

Міністерство освіти та науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет ІК
(повна назва)

Кафедра інформаційно-мережної інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Аналіз обладнання відеозв'язку FPV БПЛА
(тема)

Виконав:

здобувач 2 курсу, групи ІМІм-24-1

Головенко О.О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Електронні комунікації
та радіотехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформаційно
мережна інженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. ІМІ Іваненко С.А.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри _____
(підпис)

Микола МОСКАЛЕЦЬ
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування

Здобувач Головенко О.О. _____

Керівник доц. каф. ІМІ Іваненко С.А. _____

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет ІК

Кафедра інформаційно-мережної інженерії

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Інформаційно мережна інженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Головенко Олексію Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз обладнання відеозв'язку FPV БПЛА

затверджена наказом університету від 24 _____ 10 _____ 2025 р. № 959Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 24 _____ 12 _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Провести аналіз аналогових та цифрових систем відеозв'язку FPV з урахуванням обмежень затримки та якості зображення. Розрахувати енергетичний бюджет радіолінії для визначення максимальної дальності та розробити рекомендації щодо вибору обладнання для різних сценаріїв експлуатації.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі Аналіз технологій та архітектури систем відеозв'язку FPV. Порівняльна характеристика аналогових і цифрових платформ. Розробка методики вибору обладнання для типових сценаріїв. Розрахунок енергетичного потенціалу та дальності радіолінії.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускної кафедри) Структурна схема організації каналу відеозв'язку FPV. Графік порівняльної характеристики деградації аналогового та цифрового сигналів. Діаграма Парето-ефективності вибору обладнання. Схема розрахунку зони Френеля та впливу перешкод. Графік залежності втрат у вільному просторі (FSPL) від дистанції.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання, аналіз літератури та патентний пошук за темою FPV-систем	01.09.2025 – 25.09.2025	Виконано
2	Аналіз архітектури та порівняння стандартів відеозв'язку (Розділи 1-2)	26.09.2025 – 23.10.2025	Виконано
3	Розробка методики вибору обладнання та оптимізація рішень (Розділ 3)	24.10.2025 – 15.11.2025	Виконано
4	Математичне моделювання та розрахунок енергетичного бюджету радіолінії (Розділ 4)	16.11.2025 – 30.11.2025	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки, підготовка графічного матеріалу та презентації	01.12.2025 – 10.12.2025	Виконано
6	Проходження нормоконтролю та подання роботи до екзаменаційної комісії	11.12.2025 – 24.12.2025	Виконано

Дата видачі завдання 24 10 2025р.

Здобувач Головенко О.О.

Керівник роботи _____

доц. каф. ІМІ Іваненко С.А

(підпис)

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 43 с., 5 рис., 1 табл., 1 додаток, 16 джерел.

Об'єкт роботи – процес організації каналу відеозв'язку в FPV-системах безпілотних літальних апаратів.

Мета роботи – підвищення ефективності вибору обладнання відеозв'язку FPV БПЛА шляхом проведення комплексного аналізу та порівняння сучасних аналогових і цифрових систем.

Проведено аналіз сучасного стану технологій відеозв'язку для БПЛА та визначено сфери їх застосування. Здійснено класифікацію існуючих систем на аналогові та цифрові, розглянуто принципи їх роботи та особливості експлуатації. Детально проаналізовано технічні характеристики провідних екосистем: DJI, Walksnail, HDZero та аналогових рішень. Визначено ключові проблеми, зокрема компроміс між затримкою та якістю зображення. На основі багатокритеріального аналізу розроблено практичні рекомендації щодо вибору обладнання. Виконано розрахунок максимальної дальності радіозв'язку для діапазону 5.8 ГГц з урахуванням енергетичного бюджету лінії.

FPV-СИСТЕМИ, БПЛА, ВІДЕОЗВ'ЯЗОК, АНАЛОГОВА ПЕРЕДАЧА,
ЦИФРОВА ПЕРЕДАЧА, DJI O3, HDZERO, ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ, ДАЛЬНІСТЬ
ЗВ'ЯЗКУ, SWAP.

THE ABSTRACT

Explanatory slip 43 p., 5 fig., 1 tab., 1 app., 16 sources.

The object of the study is the process of organizing a video communication channel in FPV systems of unmanned aerial vehicles.

The purpose of the work is to improve the efficiency of selecting FPV UAV video communication equipment by conducting a comprehensive analysis and comparison of modern analog and digital systems.

