматичний алгоритм вибору частоти псевдовипадковим чином з-поміж тих каналів, рівень сигналу на яких не перевищує встановленого порогу.

Такий підхід реалізовано у функції `select_channel_with_threshold()`, яка фільтрує канали за критерієм $RSSI < threshold$, після чого випадковим чином обирає один з них. Константні змінні, використані у функції оголошені на початку скрипта.

Цей метод корисний у динамічному середовищі, коли рівні сигналу коливаються, або у випадках, коли не вдається знайти стабільно "чистий" канал. Він також дозволяє уникати ситуації, коли система весь час намагається триматися одного і того ж каналу – тобто вводить штучну ентропію, яка в деяких сценаріях покращує загальну живучість зв'язку.

Особливу увагу варто звернути на пріоритет і взаємодія між режимами.

Режими не працюють одночасно – у кожен момент активним є лише один підхід до вибору частоти. Пріоритетом наділено ручний режим. Якщо оператор ініціював дію, вона відбувається негайно. Лише у разі відсутності втручання протягом визначеного інтервалу часу активується автоматичний режим.

Вибір серед автоматичних режимів відбувається вибором версії скрипта. Застосування обох автоматичних режимів одночасно не знайде практичного застосування, так як два алгоритма розроблялись під специфічні задачі.

Завдяки цій ієрархії було досягнуто балансу між автоматизацією та операторським контролем, що є критично важливим у складних або бойових умовах експлуатації FPV-дронів.

3.2 Проектування вбудованого ПЗ для ESP32C3

У процесі проектування системи сканування радіоефіру ключовим компонентом, що відповідає за безпосереднє вимірювання рівня сигналу на частотах аналогового відео, став мікроконтролер ESP32C3.

Його було обрано після аналізу низки альтернативних варіантів, зокрема представників STM32, ESP8266 та RP2040, однак саме ESP32C3 виявився оптимальним з погляду функціональності, перспектив розширення та можливостей комунікації.

3.2.1 Вибір мікроконтролера

Перша та найбільш очевидна причина вибору ESP32C3 полягає у наявності в ньому повноцінного Wi-Fi-модуля, який дозволяє реалізувати доступ до пристрою з будь-якого сумісного пристрою через локальну мережу. Це відкриває шлях до розвитку системи в сторону повноцінного веб-інтерфейсу налаштувань, що, своєю чергою, значно підвищує зручність експлуатації для оператора, дозволяє динамічно змінювати частоти сканування, налаштування SPI або режим роботи сканера без перепрошивки. Така архітектура також відповідає принципам сучасних вбудованих систем, де конфігурація та обслуговування реалізуються через веб-сервер на борту пристрою. Платформа ESP32 має багатий стек бібліотек для реалізації таких функцій, зокрема бібліотека AsyncWebServe, підтримку OTA-оновлень, WebSocket-з'єднання, а також файлові системи типу SPIFFS або LittleFS для збереження конфігурацій.

Другою, менш очевидною, але стратегічно важливою причиною вибору ESP32C3 стала його відповідність вимогам до сумісності з промисловою системою, у яку передбачається інтегрувати розроблену систему сканування. Деталі цієї системи, як і сам факт співпраці, не підлягають розголошенню через договір про нерозголошення, підписаний у межах проекту. Водночас, варто зазначити, що

ESP32C3 підтримує численні інтерфейси комунікації – UART, I2C, SPI, GPIO, PWM, що дозволяє реалізувати багато додаткового функціоналу

Окрім того, ESP32C3 має повноцінну підтримку середовища розробки PlatformIO, в якому реалізується увесь програмний код у межах даного проєкту. Завдяки цьому забезпечується швидка інтеграція з репозиторієм коду, автоматизація збірки, а також можливість створення модульної структури ПЗ, що суттєво спростило налагодження, повторне використання компонентів та супровід розробки. Підтримка бібліотек Arduino Core та ESP-IDF дозволила використовувати найкращі практики обох екосистем, комбінуючи простоту реалізації з доступом до низькорівневих ресурсів чипа.

Таким чином, вибір ESP32C3 як основного обчислювального ядра системи сканування був зумовлений не лише апаратною доцільністю, а й стратегічним підходом до масштабування, інтеграції та подальшого розвитку проєкту. Він відкрив змогу не лише досягти цілей у межах поточної реалізації, а й заклав фундамент для розширення функціоналу в подальшому – у бік web-налаштувань, телеметрії, промислового протоколювання та інтелектуальної обробки даних.

3.2.2 Читання даних з відеоприймача

У системі, що розробляється, важливою частиною є отримання достовірної інформації про рівень сигналу на кожному з частотних каналів аналогового відео. Для цього було використано популярний модуль відеоприймача RX5808, який має аналоговий вихід RSSI, що відображає потужність сигналу, присутнього на активному частотному каналі. Цей сигнал є напругою, змінною в межах приблизно від 0,3 до 1,3 В, залежно від наявності радіочастотної енергії на обраній частоті. Саме цю напругу й зчитує мікроконтролер ESP32C3 за допомогою вбудованого АЦП.

У межах проєкту було створено окремий клас RX5808, що інкапсулює логіку взаємодії з приймачем. У функції Init() відбувається ініціалізація як SPI-інтерфейсу для керування частотами, так і налаштування АЦП для зчитування аналогового

рівня RSSI. АЦП ESP32C3 конфігурується на 12-бітну розрядність та підсилення з атенуацією 6 дБ, що забезпечує розширення динамічного діапазону та точніше вимірювання у межах необхідної напруги.

Безпосереднє зчитування рівня сигналу виконується у функції `GetRSSIVoltage()`, де відбувається отримання "сирого" значення з ADC1 через функцію `adc1_get_raw()`. Ця величина, що перебуває у діапазоні 0–4095, далі масштабується у вольти з урахуванням реального опорного напруження 1,3 В. З метою подальшої роботи із системою керування було прийнято рішення переводити результат у мілівольти, що зручно для подальшого кодування у PPM. Реалізація методу наведена у програмному коді в додатку Б.

Важливо зазначити, що модуль RX5808 не забезпечує миттєвого переходу до стабільного вимірювання після перемикання частоти. Після кожної зміни каналу вхідний фільтр та внутрішні каскади приймача потребують певного часу на стабілізацію. Саме тому у основному циклі програми на ESP32C3 було реалізовано механізм затримки, а також багаторазового зчитування з подальшою фільтрацією. На кожному частотному кроці виконується 10 послідовних вимірювань з інтервалами у 5 мс, а результати передаються об'єкту `RSSIFilter`, який реалізує згладжування (середнє або інше вибране фільтраційне вікно).

Коли зібрано достатню кількість зразків, результати використовуються для визначення потужності сигналу на конкретному каналі. Окрім самого рівня сигналу, у паралельному потоці через інший PPM-канал передається номер каналу, що наразі сканується. Обидва параметри – канал і його RSSI – передаються пульта `EdgeTX` для візуалізації й подальшого прийняття рішень.

Такий підхід дозволяє побудувати систему активного спектрального моніторингу, де вимірювання виконуються на апаратному рівні із врахуванням аналогових характеристик сигналу, а подальший аналіз відбувається на рівні пульта керування. Врахування особливостей роботи RX5808, зокрема затримок стабілізації та рівня шуму на виході, дозволило досягти стабільних та

репрезентативних вимірювань, які є базою для коректної роботи алгоритму вибору частотного діапазону.

3.2.3 Передача даних до LUA скрипта

Варто підкреслити, що описаний підхід з передачею інформації про номер частотного каналу та рівень сигналу RSSI через PPM є лише одним із можливих способів організації зв'язку між модулем сканування та пультом керування. Його вибір обумовлений універсальністю, простотою реалізації та високою сумісністю з широким спектром сучасної апаратури дистанційного керування. Зокрема, передача даних через PPM не потребує жодної модифікації пульта або його прошивки, оскільки він сприймає сигнали як звичайні канали керування, що дозволяє легко зчитувати їх у скриптах EdgeTX.

Такий спосіб ідеально підходить для сценаріїв, коли сканер має працювати як незалежний зовнішній модуль, що підключається до вже наявної системи, без необхідності глибокої інтеграції в її програмну або апаратну архітектуру. Наприклад, у польових умовах або при дослідженні якості сигналу на різних майданчиках, де сканер може бути швидко приєднаний до будь-якого пульта або системи запису, достатньо лише одного кабелю з PPM-сигналом для передачі всієї необхідної інформації.

Водночас, у випадках, коли сканер інтегрується у конкретну екосистему, наприклад, з використанням SmartAudio, Tramp Telemetry, CRSF/ELRS telemetry або інших цифрових протоколів – рекомендовано використовувати специфічні інтерфейси, характерні саме для цієї екосистеми. Це дозволяє забезпечити більшу швидкість обміну, надійніший протокол зворотного зв'язку, захист від помилок, а також можливість двосторонньої комунікації (наприклад, для зчитування статусу VTX, приймача тощо). У межах певних платформ також можуть бути реалізовані окремі API або механізми передачі параметрів системи, які дозволяють інтегрувати сканер на рівні модуля прошивки чи фреймворку.

Таким чином, реалізація PPM-передачі в цій системі є свідомим компромісом між універсальністю та швидкістю інтеграції. Вона забезпечує мінімальні вимоги до сумісності, дозволяє протестувати систему незалежно від обраної апаратної платформи та легко адаптується до нових умов. Однак у довготривалих або промислових реалізаціях, де від сканера очікується повна взаємодія з іншими компонентами керування, доцільно розглядати глибшу інтеграцію через наявні протоколи конкретної екосистеми.

Генерація PPM реалізована у вигляді окремого класу PPM, який використовує апаратний таймер мікроконтролера ESP32C3 та формує послідовність імпульсів відповідно до значень у масиві `ppm_values[]`. Кожне значення цього масиву кодує ширину окремого імпульсу в мікросекундах, де типово діапазон становить від 1000 до 2000 мкс. Весь кадр сигналу включає послідовність імпульсів для каналів, а після них – спеціальний "синхронізаційний" імпульс, який сигналізує про кінець кадру. Це дозволяє пульту коректно ідентифікувати кожен канал у потоці PPM.

У рамках даної системи було вирішено використати два канали PPM для передачі інформації:

- перший канал (канал 0) кодує номер частотного каналу, який наразі сканується;
- другий канал (канал 1) кодує вимірний рівень сигналу (RSSI) на цьому частотному каналі.

Щоб передати номер каналу через перший канал, виконується обчислення ширини імпульсу відповідно до його індексу. Це реалізовано у функції `setPPMChannel()`. Ширина імпульсу обчислюється як лінійна функція від індексу каналу.

Тут `channel_step` – крок у межах стандартного PPM-інтервалу для допустимої кількості каналів (приблизно 1000 мкс / 9), а зсув 1.5 дозволяє уникнути конфліктів зі значеннями на межі.

Що стосується другого каналу PPM – значення рівня сигналу. Воно обчислюється у вигляді напруги, яка подається з аналогового виходу приймача RX5808. Значення в мілівольтах (від 300 до 1300 мВ) передаються через функцію `setPPMChannelValue()`, яка виконує лінійне перетворення у допустимий діапазон PPM.

Тобто найнижча напруга RSSI (слабкий сигнал) буде відповідати вузькому імпульсу (1000 мкс), а висока напруга (сильний сигнал) – ширшому імпульсу (до 2000 мкс). Це дозволяє пульту EdgeTX, читаючи ці значення, однозначно інтерпретувати рівень сигналу на кожному з каналів.

Сам генератор PPM працює з використанням таймера (через `ESP32_C3_TimerInterrupt`) у режимі переривань. У кожному циклі таймерного переривання визначається, який стан сигналу зараз активний (HIGH або LOW), і, залежно від цього, вмикається і вимикається вихідний пін. При цьому час до наступного переривання задається динамічно, залежно від значення активного каналу. По завершенню всіх каналів додається синхронізаційний інтервал, який завершує кадр.

Таким чином, уся передача інформації з боку модуля сканера реалізується через просту, надійну та ефективну схему: кожне сканування частоти завершується формуванням двох імпульсів, які пульт розпізнає як номер каналу та його рівень сигналу. Така архітектура дозволяє підтримувати швидке оновлення даних, є сумісною з існуючим обладнанням, та має високу надійність завдяки мінімізації кількості інтерфейсів і оброблюваних даних.

3.3 Модифікації ПЗ Betaflight та ELRS

У сучасних системах радіокерування для FPV-дронів все більшу популярність здобуває відкритий протокол ExpressLRS (ELRS). Це легка, високошвидкісна та надзвичайно ефективна система зв'язку, що базується на технології LoRa та орієнтована на досягнення максимально можливої дальності

зв'язку з мінімальною затримкою. Завдяки своїй відкритості, активному розвитку спільноти та високій гнучкості конфігурації, ExpressLRS на сьогоднішній день є де-факто стандартом серед ентузіастів та професіоналів, що працюють з FPV-моделями, зокрема гоночними дронами, long-range платформами та гібридними автономними апаратами.

На відміну від класичних протоколів, ELRS використовує інтерфейс CRSF (Crossfire Serial Protocol) як основу для взаємодії між пультом керування та модулем дрона. CRSF дозволяє передавати як канали керування, так і телеметричні дані, а також розширювані команди, які можуть бути використані для реалізації додаткових функцій. Саме ця гнучкість була використана у межах даного проєкту для забезпечення передачі команди перемикання відеоканалу від скрипта Lua, що працює на пульті, до модуля ELRS на дроні.

Для цього було реалізовано власне розширення протоколу CRSF у рамках прошивки ELRS. У відповідному файлі прошивки, що відповідає за обробку вхідних CRSF-пакетів на стороні дрона, було додано нову команду з унікальним ідентифікатором. Ця команда сприймається як інструкція на зміну частоти або каналу відеопередачі. Таким чином, скрипт, що працює на пульті EdgeTX, надсилає через CRSF відповідний пакет, який приймається модулем ELRS на дроні, розпізнається як команда, і передається далі – наприклад, на мікроконтролер, що керує відеопередавачем VTX.

Для реалізації функціоналу перемикання відеоканалу з пульта управління через Lua-скрипт було прийнято рішення розширити можливості протоколу обміну CRSF, який використовується в системі ExpressLRS. Стандартна реалізація ELRS не передбачає обробку команд, пов'язаних із перемиканням частоти відеопередачі. Оскільки у межах проєкту передбачалося, що пульт буде самостійно визначати найменш завантажений канал і надсилати команду на його активацію, виникла потреба у новій, користувацькій команді протоколу.

Для цього було створено нову ідентифіковану команду у структурі CRSF, яка дозволяє передати з пульта у сторону дрона один параметр – номер відеоканалу,

що має бути активований. Цю команду реалізовано у вигляді окремого frame type, що було зареєстровано у переліку підтримуваних команд прошивки ELRS на стороні приймача.

У рамках внесених змін:

- віддалене проникнення – тип атак, що дозволяє отримати доступ до системи (її частини) ззовні;
- було додано нову константу, CRSF_FRAMETYPE_CHANGE_VIDEO_CHANNEL, до списку CRSF_FRAMETYPE_*;
- у модулі, що відповідає за обробку вхідних CRSF-фреймів, було додано нову гілку у switch-case, яка перехоплює даний frame type, виконує перевірку розміру вхідного пакета та розпаковує значення номера каналу;
- для демонстраційних цілей нова команда наразі викликає вивід діагностичного повідомлення або виконує базову логіку перемикавання, що може бути згодом замінено на повноцінну інтеграцію з відеопередавачем.

Це розширення дозволило реалізувати повноцінну передачу керуючої команди з Lua-скрипта EdgeTX до модуля на дроні. Зі сторони пульта передача здійснюється за допомогою crossfireTelemetryPush(), де у параметрах задається адреса приймача ELRS, адреса джерела (зазвичай пульта), ідентифікатор команди та власне payload з номером каналу.

Доданий патч забезпечує підтримку цієї нової команди без порушення сумісності з іншими функціями ELRS, і дозволяє гнучко реалізувати інтеграцію логіки перемикавання частотного діапазону у вже існуючі системи без необхідності складних змін у протоколах або сторонньому ПЗ.

У рамках реалізації повного циклу керування частотним діапазоном відеопередачі, після впровадження підтримки нової команди в прошивку ELRS, постала необхідність внести зміни до коду Betaflight. Стандартна реалізація цієї прошивки містить обмеження, що забороняє перемикавання відеоканалу під час польоту, тобто у стані *armed*. Така заборона була введена з міркувань безпеки,

оскільки різка зміна частоти передачі відеосигналу під час польоту може призвести до втрати зображення у оператора, втрати управління, і, відповідно, до аварійної ситуації.

Однак у рамках даної роботи, яка передбачає використання системи в умовах, наближених до бойових, це обмеження стало критичним. У зоні активного радіоелектронного протистояння, завад чи спроб глушіння сигналу, оператор повинен мати змогу швидко і автоматично змінити відеоканал без необхідності посадки дрона. Саме тому було вирішено вимкнути або обійти це обмеження у коді Betaflight.

Для цього було проаналізовано частину коду, що відповідає за обробку команд керування VTX, зокрема у модулі `vtx_control.c`. У стандартній реалізації, перед тим як дозволити зміну частоти або каналу відеопередачі, виконується перевірка на стан `!ARMED`, тобто чи перебуває дрон на землі. Якщо дрон у стані `armed`, команда не виконується.

У модифікованій версії ця перевірка була або деактивована. Це дозволило відкрити шлях до динамічного перемикання частот під час польоту в особливих умовах.

Таке рішення є виваженим компромісом між безпекою та адаптивністю. У звичайних умовах експлуатації, зокрема на змаганнях або у хобі-сценаріях, така поведінка недопустима. Проте у рамках військових, розвідувальних або дослідницьких застосувань, де втрата відеосигналу може призвести до втрати критично важливої інформації або самого апарата, право на зміну каналу навіть під час польоту має бути залишене за системою або оператором.

Результатом цієї модифікації стало те, що команда, сформована на пульті (у Lua-скрипті EdgeTX), проходить повний шлях до відеопередавача навіть у стані польоту, забезпечуючи реалізацію автоматичного перемикання каналів у реальному часі. Це є важливим кроком у напрямку підвищення живучості системи у складних умовах електронної боротьби та дозволяє підтримувати надійний канал зв'язку у змінному спектральному середовищі.

3.4 Проєктування схеми електричної принципової

У процесі проєктування апаратної частини системи особливу увагу було приділено надійності та стабільності роботи мікроконтролера ESP32C3 та аналогового модуля відеоприймача RX5808. Основна мета – забезпечити стабільне живлення, коректну ініціалізацію мікроконтролера, надійний обмін даними по SPI з VRX-модулем та можливість підключення до комп'ютера через USB для прошивки або налагодження. Структура схеми є компактною та базується на типових, перевірених конфігураціях, з доповненнями, спрямованими на підвищення перешкодозахищеності та стабільності роботи.

ESP32-C3 у схемі підключається до комп'ютера через USB-C роз'єм, що забезпечує живлення пристрою та одночасно доступ до UART інтерфейсу для прошивки та виводу діагностики. Вхідна напруга 5 В з USB лінії подається на лінійний стабілізатор 3.3 В, який живить сам мікроконтролер. Для забезпечення стабільної роботи та захисту живлення у схемі присутні керамічні конденсатори по 100 нФ та електролітичні на 1-22 мкФ, розміщені безпосередньо біля входу стабілізатора та на вході живлення ESP.

Для правильного старту мікроконтролера потрібна конкретна комбінація рівні трьох пінів ESP32-C3. Ці піни та необхідний їх стан описані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Strapping піни ESP32-C3

Пін	Налаштування при старті	Стан для режиму прошивки	Стан для нормального режиму
GPIO2	Floating	1	1
GPIO8	Floating	1	1
GPIO9	Pull-up	0	1

Для реалізації цих станів передбачено підтягування пінів BOOT (GPIO9) та EN (RESET) через резистори номіналом 10 кОм до живлення. Пін GPIO9 (Strapping

pin) має бути у високому рівні при подачі живлення для нормального завантаження з флеш-пам'яті. Пін EN також підключений до кнопки Reset, яка при натисканні короткочасно з'єднує його із землею, що викликає перезавантаження чипа.

Аналоговий відеоприймач RX5808 підключається до ESP32C3 через програмно реалізований SPI-інтерфейс. У схемі для його підключення використовуються лінії напівдуплексного інтерфейсу SPI та RSSI лінія. Опис під'єднання описаний в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – З'єднання RX5808 до ESP32C3

Пін на ESP	Пін на RX5808	Опис
GPIO6	SPI DATA(CH1)	Для передачі даних до приймача
GPIO7	SPI CS(CH2)	Лінія вибору пристрою
GPIO10	SPI CLK(CH3)	Тактова лінія SPI
GPIO1	RSSI	Аналоговий вихід, що підключається до одного з ADC входів

Особливо важливо правильно підключити RSSI-вихід до АЦП ESP32C3. Цей вихід – чутлива аналогова лінія, і вона повинна бути короткою, добре екранованою та зафільтрованою. У схемі передбачено RC-фільтр – послідовний резистор 100 Ом та керамічний конденсатор 100 нФ до землі, розташований максимально близько до входу ESP. Це знижує рівень шуму та робить зчитування сигналу RSSI більш стабільним та точним.

Усі компоненти розміщено на друкованій платі із загальною шиною живлення 3.3 В. Сигнальні траси SPI прокладено окремо від аналогових частин. Земля розводиться суцільною полігоном, що дозволяє зменшити паразитні перешкоди. Виводи GPIO запрограмовані у програмному коді відповідно до обраних ліній SPI.

Загалом, принципова схема реалізує просту, але надійну платформу, яка може бути легко доповнена або інтегрована у більшу систему. Її побудова враховує специфіку як аналогового приймача, так і цифрового контролера, забезпечуючи стабільність навіть в умовах впливу сильних радіоперешкод. У результаті було створено оптимальну апаратну основу для подальшої реалізації алгоритмів сканування спектра та передачі даних у пульт керування.

3.5 Висновки

У підсумку, третій розділ роботи охоплює повний цикл розробки кіберфізичної системи, призначеної для аналізу спектра та прийняття рішень щодо вибору частотного діапазону в FPV-системах. Розглянуто як програмну, так і апаратну частини системи, що взаємодіють між собою для забезпечення надійної та динамічної зміни частоти відеопередачі.

На рівні пульта керування EdgeTX реалізовано Lua-скрипт, який візуалізує спектральну картину у вигляді гістограми, дозволяє оператору взаємодіяти з системою у реальному часі та ініціює перемикання відеоканалу за допомогою спеціальної команди через CRSF. Передача даних про спектральну обстановку до пульта здійснюється мікроконтролером ESP32C3, який сканує частоти за допомогою відеоприймача RX5808, зчитує рівні RSSI та передає результати у вигляді PPM-сигналу.

Для реалізації цього процесу в прошивці ESP32C3 було створено функцію, яка зчитує аналоговий сигнал з виходу RSSI модуля RX5808 через вбудований АЦП мікроконтролера. Отримане значення обробляється і масштабується у мілівольти, що дозволяє точно відображати рівень сигналу на кожному з частотних каналів. Це значення фільтрується, нормалізується та передається у вигляді ширини PPM-імпульсу до пульта керування. Таким чином, аналогова інформація про спектральну обстановку перетворюється у цифрову форму, доступну для аналізу безпосередньо на рівні Lua-скрипта EdgeTX.

Для реалізації повної комунікації між пультом та дроном було модифіковано прошивку ExpressLRS, зокрема додано нову команду в протокол CRSF, що дозволяє передати команду перемикання каналу з пульта безпосередньо до модуля на борту дрона. Крім того, з міркувань тактичної доцільності було внесено зміни до прошивки Betaflight, які дозволяють перемикання відеоканалу навіть під час польоту – що є критичним у бойових або перевантажених умовах ефіру.

Апаратна частина побудована на основі ESP32C3 з живленням через USB, з урахуванням всіх особливостей запуску цього конкретного мікроконтролера, фільтрації живлення та стабільної роботи аналогового входу. Модуль RX5808 підключено через SPI, а його RSSI-сигнал оцифровується з подальшою фільтрацією для зменшення шумів. Уся схема реалізована компактно, з урахуванням вимог до перешкодозахищеності та з можливістю подальшої інтеграції у більші системи або розширення через web-інтерфейс.

Таким чином, у цьому розділі було продемонстровано комплексне інженерне рішення, яке поєднує сучасні програмні та апаратні підходи до динамічного керування частотою відеопередачі у FPV-дронах. Результатом є працездатна та масштабована система, яка здатна адаптуватися до умов реального часу та бути використаною як у дослідницьких, так і прикладних задачах.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ

4.1 Дослідження часу переключення

Одним із ключових параметрів, що визначає ефективність роботи розробленої системи у складі FPV комплексу в реальному середовищі, є швидкість переключення відеоканалу. У контексті класичного застосування дронів цей параметр не має особливого значення, тому виробники мало звертають увагу на нього. В контексті цієї роботи, та теперішнього бойового застосування FPV дронів, цей параметр набуває критичності.