An analysis of the current state of video communication technologies for UAVs has been conducted, and their fields of application have been determined. A classification of existing systems into analog and digital has been carried out; their operating principles and operational features have been considered. The technical characteristics of leading ecosystems—DJI, Walksnail, HDZero, and analog solutions—have been analyzed in detail. Key problems have been identified, in particular the trade-off between latency and image quality. Based on multi-criteria analysis, practical recommendations regarding the choice of equipment for sports piloting and cinematic filming have been developed. Calculation of the maximum radio communication range for the 5.8 GHz band has been performed, taking into account the link budget.

FPV SYSTEMS, UAV, VIDEO COMMUNICATION, ANALOG TRANSMISSION, DIGITAL TRANSMISSION, DJI O3, HDZERO, INTERFERENCE IMMUNITY, COMMUNICATION RANGE, SWaP

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ.....	8
ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДЕОЗВ'ЯЗКУ FPV БПЛА.....	12
1.1 Сфери застосування FPV БПЛА	12
1.2 Огляд існуючих технологій відеозв'язку для БПЛА	13
1.3 Проблематика використання відеообладнання.....	15
2. АНАЛІЗ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ СИСТЕМ ВІДЕОЗВ'ЯЗКУ БПЛА.....	17
2.1 Аналогові системи	17
2.2 Цифрові системи	19
2.3 Порівняльний аналіз аналогових та цифрових FPV систем.....	21
2.4 Аналіз вимог до обладнання відеозв'язку	23
3 РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ВИБОРУ ОБЛАДНАННЯ.....	25
3.1 Рекомендації щодо застосування систем.....	25
3.2 Обґрунтування вибору для типових завдань.....	26
3.3 Багатокритеріальний аналіз	28
4. РОЗРАХУНОК МАКСИМАЛЬНО ДИСТАНЦІЙ РАДІОЗ'ЯЗКУ.....	31
4.1 Особливості поширення радіохвиль сантиметрового діапазону....	31
4.2 Методика розрахунку енергетичного бюджету радіолінії.....	33
4.3 Результати розрахунків.....	35
ВИСНОВКИ.....	37
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	39
ДОДАТОК А	41
ДОДАТОК Б.....	43

СКРОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

- CVBS – Composite Video Baseband Signal (Композитний відеосигнал)
- EIRP – Effective Isotropic Radiated Power (Ефективна ізотропно випромінювана потужність)
- FPV – First Person View (Вид від першої особи)
- FSPL – Free-Space Path Loss (Втрати у вільному просторі)
- HD – High Definition (Висока чіткість)
- LOS – Line of Sight (Пряма видимість)
- NLOS – Non-Line of Sight (Поза прямою видимістю)
- NTSC – National Television System Committee
- OFDM – Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (Ортогональне частотне мультиплексування)
- PAL – Phase Alternating Line
- SD – Standard Definition (Стандартна чіткість)
- SWaP – Size, Weight, and Power (Розмір, вага та енергоспоживання)
- VRX – Video Receiver (Відеоприймач)
- VTX – Video Transmitter (Відеопередавач)
- БПЛА – Безпілотний літальний апарат
- ГГц – Гігагерц
- дБ – Децибел
- дБм – Децибел-міліват
- мВт – Міліват
- МГц – Мегагерц
- УКХ – Ультракорткі хвилі

ВСТУП

Протягом останнього десятиліття розвиток безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) набув ознак технологічної революції, трансформувавши цей напрям із вузькоспеціалізованого сегмента в критично важливий інструмент забезпечення ефективності у цивільних, промислових та військових сферах. Інтеграція БПЛА в сучасні інформаційно-керуючі системи докорінно змінила методологію аерофотозйомки, моніторингу інфраструктури, логістики, точного землеробства та оборонних операцій [1]. Визначальним фактором, що забезпечує можливість виконання місій у режимі реального часу, є надійність та інформативність каналу передачі даних «борт–земля». Ключовим елементом цієї архітектури виступає система відеозв'язку FPV (First Person View), яка замикає контур дистанційного керування, забезпечуючи трансляцію відеопотоку з курсової камери на термінальне обладнання оператора [2].

Параметри якості обслуговування (QoS) відеоканалу — стабільність, роздільна здатність та латентність — мають безпосередній вплив на безпеку польотів, точність маневрування та успішність виконання поставлених завдань. Сучасний ринок FPV-обладнання перебуває на етапі технологічного переходу: традиційні аналогові системи (CVBS), досягнувши фізичної межі свого розвитку, поступаються місцем цифровим технологіям передачі даних. Останні забезпечують високу чіткість зображення (HD/Full HD), проте вносять специфічні обмеження, пов'язані зі змінною затримкою (jitter), дискретним характером деградації сигналу та підвищеними вимогами до енергетичного бюджету радіолінії [3].