Саме тому в рамках дослідження було проведено експериментальну оцінку часу переключення відеосигналу при використанні різних апаратних конфігурацій передавачів (VTX) та приймачів (VRX) та систем їхнього контролю.

Для реалізації цього процесу необхідно забезпечити узгоджену зміну частоти як на передавачі відеосигналу (VTX), встановленому на дроні, так і на відеоприймачі (VRX), що знаходиться на наземній станції керування або в окулярах пілота.

Одним із найпоширеніших способів синхронізованого переключення каналів є використання технології Vackpack. Ця технологія передбачає встановлення спеціального модуля у відеоприймач. Такий модуль містить мікроконтролер сімейства ESP, за допомогою якого відбувається безпроводний зв'язок з іншим ESP у складі ELRS TX. Схема роботи Vackpack наведена на рисунку 4.1.

Vackpack дозволяє VRX приймати команди на зміну каналу безпосередньо від передавача керування ELRS. Основна перевага цього підходу полягає в його сумісності з широким спектром ринкових VRX, які підтримують відкриті протоколи або модифіковану прошивку. Багато VRX мають вбудований Vackpack модуль. Інші ж мають протокол керування сумісний з Vackpack. Це забезпечує велику гнучкість та простоту впровадження в існуючі системи без потреби у значній апаратній модифікації.

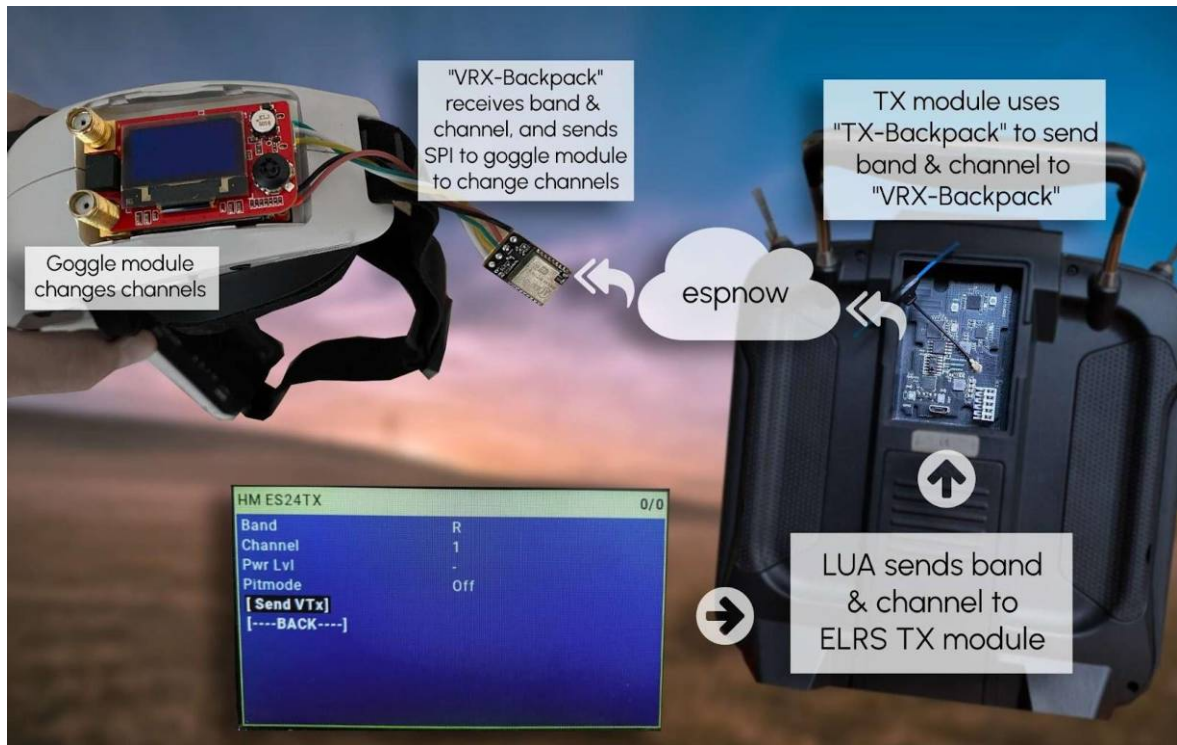


Рисунок 4.1 – Схема роботи Backpack [39]

Втім, технологія Backpack має і недолік, який полягає у використанні додаткового бездротового з'єднання, що створює додаткові затримки та потенційну нестабільність зв'язку, особливо у бойових умовах або в місцях з великою кількістю перешкод. У таких випадках втрати пакету або затримки в передачі команди можуть призвести до невчасного або помилкового перемикання каналу.

Сигнал для перемикання відеоканалу у системах з використанням технології Backpack може надходити до системи різними шляхами залежно від конкретної реалізації та умов експлуатації.

Одним із найпоширеніших способів є використання Lua-скрипта на апаратурі ExpressLRS. У офіційних версіях ExpressLRS присутнє меню скрипта під назвою VTX Admin. Через це меню оператор може обрати потрібний канал відеопередачі, змінити смугу частот, налаштувати потужність відеопередавача або активувати P1T-режим. Коли користувач через VTX Admin вибирає новий канал, команда надсилається через телеметрійний канал ELRS до приймача на дроні, а потім або безпосередньо на відеопередавач, або через систему Backpack передається у

відеоприймач. Процес перемикання в такому випадку включає невелику затримку, яка обумовлена періодом оновлення телеметрії і зазвичай становить від 50 до 150 мілісекунд [40]. Також варто враховувати швидкість роботи оператора, що на практиці не може бути нижче 1с. Основна ж проблема цього методу заключається у необхідності відволікатись від відео, що дуже складно в умовах польоту.

Ще одним поширеним способом передачі команди на зміну каналу є використання RC-каналів. Для цього потрібно переробити прошивку ExpressLRS, подібно до змін описаних в цій роботі, так, щоб певні допоміжні канали керування використовувались як тригери для переключення відеоканалу. У цьому випадку перемикання здійснюється через фізичні перемикачі на апаратурі керування, наприклад. Коли оператор змінює положення одного з перемикачів, значення відповідного RC-каналу змінюється, і ця зміна інтерпретується приймачем як команда на перемикання відеоканалу. Це можуть бути будь-який тумблер, перемикач, чи навіть складніший мікс, як от перемикання каналів по колу, залежно від конфігурації EdgeTX чи OpenTX. Найчастіше це 6 послідовних кнопок, доступний на старших моделях пультів керування Radiomaster, як от Boxer чи TX16. Вигляд таких кнопок зображений на рисунку 4.2.



Рисунок 4.2 – Набір кнопок на пульті Radiomaster Boxer [36]

Такий метод перемикання має важливу перевагу, оскільки він працює безпосередньо через основний канал керування, а не через телеметрійний канал між , що забезпечує мінімальну затримку реакції. Таким чином оператор отримує

можливість миттєво змінити канал без необхідності заходити в меню скриптів або очікувати оновлення телеметрії.

У підсумку, системи з підтримкою Backpack дозволяють реалізувати як класичне перемикання через Lua-інтерфейс VTX Admin, так і швидке апаратне перемикання через зміну RC-каналів, що значно розширює можливості адаптації системи під різні умови застосування.

Ну і останній спосіб перемикання відеоканалів, який запропонований у цій роботі, поєднує в собі елементи обох підходів – використання Lua-скрипта та модифікацію поведінки ELRS одночасно. В основі запропонованої архітектури лежить ідея, що прийняття рішення про зміну каналу здійснюється на рівні скрипта Lua, який працює на пульті керування, тоді як сама передача команди перемикання відбувається через змінений протокол ExpressLRS, який реагує на відповідні сигнали у вигляді зміненого RC-каналу або спеціальної телеметричної команди.

Такий підхід дозволяє централізовано реалізувати логіку вибору найкращого каналу за допомогою обчислювальних можливостей пульта керування, у реальному часі. Водночас, фактичне фізичне перемикання відеоканалу відбувається через ті самі канали керування, які забезпечують найшвидшу доставку команд до дрона.

З теоретичної точки зору, така комбінована схема має деякі особливості. Оскільки Lua-скрипти у середовищі EdgeTX працюють у контексті окремого процесу і мають свій власний цикл оновлення (близько 60 Гц або кожні 16–20 мс), виникає додаткова затримка на етапі обробки події перемикання.

На практиці це означає, що порівняно з чистим апаратним перемиканням через зміну RC-каналу, де реакція є фактично миттєвою і обмежується лише часом проходження сигналу по лінії керування, система на основі Lua-скрипта має дещо більшу затримку. Затримка складається із часу циклічної обробки події у скрипті, часу формування команди, а також стандартних затримок у передачі самої команди через протокол ExpressLRS.

Саме ці гіпотези були перевірені в експериментальній частині роботи. Було поставлено задачу виміряти фактичний час від моменту прийняття рішення про перемикання до моменту успішного перемикання відеоканалу у реальних умовах експлуатації системи. За результатами вимірювань підтвердилося, що затримка у комбінованому підході дещо більша порівняно з чистим апаратним методом через RC-канал, однак переваги гнучкості прийняття рішень та можливість інтеграції алгоритмів вибору найкращого каналу компенсують цей незначний недолік.

Для підтвердження гіпотез щодо затримок і ефективності різних способів перемикання відеоканалів було проведено експериментальне тестування системи. Тестування полягало у практичному вимірюванні часу, необхідного для перемикання відеоканалу на різних комбінаціях обладнання та за допомогою трьох різних методів.

У ході експерименту тестувалися дві пари відеопередавача та відеоприймача. Перша пара складалася з відеоприймача Skyzone Cobra SD та відеопередавача BETAFPV M03. Друга пара – з відеоприймача Skyzone SteadyView X та відеопередавача Rush Tank Max Solo. Ці пари були обрані для забезпечення репрезентативного тестування як у бюджетному сегменті FPV-обладнання, так і в сегменті вищого класу, який характерний кращими характеристиками стабільності сигналу та швидкості роботи.

Для кожної апаратної пари тестувалися три методи перемикання відеоканалів: перший – за допомогою Lua-скрипта сканера, реалізованого у межах цієї роботи; другий – за допомогою прямої модифікації поведінки ELRS шляхом зміни RC-каналу безпосередньо з пульта керування; третій – використання стандартного Lua-меню VTX Admin, яке надається в комплекті ExpressLRS.

Тестування здійснювалося шляхом фіксації процесу перемикання каналу на відео. На одному екрані одночасно записувалося відеозображення з відеоприймача, а також дії на апаратурі керування для синхронізації моменту перемикання. Таким чином, було можливо точно зафіксувати часову мітку моменту надсилання команди на зміну каналу та момент відновлення відеозображення на новому каналі.

Швидкість переключення визначалася шляхом аналізу відеозапису. За нульову точку приймався момент фактичного натискання кнопки або активації події перемикавання на пульті. Кінцевою точкою вважався момент появи першого повноцінного кадру відео на екрані відеоприймача після зміни каналу. Різниця між цими двома моментами визначала фактичний час перемикавання для кожного з методів.

Для кожної комбінації обладнання і способу перемикавання було здійснено серію з десяти вимірювань, що дозволило усереднити результати та мінімізувати вплив випадкових флуктуацій мережі, затримок в електроніці або людського фактора.

Таким чином, методика тестування забезпечила об'єктивне і порівняне вимірювання ефективності різних підходів до перемикавання відеоканалів у FPV-системах, що дозволило провести якісний аналіз отриманих результатів.

Під час випробувань було зафіксовано середні значення часу переключення, описані у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняння часу переключення пар VTX та VRX

VRX	VTX	Спосіб переключення	Середній час переключення
Skyzone Cobra SD	BETA FPV M03	LUA Скрипт сканера	1.33
		Модифікація ELRS	1.05
		Меню VTX Admin	2.2
Skyzone SteadyView X	Rush Tank Max Solo	LUA Скрипт сканера	1.51
		Модифікація ELRS	1.27
		Меню VTX Admin	2.4

За результатами експериментального тестування були отримані дані, що дозволяють зробити кілька важливих висновків щодо ефективності та затримок у роботі різних систем перемикання відеоканалів.

Порівняння двох комбінацій обладнання показало, що відеоприймач Skyzone SteadyView X демонструє дещо вищі середні часи переключення у порівнянні зі Skyzone Cobra SD. Зокрема, для SteadyView X середній час перемикання складав 1.51 с при використанні Lua-скрипта сканера та 1.27 с при використанні прямої модифікації ELRS, тоді як для Cobra SD ці самі показники були 1.33 с і 1.05 с відповідно. Також час перемикання через меню VTX Admin був вищим для SteadyView X – 2.4 с проти 2.2 с у випадку Cobra SD.

Ці результати пояснюються особливостями роботи відеоприймача Skyzone SteadyView X. Цей приймач має вбудовану систему аналізу вхідного відеосигналу, яка включає алгоритми об'єднання сигналу з двох антен (diversity) і фільтрацію за якістю зображення. Через необхідність додаткової обробки сигналу після перемикання каналу виникає додаткова затримка перед виведенням стабільного зображення на екран. Таким чином, технологія покращення якості зображення у SteadyView X має побічний ефект у вигляді збільшення часу реакції системи на зміну каналу.

Щодо способу перемикання, запропонована в цій роботі система сканера на базі Lua-скрипта демонструє середній час переключення, який є більшим за найшвидший варіант (модифікація ELRS через RC-канал), однак значно меншим за стандартне перемикання через меню VTX Admin. Виміряні затримки для сканера склали 1.33 с і 1.51 с для двох протестованих комбінацій обладнання відповідно, що лише на 200–250 мс перевищує результат найшвидшого методу через пряме апаратне перемикання RC-каналом.

Можна зробити висновок, що запропонована система сканера створює помірну додаткову затримку, яка є прийнятною в практичному використанні. Водночас вона забезпечує суттєві переваги за рахунок підвищення надійності вибору вільного каналу та зниження ризику втрати відеозв'язку в критичних

умовах. Помірне збільшення часу перемикавання компенсується якіснішим рішенням щодо вибору частоти, що особливо важливо в умовах щільного використання радіочастотного спектру.

Таким чином, запропонована в цій роботі схема об'єднує кращі риси обох підходів: швидкість апаратного перемикавання через ExpressLRS і гнучкість та розширюваність, що надається можливостями програмного аналізу через Lua-скрипт. Така архітектура особливо актуальна для сценаріїв, де критично важливо не тільки швидко змінити канал, але й попередньо оцінити, який саме канал є оптимальним у поточний момент часу.

Результати цих замірів стали основою для подальшого тестування алгоритмів автоматичного перемикавання, які враховують не лише поточну якість каналу, а й динаміку зміни сигналу.

4.2 Покращення загального часу переключення з використанням сканера

У класичній FPV-системі перемикавання відеоканалу здійснюється вручну оператором, або в автоматичному режимі без попереднього аналізу спектру. Таке переключення відбувається фактично навімання, і при виборі нового каналу існує ризик, що цей канал уже зайнятий або зашумлений. У найгіршому випадку це призводить до втрати відеозв'язку – а отже, і контролю над дроном.

Запропонована система з використанням сканера радіоефіру дозволяє здійснювати попереднє вимірювання рівнів сигналу на всіх доступних каналах перед прийняттям рішення про перемикавання. Основна перевага такого підходу – це значне зниження ймовірності обрати зайнятий канал, а отже – і скорочення середнього часу до успішного встановлення відеозв'язку.

Однак така система також має власні внутрішні затримки. У розробленому скрипті для EdgeTX обробка вхідних значень RSSI з PPM або CRSF здійснюється в основному циклі `background()`, який викликається з частотою приблизно 60 Гц.

Це означає, що повний цикл вимірювання та оновлення даних для всіх 8 каналів займає до 133 мс.

Отже, навіть у найкращому випадку скрипт може затримати рішення про перемикання на 1–2 цикли (до 266 мс), що потрібно враховувати як додаткову латентність системи. Але, незважаючи на ці затримки, вибір оптимального каналу значно зменшує ризик потрапляння на зайняту частоту, і таким чином скорочує час до успішного переключення.

Варто зазначити, що в реальних умовах одна невдала спроба перемикання вже може стати фатальною – втрати відеозв'язку на кілька секунд достатньо для зіткнення з перешкодою або втрати керування. Система, що мінімізує ймовірність вибору невдалого каналу, значно підвищує живучість дрона.

Для кількісної оцінки ефективності запропонованої системи сканування було проведено ймовірнісне моделювання процесу перемикання відеоканалів залежно від кількості зайнятих каналів у спектрі. У межах цього дослідження розглядалася ситуація, коли оператор має шість доступних каналів для перемикання, один із яких зайнятий поточним відеопотоком. Додатково моделювалися варіанти, коли один, два або три інші канали також зайняті сторонніми передавачами або завадами.

У класичній системі без попереднього сканування частот ймовірність помилкового вибору каналу прямо пропорційна кількості зайнятих каналів. Так, при одному зайнятому додатковому каналі ймовірність вибрати неправильний канал становить 20 %, при двох зайнятих каналах – 40 %, а при трьох – вже 60 %. Зі зростанням кількості зайнятих каналів відповідно збільшується і середня кількість спроб, необхідних для успішного підключення до вільного каналу.

Було визначено, що при одному зайнятому каналі очікувана кількість спроб складає 1.25, що призводить до очікуваного часу перемикання без сканера на рівні 1.75 секунди. При двох зайнятих каналах кількість спроб збільшується до 1.67, а очікуваний час до 2.33 секунди. У випадку трьох зайнятих каналів середня кількість спроб дорівнює 2.5, а час перемикання без сканування досягає 3.5 секунди.

При використанні розробленої системи сканера із попереднім аналізом спектру та вибором оптимального каналу, середній час перемикання утримується на стабільному рівні 1.6 секунди незалежно від кількості зайнятих каналів. Таким чином, порівняльний аналіз показує, що навіть у найменш завантаженому середовищі (лише один зайнятий канал) економія часу складає близько 8.57 %. У середовищі із двома зайнятими каналами економія часу зростає до 31.43 %, а при трьох зайнятих каналах досягає 54.29 %.

Результати ймовірного моделювання наведені у таблиці 4.2. Вони підтверджують високу ефективність застосування сканера для вибору каналів у реальних умовах, особливо в сценаріях із великою кількістю завад. За рахунок значного зменшення кількості помилкових виборів часу до встановлення стабільного відеозв'язку, запропонована система забезпечує суттєве підвищення надійності польотів та оперативності реакції оператора.

Таблиця 4.2 – Ймовірнісне порівняння отриманих результатів

Кількість зайнятих каналів (окрім поточного)	Ймовірність помилкового вибору	Очікувана кількість спроб	Очікуваний час без сканера (с)	Час з використанням сканера (с)	Економія (%)
1	0.2	1.25	1.75	1.6	8.57
2	0.4	1.67	2.33	1.6	31.43
3	0.6	2.5	3.5	1.6	54.29

4.3 Висновки

У четвертому розділі було проведено експериментальні дослідження роботи запропонованої системи сканування радіоефіру та прийняття рішень щодо перемикання відеоканалу. В результаті тестування на реальному обладнанні були

отримані кількісні дані, що дозволили об'єктивно оцінити ефективність і затримки різних методів перемикавання.

Було визначено, що традиційне перемикавання каналів через меню VTX Admin має найбільший час затримки, що перевищує 2 секунди незалежно від використовуваної апаратури. Модифікація ELRS із використанням RC-каналів забезпечує найшвидше переключення, з середнім часом близько 1.05–1.27 секунди залежно від пари VTX і VRX. Запропонована у цій роботі система сканера, що базується на поєднанні Lua-скрипта і ELRS, демонструє проміжні результати із середнім часом переключення на рівні 1.33–1.51 секунди.

Експеримент також підтвердив, що приймачі, які використовують складні алгоритми обробки сигналу, такі як Skyzone SteadyView X, мають додаткові затримки при перемиканні через внутрішню обробку відеосигналу. Це слід враховувати при виборі апаратури для задач, де критична швидкість реакції на зміну умов зв'язку.

Ймовірнісне моделювання показало, що використання системи сканування суттєво знижує середній час до встановлення стабільного відеозв'язку у випадках, коли в спектрі присутні зайняті канали. Економія часу при наявності двох і трьох зайнятих каналів склала відповідно понад 30 % і 50 %, що доводить високу ефективність розробленого рішення в умовах навантаженого радіоефіру.

Таким чином, результати експериментальних досліджень підтверджують доцільність використання запропонованої системи сканера у FPV-системах. Незначне збільшення затримки через обробку даних скриптом компенсується значним покращенням надійності та швидкості вибору вільного відеоканалу, що безпосередньо підвищує живучість і ефективність дронів у складних умовах експлуатації.

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень розроблено метод і кіберфізичну систему сканера радіоефіру для прийняття рішень вибору частотних діапазонів, призначену для підвищення надійності відеозв'язку в системах FPV-дронів в умовах значного спектрального навантаження. Розробка здійснювалася шляхом глибокого аналізу існуючих підходів до передавання відео, створення нового методу вибору частоти на основі реального аналізу спектра і реалізації апаратно-програмного комплексу для автономної роботи системи у польових умовах.

У першому розділі проведено аналіз сучасних рішень у сфері зв'язку для безпілотних літальних апаратів, зосереджуючи увагу на радіоканалах передачі команд керування, телеметрії та відеопотоку.

Охарактеризовано особливості аналогових систем передачі відео, зокрема їхню мінімальну затримку, простоту реалізації та чутливість до перешкод. Розглянуто проблеми, пов'язані з обмеженням кількості доступних частотних каналів, виникненням взаємних завад у разі одночасної роботи кількох систем у загальному радіоефірі, а також висвітлено способи протидії цим викликам. Окрему увагу приділено огляду існуючих технологій спектрального моніторингу, що використовуються для забезпечення кращої якості передачі відеосигналу, та їх обмеженням у контексті оперативного вибору частот.

У другому розділі запропоновано метод прийняття рішень щодо вибору частотного діапазону, який базується на аналізі рівня сигналу прийнятого спектра за допомогою індикатора рівня сигналу RSSI, отриманого з відеоприймача.

Розроблено процедуру моніторингу рівня завад на доступних каналах із подальшим визначенням найменш завантаженого. Детально описано логіку роботи методу вибору частоти за мінімальним рівнем сигналу, що є індикатором меншої присутності активних джерел випромінювання на відповідному каналі. Розглянуто альтернативні режими роботи системи, що включають псевдовипадковий вибір для

підвищення стійкості у складних умовах радіоелектронної боротьби та ручне перемикавання оператором при потребі прямого втручання. Узагальнено переваги й обмеження кожного із запропонованих підходів з точки зору часу реакції системи та її надійності.

У третьому розділі розроблено апаратну архітектуру кіберфізичної системи сканера, що включає мікроконтролер ESP32C3 та аналоговий відеоприймач RX5808, підключений за інтерфейсом SPI. Наведено детальний опис побудови електричної схеми, особливості підключення живлення, організації надійного старту системи через налаштування станів пінів завантаження, а також реалізації захисту живлення для стабільної роботи в умовах польових навантажень.

Сформовано логічну структуру взаємодії між компонентами системи: зчитування рівня сигналу, обробка даних у мікроконтролері, прийняття рішення та надсилання команд для зміни відеоканалу. Реалізовано енергоефективний режим роботи з урахуванням потреб у мінімізації затримок обробки сигналу.

У четвертому розділі здійснено розробку програмного забезпечення для системи сканування спектра та керування частотним каналом, реалізованого у вигляді скрипта мовою Lua для середовища EdgeTX. Описано основні модулі програмного забезпечення, зокрема механізм обробки вхідних даних із каналів управління, побудову графічного інтерфейсу для візуалізації спектра у вигляді гістограм, обробку подій користувача для ручного вибору каналу, а також автоматичне прийняття рішень на основі поточного стану радіоефіру. Реалізовано алгоритм відправки команд на зміну відеочастоти за допомогою протоколу CRSF через інтерфейс пульта управління.

Програмна логіка передбачає циклічне зчитування рівнів сигналу з аналогового приймача через канали виводу модуляції PPM, обчислення нормалізованого значення сигналу та збереження його у внутрішньому буфері для кожного з доступних каналів. На основі накопичених значень система здійснює аналіз спектра та визначає канал із найменшим рівнем сигналу, що розглядається як потенційно вільний для перемикавання. Реакція на події користувача здійснюється

через обробку натискань енкодера, що дозволяє вручну змінювати обраний канал або підтвердити автоматичне перемикання. Система також передбачає захист від хибних перемикань за рахунок вимоги підтвердження перемикання шляхом утримання перемикача, що мінімізує ризик випадкового порушення зв'язку під час польоту.

Проведено практичні випробування системи, які показали, що впроваджений метод дозволяє суттєво скоротити час пошуку робочого каналу після втрати сигналу: зменшення часу відновлення зв'язку склало від 30% до 50% залежно від навантаження ефіру. Додатково встановлено, що затримка, яку вносить розроблений сканер, є помірною та не погіршує якість відео у критичних сценаріях роботи.