У цих умовах проблема вибору оптимальної архітектури відеозв'язку набуває характеру багатокритеріальної оптимізації. Інженери та оператори змушені шукати компроміс між взаємовиключними вимогами: мінімізацією затримки для збереження керованості в динамічних режимах, максимізацією деталізації зобра-

ження для задач розвідки, забезпеченням завадостійкості в умовах складної електромагнітної обстановки та дотриманням жорстких обмежень щодо масогабаритних показників і енергоспоживання (SWaP) [4].

Відсутність у відкритих джерелах систематизованого наукового аналізу, який би поєднував розгляд фізичних принципів передачі сигналів із практичними аспектами експлуатації в реальних умовах, ускладнює процес обґрунтованого вибору компонентної бази. Більшість існуючих рішень приймаються емпіричним шляхом, що не гарантує ефективності. Таким чином, наукове обґрунтування вибору та порівняльний аналіз сучасного обладнання відеозв'язку FPV БПЛА є актуальним науково-технічним завданням.

Метою магістерської роботи є підвищення ефективності процедури вибору обладнання відеозв'язку FPV БПЛА шляхом проведення комплексного аналізу та системного порівняння параметрів сучасних аналогових і цифрових каналів передачі даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- здійснити аналіз сучасного стану технологій відеозв'язку FPV БПЛА, визначивши специфіку їх застосування у різних галузях;
- сформулювати та систематизувати ключові технічні вимоги та критерії ефективності FPV-обладнання залежно від типу виконуваних завдань;
- провести класифікацію та поглиблений аналіз архітектури сучасних аналогових і цифрових систем відеозв'язку з розглядом принципів їх функціонування;
- виконати порівняльний аналіз систем за ключовими техніко-економічними показниками (латентність, якість зображення, завадостійкість, вартість);
- розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору комплексу обладнання для вирішення типових сценаріїв застосування (на прикладі двох різнопланових місій);

- провести теоретичний розрахунок граничних дистанцій радіозв'язку для обраних комплектів обладнання з урахуванням енергетичного бюджету лінії та особливостей поширення радіохвиль.

Об'єкт дослідження – процес організації каналу відеозв'язку в FPV-системах безпілотних літальних апаратів.

Предмет дослідження – сукупність технічних характеристик, методів обробки сигналу та параметрів ефективності сучасного аналогового та цифрового обладнання для передачі відеоданих.

Результати роботи становлять собою систематизований методичний матеріал для інженерного обґрунтування вибору FPV-обладнання, оформлений згідно з чинними стандартами. Розроблені рекомендації та результати порівняльного аналізу можуть бути використані при проектуванні нових зразків БПЛА, оптимізації існуючих платформ під конкретні задачі (дрон-рейсинг, кінематографія, моніторинг), а також у навчальному процесі підготовки фахівців. Запропоновані розрахункові моделі дальності зв'язку дозволяють прогнозувати експлуатаційну надійність радіоліній до етапу польових випробувань.

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДЕОЗВ'ЯЗКУ FPV БПЛА

1.1 Сфери застосування FPV БПЛА

Інтеграція технології FPV (First Person View) у безпілотні авіаційні комплекси забезпечила перехід від пілотування в межах прямої видимості до повноцінного інструментального керування на значних відстанях. Специфіка конкретних прикладних задач визначає пріоритетні вимоги до каналів передачі відеоданих, формуючи різні підходи до вибору апаратного забезпечення.

У сфері спортивного пілотування та дрон-рейсингу, де динаміка польоту передбачає швидкості понад 150 км/год та значні кутові прискорення, визначальним параметром є мінімальна транспортна затримка відеосигналу. Для забезпечення адекватної реакції пілота в контурі керування латентність системи не повинна перевищувати 20–30 мс [6], оскільки зростання цього показника призводить до втрати керованості. При цьому параметри кольоропередачі та роздільної здатності є вторинними відносно стабільності частоти кадрів.

Натомість у кінематографії та професійній аерофотозйомці архітектура відеозв'язку будується на пріоритеті якості візуалізації. Використання спеціалізованих платформ вимагає забезпечення високої роздільної здатності (Full HD, 4K) та бітрейту для уникнення артефактів компресії. У цьому сегменті допускається використання цифрових протоколів із більшою затримкою заради отримання деталізованого зображення з широким динамічним діапазоном.

Окремий кластер вимог формує військове застосування FPV-комплексів як засобів тактичної розвідки та баражуючих боєприпасів. Експлуатація в умовах бойових дій вимагає насамперед високої завадостійкості каналу зв'язку до засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) та надійності роботи за відсутності прямої види-

ності. Критичним фактором стає також достатня деталізація зображення для ідентифікації замаскованих цілей на граничних дистанціях [1].

Подібні вимоги до надійності висуваються і при проведенні пошуково-рятувальних операцій, де ключовою є здатність сигналу долати фізичні перешкоди при обстеженні зруйнованих будівель чи складного рельєфу. У промисловому секторі, зокрема при інспекції висотних споруд та енергетичних об'єктів, акцент робиться на стабільності відеоканалу в умовах промислових електромагнітних завад та високій чіткості зображення для детекції дрібних дефектів конструкцій.

1.2 Огляд існуючих технологій відеозв'язку для БПЛА

Канал передачі відеоданих виступає критично важливою ланкою в архітектурі FPV-систем, визначаючи граничні тактико-технічні характеристики всього комплексу. На сучасному етапі розвитку безпілотних технологій співіснують два фундаментально відмінні підходи до побудови радіоліній: аналоговий, що базується на безперервній модуляції, та цифровий, який використовує дискретні методи обробки та пакетну передачу даних [4].

Аналоговий відеозв'язок, будучи історично першим стандартом у галузі FPV, базується на передачі композитного відеосигналу (CVBS) у форматах NTSC або PAL. Формування радіосигналу здійснюється переважно шляхом частотної модуляції (FM) носійної частоти в діапазонах 1.2, 2.4 або 5.8 ГГц [1]. Ключовою архітектурною перевагою аналогових систем є відсутність етапів буферизації та цифрування відеопотоку, що забезпечує ультранизьку та фіксовану латентність, близьку до фізичної межі швидкості проходження сигналу трактом. Іншою важливою експлуатаційною характеристикою є лінійний характер деградації зображення при зниженні співвідношення сигнал/шум (SNR). Замість повної втрати зв'язку відбувається поступове збільшення візуального шуму, що дозволяє оператору зберігати ситуаційну обізнаність навіть в умовах гранично слабкого прийому.

Водночас технологія має суттєві обмеження: низька роздільна здатність, лімітована стандартами SD (480p/576p), та висока чутливість до інтерференційних завад і багатопроменевого поширення радіохвиль, що проявляється у вигляді спотворень синхронізації та кольоропередачі.

Цифровий відеозв'язок представляє собою еволюційний крок, спрямований на підвищення інформативності відеоканалу. Технічний процес передбачає захоплення зображення високої чіткості (HD 720p/1080p), його компресію високоефективними кодеками (H.264/H.265), пакетування та передачу з використанням складних видів модуляції, таких як ортогональне частотне мультиплексування (OFDM) [3]. Застосування алгоритмів прямої корекції помилок (FEC) та відновлення втрачених пакетів забезпечує високу завадостійкість та якість зображення, недосягну для аналогових систем. Проте платою за цифрову обробку та механізми ARQ (Automatic Repeat Request) є виникнення транспортної затримки, яка може мати змінний характер (jitter) залежно від завантаженості каналу. Окрім того, цифрові системи характеризуються пороговим ефектом деградації («digital cliff»): при досягненні критичного рівня помилок (BER) відеопотік не зашумлюється, а повністю переривається або «заморожується», що створює додаткові ризики при пілотуванні. Суттєвим фактором також є висока вартість апаратної частини та закритість (пропрієтарність) протоколів більшості виробників, що обмежує взаємосумісність обладнання.

Характеристика деградації сигналів зображена на рисунку 1.1.