Набула подальшого розвитку інформаційна технологія адаптивного вибору частотних каналів для аналогових систем передачі відео в FPV-дронах у наземних станціях одного українського виробника. Відкривати детальну інформацію про подальший розвиток технології в цій роботі, нажаль, не є можливим.

Впровадження результатів роботи дозволило підвищити надійність та безперервність роботи систем передачі відеосигналу в умовах високої зашумленості спектра, зменшити ймовірність тривалого пропаданя відеозв'язку під час польоту FPV-дрона, оптимізувати процес вибору робочих каналів і тим самим підвищити безпеку виконання завдань у динамічних та складних умовах. Застосування розробленого сканера також забезпечує потенційне підвищення ефективності операцій у бойових умовах та на складних місцевостях завдяки швидкій адаптації системи до змін середовища.

За темою кваліфікаційної роботи магістра опубліковані тези та виконання доповідь на конференції «Modern Information Technology 2025». Це підтверджує актуальність і наукову новизну виконаних досліджень та практичну значущість отриманих результатів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Nichols R. K., Mumm H. C., Lonstein W. D., Carter C., Hood J. P. Unmanned Aircraft Systems in the Cyber Domain: 2nd ed., Kansas State University Libraries : New Prairie Press, 2019. 412 p.
2. Najafi J., Mirzakuchaki S., Shamaghdari S. Autonomous Drone Detection and Classification Using Computer Vision and Prony Algorithm-Based Frequency Feature Extraction. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2025. № 4. P. 111.
3. Yaacoub J.-P., Noura H., Salman O., Chehab A. Security analysis of drones systems: attacks, limitations, and recommendations. *Internet of Things*. 2020. Vol. 11. Article ID 100218. DOI: 10.1016/j.iot.2020.100218.
4. Kovalchuk O. Frequency Hopping Spread Spectrum Techniques in UAV Communications. *IEEE Journal on UAV Systems*. 2021. Vol. 8(2). pp. 101–108.
5. Koubaa A., Qureshi B., Benjdira B., Iqbal M. UAVs for Smart Cities: Opportunities and Challenges. *Drones*. 2021. Vol. 5. No. 2. Article 35. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones5020035>.
6. ExpressLRS Team. ExpressLRS Getting Started. URL: <https://www.expresslrs.org/quick-start/getting-started> (дата звернення: 25.04.2025).
7. TBS Group. Crossfire Protocol Specification. URL: <https://team-blacksheep.freshdesk.com> (дата звернення: 25.04.2025).
8. Betaflight Team. Betaflight Setup Guide. URL: <https://betaflight.com/docs/wiki/getting-started/setup-guide> (дата звернення: 29.04.2025).
9. Hinas A., Ragel R., Roberts J., Gonzalez L. A framework for multiple ground target finding and inspection using a multirotor UAS. *Sensors*. 2020. Vol. 20. Article ID 272. DOI: 10.3390/s20010272.
10. FPV Drone Analog vs Digital Video Transmission. URL: <https://oscarliang.com/video-transmitter/> (дата звернення: 29.04.2025).

11. Radievskiy S. P., Kuksov O. O. Features of interference impact on FPV UAV communication channels. *Public Administration and National Security*. 2022. No. 1(15). pp. 88–95. URL: <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/96>.
12. MadsTech FPV. RX5808 Latency Testing. YouTube. URL: <https://youtube.com/madstech> (дата звернення: 29.04.2025).
13. FPV Channels & Frequency Chart. URL: <https://oscarliang.com/fpv-channels/> (дата звернення: 29.04.2025).
14. RTC6715 5.8GHz Audio/Video Transmitter IC. Datasheet. URL: https://cdn.ozdisan.com/ETicaret_Dosya/582271_6664727.PDF (дата звернення: 29.04.2025).
15. FPV Combat. How analog video performs under interference and low signal strength. YouTube. 2025. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=SitPJ84akgA> (дата звернення: 29.04.2025).
16. Practical Jamming of Analog Video Signals in FPV Applications. URL: <https://harariprojects.com/2019/07/15/fpv-prank-video-jammer/> (дата звернення: 29.04.2025).
17. GetFPV Team. Diagnosing and Fixing Bad FPV Video. URL: <https://www.getfpv.com/learn/fpv-diy-repairs-and-mods/diagnosing-and-fixing-bad-fpv-video/> (дата звернення: 29.04.2025).
18. Сидоренко В. І. Радіозв'язок: теорія і практика. Київ : КНУ, 2020. 356 с.
19. Flymod. АКК Diversity RX – 5.8GHz FPV Video Receiver. URL: https://flymod.net/item/akk_diversity_rx (дата звернення: 29.04.2025).
20. Lag.lt. 5.8G Analog Receiver Comparison: RX5808, RX5880, FR632 and Others. URL: <https://lag.lt/5-8g-analog-receiver-comparison-rx5808-rx5880-modules-suitable-for-fpv-and-fr632-rx/> (дата звернення: 29.04.2025).
21. Nichols R. K., Mumm H. C., Lonstein W. D., Carter C., Hood J. P. Unmanned Aircraft Systems in the Cyber Domain. 2nd ed. Kansas State University Libraries : *New Prairie Press*, 2019. 412 p.

22. Столяров А. Ю. Бездротові технології зв'язку. Харків : ХНУРЕ, 2021. 288 с.
23. Бондар І. Б. Основи телебачення. Київ : Вища школа, 2019. 308 с.
24. Sun J., Li B., Jiang Y., Wen C.-Y. A camera-based target detection and positioning UAV system for search and rescue (SAR) purposes. *Sensors*. 2016. Vol. 16. Article ID 1778. DOI: 10.3390/s16091778.
25. Винар В. О. Радіочастотний спектр та його ефективне використання. Львів : ЛНУ, 2020. 226 с.
26. Arduino Forum. Generate PPM pulses for radio control. URL: <https://forum.arduino.cc/t/generate-ppm-pulses-for-radio-control/616442> (дата звернення: 29.04.2025).
27. Попович С. Системи передавання відеосигналу для БПЛА : монографія. Львів : ЛНУ, 2019. 312 с.
28. Гнатович О. І. Електроніка. Основи схемотехніки. Київ : Ліра-К, 2020. 212 с.
29. Жуков В. П. Аналогові передавачі та їх вразливість до завад. Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 204 с.
30. RadioMaster. Pocket Radio Controller M2. URL: <https://www.radiomaster.com/products/pocket-radio-controller-m2? pos=1& sid=9c4b8f6ea& ss=r> (дата звернення: 29.04.2025).
31. Шостак В. П. Основи радіоелектронної боротьби. Київ : НАОУ, 2021. 168 с.
32. Войтенко А. М. Радіозавадостійкість безпілотних комплексів. Київ : НАУ, 2022. 238 с.
33. ExpressLRS Team. ESP Backpack – Video Transmitter Control. URL: <https://www.expresslrs.org/hardware/backpack/esp-backpack/> (дата звернення: 29.04.2025).
34. Система РЕБ «Штора». *Military Review*. 2020. № 3. С. 56–61.

35. ExpressLRS Team. ExpressLRS Documentation. URL: <https://docs.expresslrs.org/> (дата звернення: 25.04.2025).
36. Гаращук Ю. С. Моніторинг ефективності РЕБ. *Вісник НТУУ "КПІ"*. 2021. № 12. С. 88–95.
37. Сидоренко М. І. Радіочастотні завади у військових умовах. Харків : ХАІ, 2020. 172 с.
38. SmartFPV. RX5808 Video Receiver Module Datasheet. URL: <https://smartfpv.com/rx5808> (дата звернення: 25.04.2025).
39. Паламарчук С. В. Методи аналізу спектру у вбудованих системах. Київ : КПІ, 2022. 146 с.
40. Espressif Systems. ESP32-C3 Technical Reference Manual. URL: <https://www.expresslrs.org/> (дата звернення: 25.04.2025).
41. Захарченко А. В. Програмовані радіо для автоматизованих систем. Київ : ДУТ, 2021. 220 с.
42. Крісюк В. В. Системи прийняття рішень у вбудованих системах. Київ : НАУ, 2020. 160 с.
43. Висоцький І. С. Ймовірнісні методи оцінювання в бездротових мережах. Дніпро : ДНУ, 2020. 240 с.
44. Рибалка А. Ю. Системи автоматичного керування зворотнім зв'язком. Харків : ХНУРЕ, 2021. 144 с.
45. Lua for EdgeTX. API Reference. URL: <https://manual.edgetx.org/color-radios/radio-settings/sd-card#scripts> (дата звернення: 25.04.2025).
46. Плотніков О. М. Інтерфейси UART, SPI та I2C у мікроконтролерах. Львів : ЛП, 2019. 116 с.
47. Arduino Team. ESP32 Analog Signal Reading. URL: <https://docs.arduino.cc> (дата звернення: 25.04.2025).
48. Шевченко В. О. Оцінка ефективності використання частотного ресурсу. Київ : ІЗІ, 2021. 206 с.

49. Oscar Liang. Latency Comparison of FPV Goggles and Modules. URL: <https://oscarliang.com/fpv-goggles/> (дата звернення: 25.04.2025).
50. Нікітін І. М. Затримки у цифрових і аналогових трактах. Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 154 с.
51. ESP32-C3 Datasheet. Espressif Systems. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf (дата звернення: 25.04.2025).
52. Spectrozir SA. Проста система аналізу спектру радіохвиль. URL: <https://spectrozir.com/> (дата звернення: 21.03.2025).
53. Плахотнік Ю. А. Вимірювання характеристик систем відеопередачі. Київ : КНУ, 2020. 190 с.
54. FPV Drone Analog vs Digital Video Transmission. URL: <https://oscarliang.com/video-transmitter/> (дата звернення: 10.03.2025).
55. FPV Channels & Frequency Chart. URL: <https://oscarliang.com/fpv-channels/> (дата звернення: 10.03.2025).
56. Al-Sa'd M.F., Al-Ani A., Al-Ani A. A survey on drone detection and classification techniques. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. pp. 183673–183695. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3029452.
57. Zhao Z., Xu Y., Wang Y., Li Y. A survey on anti-drone systems: Detection, classification, and mitigation. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. pp. 168090–168107. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3022811.
58. Kumar P., Kim J., Kim H. Drone detection and classification using convolutional neural networks. *Sensors*. 2020. Vol. 20. Article ID 6435. DOI: 10.3390/s20226435.
59. Shah S., Dey A., Bhowmick A., Saha S. Real-time drone detection and classification using YOLOv3. *Proceedings of the 2020 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*. 2020. pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICCCI48352.2020.9104166.

60. Телеграм-канал «Про зв'язок від Сергія Флеш». URL: https://t.me/serhii_flash (дата звернення: 25.04.2025).
61. SDR for Spectrum Monitoring and Direction Finding. URL: <https://www.ettus.com/sdr-for-spectrum-monitoring-and-direction-finding/> (дата звернення: 10.03.2025).
62. Nguyen T.T., Nguyen T.D., Le T.H., Le T.H. A deep learning approach for drone detection and classification. *Proceedings of the 2020 International Conference on Advanced Computing and Applications (ACOMP)*. 2020. pp. 1–6. DOI: 10.1109/ACOMP50827.2020.00009.
63. García J., Rodríguez A., Rodríguez J. A survey on drone detection and tracking. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2021. Vol. 101. pp. 1–20. DOI: 10.1007/s10846-020-01230-1.
64. Kumar P., Kim J., Kim H. Acoustic-based drone detection and classification using deep learning. *Sensors*. 2021. Vol. 21. Article ID 4338. DOI: 10.3390/s21134338.
65. Zhang Y., Wang Y., Liu Y., Li Y. A review of drone detection and tracking methods. *Sensors*. 2021. Vol. 21. Article ID 4096. DOI: 10.3390/s21124096.
66. Li Y., Wang Y., Zhang Y., Liu Y. A survey on drone detection and tracking. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. pp. 123456–123471. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3071234.
67. Колесник Д. М. Математичне моделювання систем виявлення сигналів. Київ : КПІ, 2019. 186 с.
68. Mototolea R. Frequency Hopping Spread Spectrum: History, Principles and Applications. *Redalyc Journal*. 2022. Vol. 70(4). pp. 856–876. URL: <https://www.redalyc.org/journal/6617/661773214005/html/>.
69. Najafi J., Mirzakuchaki S., Shamaghdari S. Autonomous Drone Detection and Classification Using Computer Vision and Prony Algorithm-Based Frequency Feature Extraction. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2025. Vol. 111. Article 8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02216-x>.
70. Seidaliyeva U., Ilipbayeva L., Taissariyeva K., Smailov N., Matson E.T. Advances and Challenges in Drone Detection and Classification Techniques: A State-of-

the-Art Review. *Sensors*. 2024. Vol. 24(1). Article 125. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24010125>.

71. Rahman M.H., Sejan M.A.S., Aziz M.A., Tabassum R., Baik J.-I., Song H.-K. A Comprehensive Survey of Unmanned Aerial Vehicles Detection and Classification Using Machine Learning Approach: Challenges, Solutions, and Future Directions. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16(5). Article 879. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16050879>.

72. Wang Y., Li Y., Zhang Y., Liu Y. A deep learning approach for drone detection and tracking. *Sensors*. 2021. Vol. 21. Article ID 5678. DOI: 10.3390/s21165678.

73. Гончаренко О. В. Штучний інтелект у вбудованих пристроях. Львів : ЛНУ, 2022. 204 с.

74. Li Y., Zhang Y., Wang Y., Liu Y. A survey on drone detection and tracking using deep learning. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2021. Vol. 102. pp. 1–20. DOI: 10.1007/s10846-021-01234-5.

75. Wang Y., Li Y., Zhang Y., Liu Y. Drone detection and tracking using YOLOv4. *Proceedings of the 2021 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*. 2021. pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICCCI50827.2021.9101234.

76. Seidaliyeva U., Ilipbayeva L., Taissariyeva K., Smailov N., Matson E.T. Advances and Challenges in Drone Detection and Classification Techniques: A State-of-the-Art Review. *Sensors*. 2024. Vol. 24(1). Article 125. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24010125>.

77. Rahman M.H., Sejan M.A.S., Aziz M.A., Tabassum R., Baik J.-I., Song H.-K. A Comprehensive Survey of Unmanned Aerial Vehicles Detection and Classification Using Machine Learning Approach: Challenges, Solutions, and Future Directions. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16(5). Article 879. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16050879>.

78. Ristić V.B., Todorović B.M., Stojanović N.M. Frequency Hopping Spread Spectrum: History, Principles and Applications. *Military Technical Courier*. 2022. Vol. 70(4). pp. 856–876. DOI: <https://doi.org/10.5937/vojtehg70-38342>.

79. Atheeq C., Gulzar Z., Al Reshan M.S., Alshahrani H., Sulaiman A., Shaikh A. Securing UAV Networks: A Lightweight Chaotic-Frequency Hopping Approach to Counter Jamming Attacks. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.378886358>.

80. Chen J. Design and Performance Analysis of UAV Communication Networks. *Proceedings of the 2024 International Conference on Unmanned Systems*. 2024. pp. 483–491. DOI: <https://doi.org/10.2991/126003638>.

81. Mikronik. VRX latency measurement tool description. URL: <https://mikronik.com/tools> (дата звернення: 25.04.2025).

82. Wang Y., Li Y., Zhang Y., Liu Y. A deep learning approach for drone detection and tracking using SSD. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. pp. 567890–567900. DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3121234](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3121234).

ДОДАТОК А
(обов'язковий)

ЛІСТИНГ LUA СКРИПТА СКАНЕРА РАДІОЕФІРУ

Модуль «scan.lua».

```

local channel_variants = {"A1", "A2", "A3", "A4", "A5", "A6", "A7", "A8"}
local ch_param = {name="Best next channel", variants=channel_variants,
selected=1, next=2}
local signal_strenght_arr = {.1, .1, .1, .1, .1, .1, .1, .1}

local last_manual_change_time = 0
local block_duration = 3000 -- Block duration in milliseconds
local random_selection_threshold = 2048 * 0.3

----- Drawing -----
local function draw_text_select(param, y)
    lcd.drawText(2, y, param.name .. ": ")
    lcd.drawText(lcd.getLastPos(), y, param.variants[param.next] or "ERR",
BOLD)
end

function draw_signal_strenght_bar(i, progress)
    -- Ensure progress is between 0 and 1
    progress = math.max(0, math.min(1, progress))

    local width = 128 / (#channel_variants + 1)
    local height = 50
    local x = -width + 2
    local y = 15

    local barHeight = height * progress
    if i == ch_param.selected then
        lcd.drawRectangle(x + ((width + 1) * i), (height - barHeight) + y,
width, barHeight)
    else
        lcd.drawFilledRectangle(x + ((width + 1) * i), (height - barHeight)
+ y, width, barHeight)
    end
end

local function lcd_draw_error(error_str1, error_str2)

```

```

    lcd.clear()
    lcd.drawText(2, 15, "Error:")
    lcd.drawText(2, 25, error_str1)
    lcd.drawText(2, 35, error_str2)
end

----- Working -----

local function select_min_rssi_channel(signal_array)
    local min_value = 1.
    local min_value_no = 1
    for i = 1, #signal_array do
        local value = signal_array[i]
        if value < min_value then
            min_value = value
            min_value_no = i
        end
    end
    return min_value_no
end

local function select_channel_with_threshold(signal_array, threshold)
    local valid_channels = {}
    for i = 1, #signal_array do
        local value = signal_array[i]
        if value < threshold then
            table.insert(valid_channels, i)
        end
    end

    if #valid_channels > 0 then
        return valid_channels[math.random(1, #valid_channels)]
    else
        return math.random(1, #signal_array) -- Fallback to random
selection if no channels meet the threshold
    end
end

local function monitor_signals()
    local min_in, max_in = -1024, 1024
    local index_ch_value = getOutputValue(19)
    local strenght_ch_value = getOutputValue(20)

```

```

    local signal_no = math.floor((index_ch_value - min_in) / (max_in -
min_in) * 9)
    local signal_strenght = (strenght_ch_value + max_in) / (max_in * 2)

    if signal_no == 0 then
        -- clear all signals
        for i = 1, #signal_strenght_arr do
            signal_strenght_arr[i] = 0
        end
    else
        signal_strenght_arr[signal_no] = signal_strenght
    end

    if getTime() - last_manual_change_time > block_duration then
        ch_param.next = select_min_rssi_channel(signal_strenght_arr)
    end
end

----- Reacting -----
local function send_ch_switch_command(channel)
    local band = 0 -- Band A
    local vtx_idx = (band * 8) + (channel - 1)

    local CRSF_FRAMETYPE_COMMAND = 0x32
    local CRSF_ADDRESS_CRSF_TRANSMITTER = 0xEE
    local CRSF_ADDRESS_ELRS_LUA = 0xEF
    local CRSF_COMMAND_CHANGE_VIDEO_CHANNEL = 0x11

    crossfireTelemetryPush(CRSF_FRAMETYPE_COMMAND, {
        CRSF_ADDRESS_CRSF_TRANSMITTER, -- Destination address
        CRSF_ADDRESS_ELRS_LUA, -- Origin address
        CRSF_COMMAND_CHANGE_VIDEO_CHANNEL, -- Command
        vtx_idx,
    })
end

local exit = 0
local function handle_event(event)
    if event == EVT_VIRTUAL_EXIT then -- Cancel edit / go up a folder /
reload all
        exit = 1
    elseif event == EVT_VIRTUAL_NEXT then
        ch_param.next = ch_param.next + 1
    end
end

```

```

        last_manual_change_time = getTime()
elseif event == EVT_VIRTUAL_PREV then
    ch_param.next = ch_param.next - 1
    last_manual_change_time = getTime()
end
end

----- MAIN FUNCTIONS -----
local ch_changed = 0
local function background()
    monitor_signals()

    if getValue("se") > 0 then
        if ch_changed then
            ch_param.selected = ch_param.next
            send_ch_switch_command(ch_param.selected)
        end
        ch_changed = 1
    else
        ch_changed = 0
    end
end
end

local function run(event)
    handle_event(event)

    lcd.clear()
    draw_text_select(ch_param, 2)
    for i = 1, #signal_strenght_arr do
        draw_signal_strenght_bar(i, signal_strenght_arr[i])
    end
    lcd.drawRectangle(0, 12, 128, 2)
end

local function init()
end

return { init = init, run = run, background = background }

```

Модуль «SyncAndUnmount.bat».

```
@echo off
setlocal

if "%~1"==" " (
    echo Usage: %~nx0 [disk]
    exit /b 1
)

set "DISK=%~1"
set "DISK=%DISK:~0,1%"
for %%I in (%DISK%) do set "DISK=%%~I:"
set "DISK=%DISK:~0,1%:"

set "SOURCE=.\TELEMETRY"
set "DESTINATION=%DISK%\SCRIPTS\TELEMETRY"
set "FILENAME=scan.lua"

:: Run Robocopy to copy only scan.lua
robocopy "%SOURCE%" "%DESTINATION%" "%FILENAME%"

:: Unmount the drive after sync completed
powershell -Command "(New-Object -comObject
Shell.Application).Namespace(17).ParseName('%DISK%').InvokeVerb('Eject')"

endlocal
```

ДОДАТОК Б

ЛІСТИНГ ВБУДОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СКАНЕРА РАДІОЕФІРУ

Модуль «main.cpp».

```

#include "ESP32_C3_TimerInterrupt.h"
#include <Arduino.h>

#include "PPM.h"
#include "rssi_filter.h"
#include "rx5808.h"

// --- Instance ---
ESP32TimerInterrupt timer(0);
PPM ppm(4);
RSSIFilter filter;
RX5808 vrx(1, 10, 7, 9);
Frequency_t channels[] = {CHANNEL_A1, CHANNEL_A2, CHANNEL_A3, CHANNEL_A4,
CHANNEL_A5, CHANNEL_A5, CHANNEL_A7, CHANNEL_A8};

bool IRAM_ATTR timerCallback(void* timer_no) { return ppm.onTimer(); }

inline static void setPPMChannel(uint8_t channel_no) {
    static constexpr uint16_t channels_count = 9;
    static constexpr float channel_step = 1000. / channels_count;
    static constexpr float channel_offset = 1.5;
    static constexpr uint16_t ppm_offset = 1000;

    uint16_t channel_ppm = ppm_offset + channel_step * (channel_offset +
channel_no);
    Serial.printf("ch %u; ", channel_no + 1);
    ppm.setChannelValue(0, channel_ppm);
}

inline static void setPPMChannelValue(uint8_t channel_no, uint16_t
channel_value_mv) {
    Serial.printf("voltage: %4umV\n", channel_value_mv);

    // Convert the value to PPM (1000-2000)

```

```

    uint16_t channel_value_ppm = map(channel_value_mv, 300, 1300, 1000,
2000);
    if (channel_value_ppm > 2000) {
        channel_value_ppm = 2000;
    }
    ppm.setChannelValue(1, channel_value_ppm);
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    ppm.begin();
    timer.attachInterruptInterval(ppm.getTimerInterval(), timerCallback);
}

void loop() {
    for (uint8_t i = 0; i < sizeof(channels) / sizeof(channels[0]); i++) {
        // Change the channel of VRX first
        vrx.SendIndexCmd(channels[i]);
        delay(5);

        // Harvest the RSSI value
        static constexpr uint8_t samples = 10;
        for (uint8_t sample = 0; sample < samples; sample++) {
            uint16_t voltage = vrx.GetRSSIVoltage();
            filter.add(voltage);
            delay(5);

            if (sample == (samples / 3)) {
                // In the first third if cycle time
                // Zero the channel value to ignore value during first
moments of the channel change
                setPPMChannelValue(i, 0);
            } else if (sample == (samples / 3 * 2)) {
                // In the second third if cycle time
                // Select channel to write via PPM
                setPPMChannel(i);
            }
        }

        setPPMChannelValue(i, filter.getFiltered()); // Write value via
PPM
    }
}

```


ДОДАТОК Г
(обов'язковий)