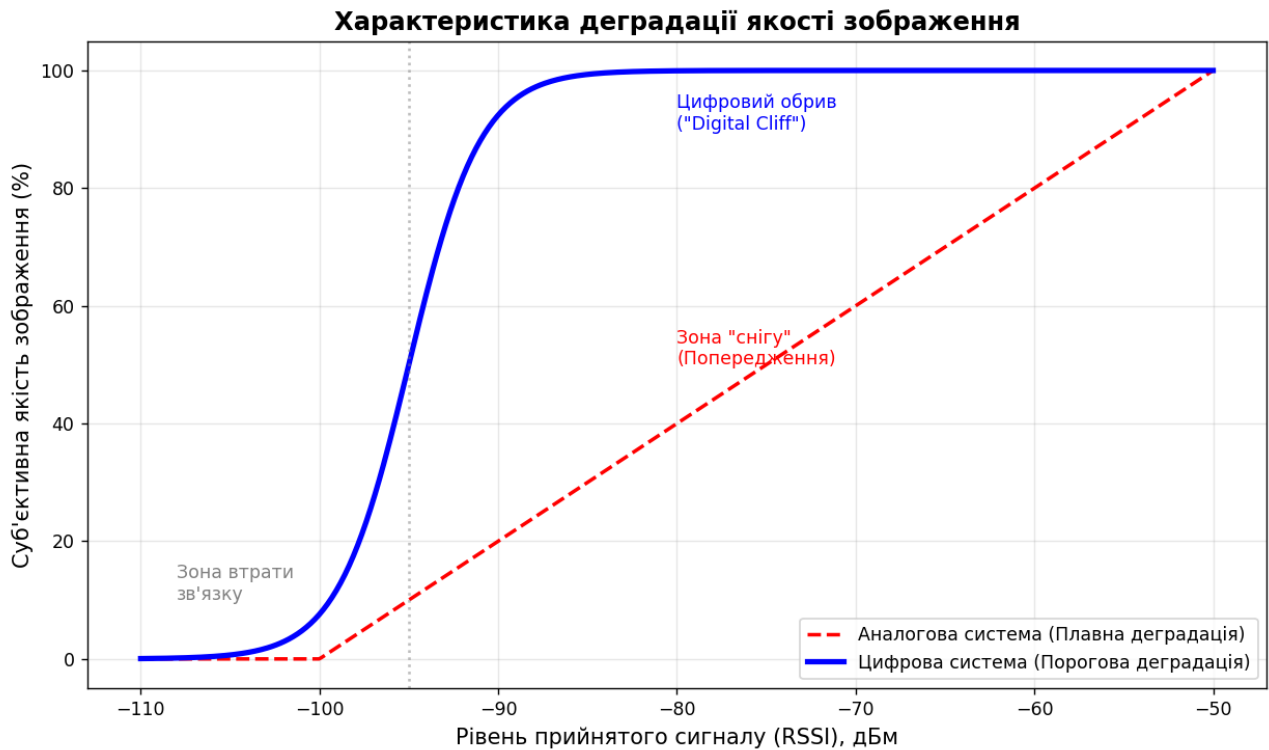


Рисунок 1.1 – Характеристика деградації якості зображення в залежності від рівня сигналу

1.3 Проблематика використання відеобладнання

Проектування та практична експлуатація FPV-систем нерозривно пов'язані з необхідністю вирішення комплексу технічних протиріч, що виникають на стику вимог до швидкодії, якості передачі даних та фізичних обмежень радіоканалу.

Фундаментальною проблемою є пошук балансу в дилемі «затримка – інформативність». Висока деталізація зображення у цифрових системах (DJI, Walksnail) досягається за рахунок складних алгоритмів компресії та буферизації кадрів, що неминуче вносить транспортну затримку в діапазоні 25–40 мс [7]. Це створює конфлікт у контурі керування для високодинамічних платформ, де критичним є миттєвий відгук. Альтернативні рішення, такі як HDZero, намагаються нівелювати

цей недолік шляхом передачі нестисненого потоку, проте це накладає обмеження на роздільну здатність та вимагає ширшої смуги пропускання.

Наступний блок проблем зумовлений фізикою поширення радіохвиль у сантиметровому діапазоні. Домінування частоти 5.8 ГГц, що забезпечує компактність антенно-фідерних пристроїв, супроводжується високим коефіцієнтом загасання сигналу у вільному просторі та низькою дифракційною здатністю при огинанні перешкод [8]. Перехід на нижчі частоти (1.2/1.3 ГГц) покращує енергетичний бюджет лінії та проникну здатність, але призводить до неприпустимого збільшення габаритів антен для компактних носіїв. Окрім того, збільшення потужності передавача (VTH) як метод компенсації втрат обмежене термодинамічними характеристиками напівпровідників та ємністю бортових джерел живлення.

В умовах урбанізованого середовища критичного значення набуває стійкість каналу до багатопроменевого поширення (multipath interference). Інтерференція прямого та відбитого сигналів в аналогових системах призводить до фазових спотворень та руйнування телевізійної розгортки. Цифрові системи, що використовують модуляцію OFDM, демонструють вищу резистентність до цього явища завдяки розбиттю потоку на піднесучі частоти, проте це ускладнює апаратну частину. Це безпосередньо впливає на масогабаритні та енергетичні показники (SWaP), оскільки цифрові модулі потребують потужних обчислювальних ресурсів, що призводить до значного тепловиділення та зменшення польотного часу мікро-БПЛА.

Додатковими бар'єрами виступають висока ціна та закритість цифрових протоколів. Це обмежує сумісність компонентів і гнучкість архітектури, яка є ключовою перевагою відкритих аналогових систем [4].