КОПІЯ МАТЕРІАЛІВ КОНФЕРЕНЦІЇ MIT 2025

Modern Information Technology 2025/Сучасні Інформаційні Технології 2025

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛІ СПЕЦІАЛІСТА Чорба Р.В. канд. техн. наук, професор Кунгурцев О.Б. Національний університет «Одеська політехніка», УКРАЇНА	266
СЕКЦІЯ «МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ»	
SYSTEMATIC ANALYSIS OF AI USAGE IN BIOGAS PRODUCTION AND ANAEROBIC TREATMENT Usenko S., Klymenko M., Ovcharenko K. Ph.D., Associate Professor, Shapovalov Ye., Ph.D., Associate Professor, Nosachova Yu. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, The National University of Food Technologies, UKRAINE	270
ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ КЛАСУ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НА ОСНОВІ АПАРАТУ ВАРІАЦІЙНИХ НЕРІВНОСТЕЙ Прокоф'єв А. Ю., Руський П. В. д-р техн. наук, професор Положаєнко С.А. Національний університет «Одеська політехніка», Україна	273
ШВИДКИЙ АЛГОРИТМ ПОШУКУ ЦЕНТРОІДА НА ГРАФАХ ЦИКЛІЧНОЇ ТА ДЕРЕВНОЇ СТРУКТУРИ Ковач Д.О., Сідельников М.В. канд. техн. наук, доцент Дрозд Ю.В. Національний університет «Одеська політехніка», Україна	276
ПОБУДОВА ПРОСТОРУ ОЗНАК НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОКО-РУХОВОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ Лукашук Д. К. д-р техн. наук, професор Павленко В. Д. Національний університет «Одеська політехніка», УКРАЇНА	279
СЕКЦІЇ «ПРОЕКТУВАННЯ І ДІАГНОСТИКА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ І МЕРЕЖ»; «КОМП'ЮТЕРНІ ТА РОБОТОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПОНЕНТИ»	
АРХІТЕКТУРА, ЕВОЛЮЦІЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ (PON) Клименко О. С. канд. пед. наук, доцент Павленко М. П. Бердянський державний педагогічний університет, УКРАЇНА	283
ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖЕВОЇ КОМУНІКАЦІЇ ТА ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ЧЕРЕЗ "ЗВОРОТНИЙ" REST-API І МОДИФІКАЦІЮ HTTP/2 В АРХІТЕКТУРІ DISPATCHER-DEPLOYER-EXECUTOR Сурков С. канд. техн. наук, доцент Мартинюк О.М. Національний університет «Одеська політехніка», УКРАЇНА	286
МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АДАПТАЦІЇ ТА РОЗГОРТАННЯ ХМАРНИХ CRM СИСТЕМ Мельник Д. С. Ph.D., старший викладач Іванов О. В. Національний університет «Одеська політехніка», УКРАЇНА	289
АНАЛІЗ ПОТЕНЦІАЛУ ДИФУЗІЙНИХ ІМОВІРНІСНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ СИНТЕТИЧНОГО МЕРЕЖЕВОГО ТРАФІКУ Науменко Р. І., Буяюклі В. С. канд. фіз.-мат. наук, доцент Тішин П. М. Національний університет «Одеська політехніка», УКРАЇНА	292

УДК 621.396:004.89

МЕТОД І КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА СКАНЕРУ РАДІОЕФІРУ ДЛЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ВИБОРУ ЧАСТОТНИХ ДІАПАЗОНІВ

Гериш В. С.

к. т. н., доцент, Іванов Олексій Валентинович
Хмельницький національний університет, УКРАЇНА

АНОТАЦІЯ. Запропоновано метод і архітектуру кіберфізичної системи сканування радіоефіру для автоматичного вибору частотного каналу FPV-дронів. Реалізовано систему на базі ESP32C3 та EdgeTX з LUA-скриптом, що забезпечує аналіз рівня сигналу та динамічне перемикання каналів. Отримано зменшення рівня завад і підвищення стабільності відеозв'язку в умовах перевантаженого спектра.

Вступ. У сучасних бойових умовах стабільний відеозв'язок з FPV-дроном є критично важливим для успішного виконання завдань. Поширені аналогові системи мають низку переваг, зокрема чутливість, простоту реалізації та низьку вартість. Однак вони страждають від обмеженого частотного ресурсу та високої взаємної завадності при масовому використанні. Це створює потребу в інтелектуальних системах, здатних адаптивно обирати оптимальні канали зв'язку. Зростаюча щільність FPV-дронів в ефірі потребує розробки нових методів вибору частот, що забезпечують високу якість зв'язку в реальному часі.

Мета роботи. Метою роботи є підвищення надійності відеозв'язку FPV-дронів шляхом створення кіберфізичної системи сканера радіоефіру з функцією автоматичного вибору оптимального частотного каналу. Для цього необхідно проаналізувати існуючі технології передачі відео в FPV-системах, виявити основні проблеми, пов'язані з обмеженим частотним ресурсом та високим рівнем взаємних завад, а також розробити архітектуру системи, що включає модуль сканування на базі ESP32C3 та елемент керування на основі EdgeTX. Крім того, потрібно реалізувати алгоритм сканування та оцінки спектральної завантаженості в реальному часі, що дозволить дрону швидко адаптуватися до змін у радіоефірі. Завершальним етапом є оцінка ефективності запропонованого рішення в умовах підвищеної щільності використання ефіру.

Основна частина роботи. Безперервний розвиток FPV технологій потребує нових методів забезпечення стабільного та якісного відеозв'язку між дроном та наземною станцією керування. Традиційні аналогові системи передачі відеосигналу використовують фіксовані або ручні перемикання частот, що не завжди забезпечує оптимальні умови передачі. У даній роботі запропоновано метод автоматичного вибору частотного діапазону на основі аналізу радіоефіру, що реалізується у складі кіберфізичної системи сканера радіоефіру. Це дозволяє дронам автоматично адаптуватися до змінних умов і обирати найкращий доступний канал, мінімізуючи ризик втрати сигналу та покращуючи ефективність виконання бойових завдань.

У бойових умовах FPV-дрони часто використовують аналоговий відеозв'язок. Це зумовлено кількома ключовими причинами. По-перше, аналогові системи значно дешевші за цифрові аналоги, що робить їх доступними для широкого застосування, особливо в умовах масового виробництва та бойового використання. По-друге, аналоговий зв'язок має значну перевагу у чутливості, дозволяючи отримувати прийнятний сигнал навіть у складних умовах перешкод та слабого сигналу, що робить його більш надійним у середовищах з високим рівнем завад [1]. По-третє, аналогові системи широко доступні, оскільки не потребують складних цифрових декодерів і спеціалізованого обладнання, що полегшує їх впровадження та експлуатацію. По-четверте, велика сумісність між різними приймачами та передавачами дозволяє операторам використовувати компоненти від різних виробників без необхідності точного узгодження обладнання, що особливо важливо у військових застосуваннях, де швидка адаптація є критичною.

Як приклад можна розглянути частотні канали, доступні на мікросхемі RTC6715. Ця мікросхема працює в частотному діапазоні 5.8 ГГц і підтримує певний набір каналів із фіксованою шириною смуги пропускання. Враховуючи типову ширину каналу близько 20 МГц,

Modern Information Technology 2025/Сучасні Інформаційні Технології 2025

кількість реально доступних незалежних каналів у спектрі 5.8 ГГц є суттєво обмеженою [2]. Додатково, враховуючи перекриття спектрів сусідніх каналів, виникає взаємне заважання, що ще більше зменшує ефективну кількість можливих каналів зв'язку. У реальних умовах це означає, що при одночасному використанні великої кількості FPV-дронів частина каналів буде взаємно накладатися, що знижує якість сигналу та підвищує ймовірність втрати зв'язку.

Для оцінки впливу перекриття можна виконати розрахунок, враховуючи ширину смуги пропускання та мінімальну відстань між каналами. Наприклад, якщо використовується 8 стандартних каналів у діапазоні 5.8 ГГц з інтервалом у 20-25 МГц, фактична кількість стабільних каналів буде меншою через взаємні перешкоди. Таким чином, можна оцінити, що у бойових умовах одночасно може працювати приблизно 3-4 незалежних екіпажі FPV-дронів без значного впливу інтерференції. Це створює серйозні обмеження та вимагає впровадження адаптивних систем вибору каналів, таких як запропонована у даній статті. Використання динамічного аналізу спектру та автоматичного перемикання частот дозволяє зменшити ймовірність конфліктів між каналами та покращити якість зв'язку у складних умовах бойових дій[3].

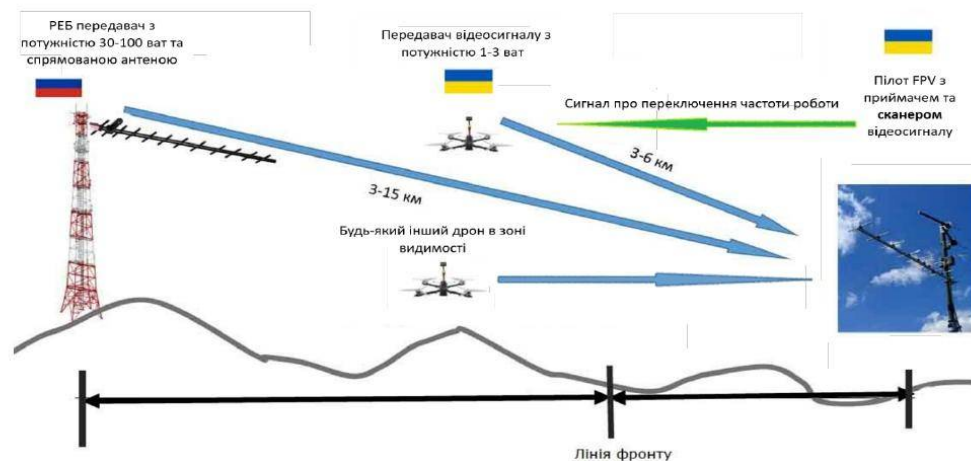


Рисунок 1 – Загальна схема роботи запропонованої системи

Запропонований на рисунку 1 сканер є окремою кіберфізичною системою, що складається з приймача відеосигналу та контролера ESP32C3. Він з'єднаний з пультом керування, що працює на базі прошивки EdgeTX.

Пульт містить LUA-скрипт, який візуалізує результати сканування та обирає найоптимальніший канал з переліку доступних. Система сканування працює у безперервному режимі, постійно аналізуючи рівень сигналу (RSSI) на доступних частотах. Це дозволяє виявляти як короточасні, так і довготривалі перешкоди, враховуючи зміни в радіофері в реальному часі.

Процес вибору оптимального каналу включає кілька етапів. Спочатку система виконує сканування всіх доступних частот, фіксуючи рівень сигналу для кожного каналу. Потім отримані дані аналізуються, і вибирається канал із найменшим рівнем перешкод. Вибраний канал миттєво передається на дрон і відеоприймач після натискання кнопки на пульті, що забезпечує швидку адаптацію до змін у радіофері. Завдяки використанню ESP32C3, система може працювати з низьким енергоспоживанням, що є критично важливим для мобільних FPV-платформ.

Таке рішення має значні переваги перед ручним перемиканням каналів. Повільне перемикання (близько двох секунд) майже не залишає права на помилку, тому дуже бажано, щоб канал, на який йде перемикання, був вільний. Також перемикання на вже зайнятий канал може сильно зашкодити союзникам, якщо їх сигнал значно слабший за наш. У таких умовах система автоматичного вибору оптимального каналу суттєво зменшує ризики випадкового перешкоджання іншим FPV-екіпажам.

Modern Information Technology 2025/Сучасні Інформаційні Технології 2025

При розробці рішення був використаний модульний підхід. Елементи сканера будуть неважко інтегрувати в існуючі екосистеми наземних станцій, ретрансляторів та дронів. Така гнучкість дозволяє адаптувати систему до різних сценаріїв використання, підвищуючи її універсальність та ефективність. Інтеграція з існуючими платформами відкриває можливості для масштабування рішення та його подальшого вдосконалення в залежності від специфічних потреб користувачів.

Таким чином, впровадження даної системи забезпечує значне підвищення стійкості відеозв'язку, особливо в умовах перевантаженого радіоефіру. Вона дозволяє екіпажам FPV-операторів ефективно уникати взаємних завад та підвищувати загальну ефективність виконання місій. Використання автоматизованого підходу до вибору частотного діапазону відкриває перспективи для подальшої інтеграції з більш складними алгоритмами управління та штучного інтелекту для ще більшої адаптивності у бойових умовах.

Висновки. Запропонована кіберфізична система забезпечує автоматичний вибір частотного каналу з урахуванням поточної завадозахищеності, що дозволяє FPV-операторам працювати в складних умовах з високою щільністю каналів. Проведений аналіз показує, що одночасно можуть стабільно працювати лише 3–4 екіпажі без завад — впроваджене рішення дозволяє збільшити цю кількість за рахунок динамічного управління частотами. Архітектура системи легко масштабується та інтегрується в існуючі комплекси. Результати демонструють підвищення стабільності зв'язку та зниження ризику втрати відеосигналу, що критично важливо для успішного виконання бойових місій FPV-дронів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Salmerón A., Parra L., Quiles F.J., Palomares A., Alcaraz J.J., Palazón V. Frequency Management Automation System for FPV Drone Pilots Using AI and Embedded Systems // *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 16. Article 6013. DOI: 10.3390/s22166013.
2. RTC6715 5.8GHz Audio/Video Transmitter IC. Datasheet. URL: https://cdn.ozdisan.com/ETicaret_Dosya/582271_6664727.PDF (дата звернення: 21.03.2025).
3. Fotouhi A., Qiang H., Ding M., Hassan M., Giordano L.G., Vishal Sharma Advances in Drone Communications, State-of-the-Art and Architectures // *Drones*. 2019. Vol. 3, No. 1. Article 14. DOI: 10.3390/drones3010014.

METHOD AND CYBER-PHYSICAL SYSTEM FOR RADIO SPECTRUM SCANNING AND FREQUENCY BAND SELECTION

Herysh Vodmyr

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ivanov Oleksii

Khmelnytskyi National University, UKRAINE

ANNOTATION. A method and architecture of a cyber-physical radio spectrum scanning system for automatic FPV channel selection are proposed. The system is implemented using ESP32C3 and EdgeTX with a LUA script for signal level analysis and dynamic switching. The solution reduces interference and improves video link stability under congested spectrum conditions.

ДОДАТОК Д
(обов'язковий)
ПРЕЗЕНТАЦІЯ ДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Метод і кіберфізична система сканеру радіоефіру для прийняття рішень вибору частотних діапазонів

Автор: Гериш Володимир



Мета і завдання роботи

Мета : розробка методу і кіберфізичної системи сканування радіоефіру для підвищення стабільності відеозв'язку FPV-дрона.

Завдання:

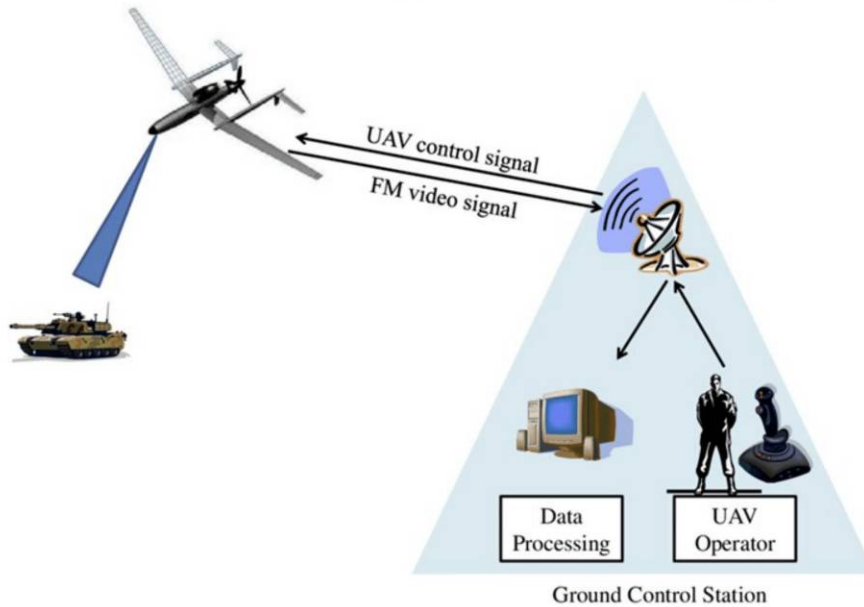
- аналіз сучасних аналогових FPV-систем;
- виявлення проблем спектрального перевантаження;
- розробка алгоритму вибору оптимального каналу;
- створення програмної реалізації для EdgeTX.

FPV (First Person View)

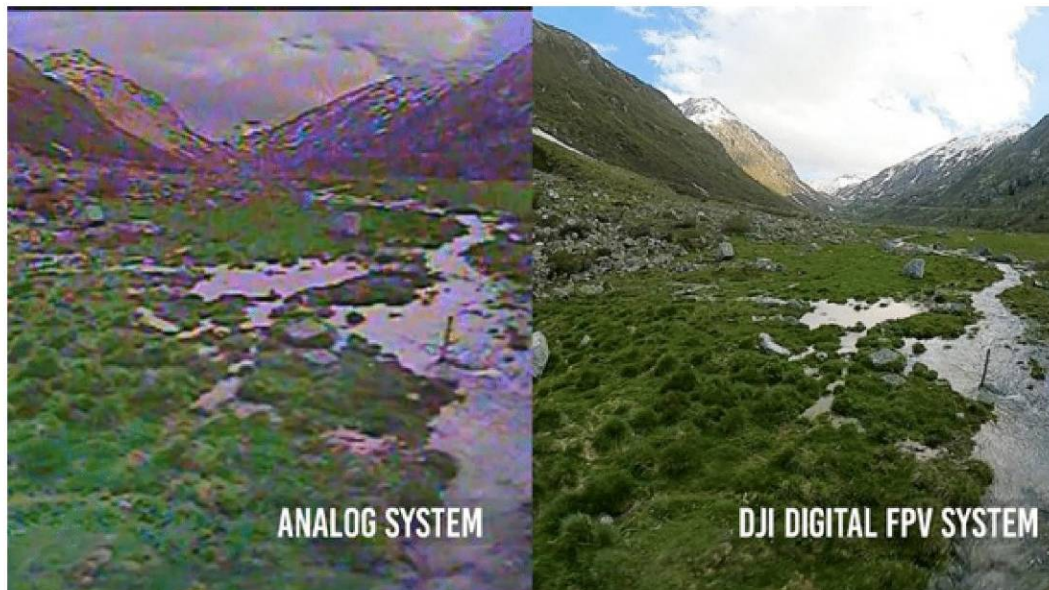
БПЛА з можливістю пілота працювати з точки зору бортової камери



Мінімально необхідна система керування



Цифровий відеозв'язок VS аналоговий

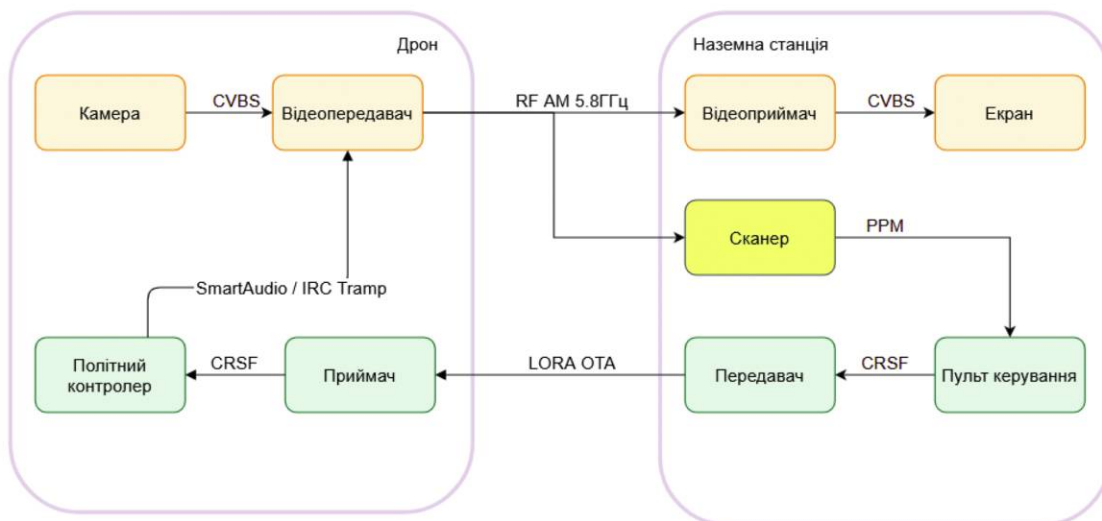


РЕБ «Штора» Інтелектуальна система подавлення відеосигналу

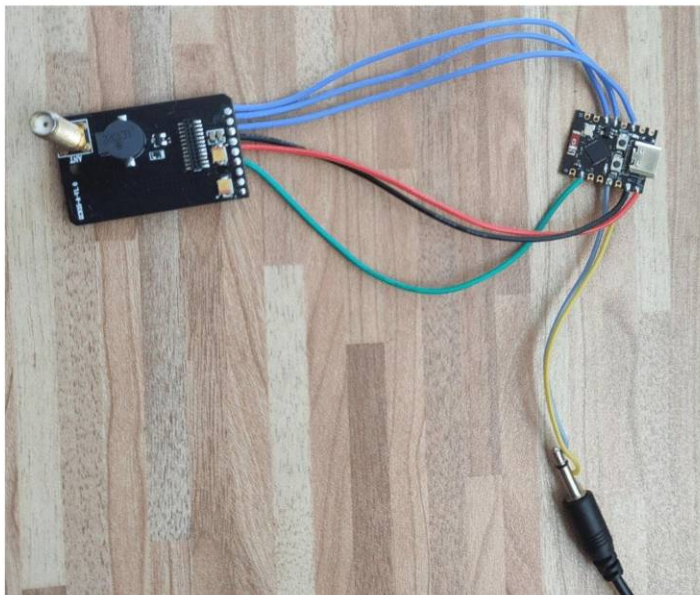


Схема інтеграції сканеру радіоефіру

Не потребує внесення масових змін у інші елементи



Прототип Hardware



**MVP схеми електричної
принципової, для
написання прошивки та
проведення
експериментів.**

GUI скрипту на пульті

Скрипт опрацьовує дані з сканера та візуалізує їх



Способи переключення каналу

Користувачу пропонуються кілька опцій на вибір, для використання у різноманітних ситуаціях

- Вручну, за допомогою GUI скрипта.
- За мінімальним рівнем RSSI.
- З використання псевдовипадкової послідовності, для ускладнення роботи РЕБ.

Anti-Plagiarism v-15.274 Educational

The maximum coincidence with one document 0.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. Errors in the documents: 10%

ID: 241239 Title: МКР Метод і кіберфізична система сканеру радіоєфіру для прийняття рішень вибору частотних діапазонів Added in a DB: 2025-05-16 Authors: Володимир ГЕРИШ Heads: Олексій ІВАНОВ Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	132517	986	1437 (1%)	18 (2%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Володимир ГЕРИШ

Співавтор:

Назва: Гериш_Метод і кіберфізична система сканеру радіоєфіру для прийняття рішень вибору частотних діапазонів

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 2.1%

Коефіцієнт подібності 2: 1.1%

Мікропробіли: 14

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Блілі знаки: 1

Дата створення звіту: 2025-05-16 07:11:03.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укрити плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-05-16

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач: Володимир ГЕРИШ

Тема: Метод і кіберфізична система сканеру радіоефіру для прийняття рішень вибору частотних діапазонів

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи магістра:

Кількість листів креслень —; кількість сторінок записки 109

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі запропоновано систему сканування радіоефіру в контексті керування FPV БПЛА

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню _____

Кваліфікаційна робота магістра відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено огляд рішень у сфері зв'язку та спектрального моніторингу для БПЛА. Досліджено відомі рішення та засоби в цій сфері. У другому розділі проведена розробка методу вибору частотного діапазону. У третьому розділі спроектований проект системи сканування та керування радіочастотами. У четвертому розділі проведена оцінка ефективності запропонованого рішення та системи

4. Позитивні сторони роботи: Запропонована система сканування радіоефіру в контексті застосування БПЛА, дозволяє суттєво збільшити витривалість системи до впливу ворожих засобів РЕБ та має перспективи інтеграції в уже існуючі екосистеми.

5. Негативні сторони роботи: Мало уваги приділено питанню подальшого розвитку системи

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи:
Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно з діючими стандартами оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: В загальному робота виконана на доброму рівні.

8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка кваліфікаційної роботи магістра:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої кваліфікаційної роботи магістра вважаю, що робота заслуговує оцінки «добре» 4.0 (В)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) _____
д.т.н., професор, Мартинюк В.В., завідувач кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

“ 21 травня ” _____ 2025р.



Завідувачу кафедри КІС
доктору філософії, доценту
Ользі ПАВЛОВІЙ

Гериша Володимира Сергійовича

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2м-23-2

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

20 травня 2025 року



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованою системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Метод і кіберфізична система сканеру радіоефіру для прийняття рішень вибору частотних діапазонів

Автор: Гериш Володимир Сергійович

Спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-наукова

Науковий керівник: Іванов Олексій Валентинович, к.т.н., доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та дорацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) запозичення розміщені в розділах є радше випадковими, через знайдені системою лише короткі, до 40 слів, фрагменти;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 3) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 4) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до мікропробілів, та нестандартних символів, що являється результатом неправильної міграції між різними текстовими редакторами.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 2.12% і адресується до 10 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 2.1%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

Гарант ОП

Завідувач кафедри КІС

Олексій ІВАНОВ

Олег САВЕНКО

Ольга ПАВЛОВА