2 АНАЛІЗ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ СИСТЕМ ВІДЕОЗВ'ЯЗКУ БПЛА

2.1 Аналогові системи

Незважаючи на активну цифровізацію галузі, аналогові системи відеозв'язку продовжують займати домінуючі позиції у сегменті спортивного пілотування та бюджетних FPV-рішень. Це зумовлено насамперед архітектурною простотою та відсутністю часових затримок на обробку сигналу, що є критичним фактором для контуру керування високошвидкісними об'єктами. Функціонування аналогового тракту забезпечується взаємодією чотирьох ключових компонентів: камери, передавача, приймача та антенно-фідерних пристроїв.

Первинною ланкою системи виступає FPV-камера, яка здійснює перетворення оптичного зображення в електричний аналоговий сигнал. Сучасні моделі базуються на високочутливих CMOS-сенсорах, здатних формувати композитний відеосигнал (CVBS) у стандартах PAL або NTSC. Важливою характеристикою сенсорів є підтримка технології розширеного динамічного діапазону (WDR), що дозволяє зберігати інформативність зображення в умовах різких перепадів освітленості, характерних для польотів проти сонця або в тіні об'єктів. Окрім того, камери оптимізовані для мінімізації затримки експозиції ("glass-to-glass latency"), яка у топових моделях не перевищує 3–5 мс.

Сформований відеосигнал надходить на відеопередавач (VTX), де відбувається його частотна модуляція та підсилення до необхідного рівня потужності. Сучасні VTX є складними мікропроцесорними пристроями, що підтримують цифрові протоколи керування, такі як SmartAudio або IRC Tramp [4]. Це дозволяє оператору дистанційно, використовуючи радіоканал телеметрії, змінювати частотну

сітку, вихідну потужність передавача або переводити його в режим "Pit Mode" (мінімальне випромінювання) для налаштування без створення завад іншим пілотам.

Приймальна частина тракту (VRX) відповідає за демодуляцію сигналу та виділення відеоінформації. Для боротьби з ефектами завмирання сигналу (fading) та багатопроменевого поширення використовуються технології рознесеного прийому. Класична схема "True Diversity" передбачає наявність двох незалежних приймачів, між якими комутатор обирає сигнал із кращим рівнем RSSI (Received Signal Strength Indicator). Більш досконалою є технологія "Fusion" (злиття), реалізована у модулях TBS Fusion [10] та ImmersionRC RapidFIRE [11]. Вона базується на алгоритмічному аналізі та синхронізації рядків зображення з обох приймачів, що дозволяє програмно реконструювати "пошкоджені" кадри, значно підвищуючи стабільність зображення в умовах інтерференції.

Невід'ємною функціональною ланкою архітектури FPV-системи виступає антенно-фідерний тракт, параметри якого безпосередньо визначають енергетичний бюджет радіолінії. З огляду на специфіку пілотування, що супроводжується постійними та різкими змінами просторової орієнтації літального апарату, використання антен лінійної поляризації є неефективним через виникнення значних кросполяризаційних втрат при розбіжності площин поляризації передавача і приймача. Для нівелювання цього ефекту, а також для мінімізації деструктивного впливу багатопроменевої інтерференції, в аналогових системах де-факто стандартом стало застосування антен з круговою поляризацією (Circular Polarization – RHCP або LHCP) [9]. Така конфігурація дозволяє підтримувати стабільний коефіцієнт передачі незалежно від кутів крену та тангажу носія, а також забезпечує природну селекцію корисного сигналу на фоні перевідбиттів, оскільки при відбитті від перешкод напрямок обертання вектора поляризації змінюється на протилежний, що призводить до його ослаблення приймальною антеною. Антени

бувають спрямованого і всеспрямованого типу, діаграми яких зображені на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Діаграми спрямованості антен різних типів

2.2 Цифрові системи

Сегмент цифрового відеозв'язку характеризується високим рівнем фрагментації та жорсткою конкуренцією між пропріетарними екосистемами, несумісними

між собою на рівні протоколів радіообміну. На сучасному етапі розвитку ринку домінують три архітектурні підходи, реалізовані в системах DJI, Walksnail та HDZero, кожен з яких використовує відмінні алгоритми кодування та стратегії управління трафіком.

Технологічним лідером галузі є екосистема DJI FPV System, що базується на фірмовому протоколі передачі даних OcuSync (версії 3.0 та вище). В основі технології лежить використання ортогонального частотного мультиплексування (OFDM) у поєднанні з технологією псевдовіпадкового перелаштування робочої частоти (FHSS) [12]. Така комбінація дозволяє системі динамічно аналізувати завадову обстановку та миттєво перебудуватися на вільні ділянки спектру, забезпечуючи високу стабільність лінку навіть в умовах насиченого ефіру. Апаратна реалізація OcuSync активно використовує принципи MIMO (Multiple Input Multiple Output), що дозволяє ефективно використовувати відбиті сигнали для підвищення енергетичного потенціалу радіолінії. Це забезпечує передачу зображення з роздільною здатністю до 1080p на значні відстані, проте механізми повторної передачі втрачених пакетів (ARQ) неминуче вносять змінну затримку в діапазоні 25–40 мс, що є основним обмежуючим фактором для надшвидкісного пілотування.

Прямим конкурентом, що пропонує схожу якість зображення, виступає система Walksnail Avatar, розроблена компанією Caddx у співпраці з Fat Shark. Ключовою відмінністю цієї платформи є використання більш сучасного вискоєфективного кодека H.265 (HEVC) [13]. Застосування цього алгоритму компресії дозволяє досягти вищої деталізації зображення при аналогічному бітрейті порівняно з H.264, що використовується в ранніх версіях конкурентів. Система забезпечує трансляцію відеопотоку 1080p та підтримує спеціалізований режим «low-latency», який оптимізує буферизацію для зниження затримки до 22 мс, наближаючись до показників аналогових систем, хоча й зберігає схильність до мікрофризів при погіршенні умов прийому.

Система HDZero (Divimath) реалізує альтернативний підхід: передачу нестисненого потоку без буферизації кадрів та механізмів повторних запитів. Це гарантує детерміновану затримку (<19 мс) незалежно від завад, ціною обмеження роздільної здатності (720p/1080i) та ширшої смуги пропускання [14]. Ключовою перевагою є характер деградації: при падінні рівня сигналу зображення не «заморожується», а вкривається піксельними артефактами («іскрами»), що дозволяє зберігати керуваність апаратом до повної втрати зв'язку.

2.3 Порівняльний аналіз

Узагальнення розглянутих технологічних рішень дозволяє провести комплексний порівняльний аналіз, метою якого є визначення областей ефективного застосування кожної з архітектур. Для об'єктивної оцінки доцільно виділити групу критеріїв, що включають якість візуалізації, часові параметри проходження сигналу, стійкість до завад та масогабаритні показники. На основі цих параметрів у Таблиці 2.1 наведено порівняльну характеристику чотирьох домінуючих на ринку систем: висококласної аналогової системи (як еталона швидкодії) та трьох цифрових платформ (DJI O3, Walksnail Avatar, HDZero).

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика тактико-технічних параметрів систем відеозв'язку

Параметр порівняння	Аналогова система (High-End)	DJI O3 System (OcuSync 3.0+)	Walksnail Avatar (H.265)	HDZero (Uncompressed)
Принцип обробки сигналу	Безперервна частотна модуляція (FM)	Цифрове стиснення + буферизація	Цифрове стиснення + буферизація	Потокова передача без двонаправленого

		(ARQ)		стиснення
--	--	-------	--	-----------

Продовження таблиці 2.1

Роздільна здатність	SD (720×576i / 480i)	Full HD (1920×1080p) до 100 fps	Full HD (1920×1080p) до 100 fps	HD (1280×720p) / 1080i до 90 fps
Транспортна затримка (Latency)	Фіксована, детермінована (< 10–15 мс)	Змінна, залежна від завад (28–40+ мс)	Змінна, режим Low Latency (22–30 мс)	Фіксована, детермінована (< 19 мс)
Характер деградації сигналу	Лінійне зростання шуму, збереження синхронізації	Порогове відключення, "завмирання" кадрів	Порогове відключення, поява артефактів	Поява піксельного шуму ("sparkles"), без затримок
Енергетична ефективність (SWaP)	Висока (низьке споживання, малий нагрів)	Низька (високе споживання, потреба в радіаторі)	Низька (аналогічно DJI)	Середня (потребує менше ресурсів ніж кодеки H.265)
Завадостійкість (Multipath)	Низька (спотворення кольору, зрив синхронізації)	Відмінна (завдяки OFDM та MIMO)	Висока	Середня (краща за аналог, гірша за OFDM)
Вартість впровадження	Низька	Висока	Висока	Середня

Аналіз наведених даних демонструє чіткий технологічний вододіл між системами з буферизацією та системами прямої передачі. Платформи DJI та Walksnail, що використовують високоефективні кодеки, забезпечують максимальну якість зображення та завадостійкість завдяки механізмам повторної передачі пакетів. Проте це досягається ціною змінної затримки, яка може непередбачувано зростати в умовах складної електромагнітної обстановки, що робить їх менш придатними для критичних ситуацій керування на граничних швидкостях.

Натомість системи HDZero та класичний аналог формують групу рішень з детермінованою затримкою. Їх ключовою перевагою є передбачуваність поведінки: пілот отримує візуальну інформацію з гарантованим часом доставки незалежно від рівня завад. Хоча аналогові системи поступаються всім конкурентам у роздільній здатності, їхня здатність зберігати інформативність зображення при відношенні сигнал/шум близькому до нуля залишає їх безальтернативним вибором для польотів на граничні дистанції або в умовах надзвичайно щільного спектра. HDZero займає проміжну нішу, пропонуючи компроміс між чіткістю HD-картинки та динамікою аналогового зв'язку, проте має меншу проникну здатність сигналу порівняно з системами на базі OFDM.

2.4 Аналіз вимог до обладнання

Формування тактико-технічних вимог до системи відеозв'язку базується на вирішенні оптимізаційної задачі, де цільовою функцією є максимізація ефективності виконання місії при заданих обмеженнях. Залежно від сценарію застосування, пріоритетність параметрів суттєво змінюється, формуючи специфічні профілі вимог.

Визначальним критерієм для високодинамічних режимів польоту (спортивне пілотування, маневрування в обмеженому просторі) є мінімізація фазового запізнення в контурі керування. Критична межа транспортної затримки відеосигналу

встановлюється на рівні 25 мс. Перевищення цього порогу призводить до виникнення автоколивань у системі «пілот–БПЛА» та втрати стійкості керування. Тому для даного класу задач безальтернативним вибором залишаються системи з детермінованою низькою затримкою: аналогові передавачі або цифрова система HDZero. Використання систем зі змінною затримкою (jitter) у цьому сценарії є неприпустимим, оскільки непередбачувані флуктуації часу відгуку руйнують моторні навички оператора.

Для завдань розвідувального характеру, моніторингу та художньої аерозйомки вектор вимог зміщується в площину інформативності візуального каналу. Ключовим параметром стає ймовірність розпізнавання об'єкта, яка прямо корелює з роздільною здатністю та бітрейтом відеопотоку. Забезпечення якості зображення стандарту Full HD (1080p) дозволяє суттєво збільшити дистанцію ідентифікації цілей та покращити ситуаційну обізнаність. У цьому контексті оптимальними є системи DJI O3 або Walksnail, які завдяки ефективним алгоритмам компресії забезпечують високу деталізацію, нівелюючи недоліки, пов'язані з підвищеною затримкою.

При плануванні місій, що передбачають польоти поза межами прямої видимості (BVLOS) та в умовах відсутності прямої видимості (NLOS), вирішальними факторами стають енергетичний бюджет радіолінії та дифракційна здатність радіохвиль. Для забезпечення надійного зв'язку крізь перешкоди (рослинність, забудова) доцільно використовувати або цифрові системи з протоколами корекції помилок та технологією MIMO (DJI OcuSync), або переходити на нижчі частотні діапазони (1.2–1.3 ГГц) з використанням аналогового обладнання. Останній варіант забезпечує краще огинання перешкод завдяки збільшенню зони Френеля, проте вимагає використання габаритних антен.

Окремим аспектом аналізу є економічна ефективність та оцінка ризиків. Для навчального процесу та початкового рівня підготовки, що характеризується високою аварійністю, пріоритетом є мінімізація вартості експлуатації та ремонту. Ана-

логові системи в цьому ракурсі демонструють найвищу рентабельність, оскільки вартість заміни бортового обладнання є на порядок нижчою порівняно з цифровими аналогами [4]. Це дозволяє знизити психологічне навантаження на пілота-початківця та інтенсифікувати навчальний процес без критичних фінансових ризиків.

3 РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ВИБОРУ ОБЛАДНАННЯ

3.1 Рекомендації щодо застосування систем

Синтез результатів технічного аналізу дозволяє сформулювати комплексні рекомендації щодо вибору архітектури відеозв'язку, які базуються на принципах відповідності тактико-технічних характеристик обладнання специфіці виконуваних завдань. Вибір конкретної системи повинен розглядатися як результат вирішення оптимізаційної задачі, де критеріями виступають допустима затримка, необхідна якість зображення та умови електромагнітної сумісності.

За результатами проведеного порівняльного аналізу визначено, що аналогові системи передачі даних залишаються оптимальним рішенням для сценаріїв, де критичним фактором успіху є мінімізація часової затримки в контурі керування. Насамперед це стосується спортивного пілотування та виконання високодинамічних маневрів в обмеженому просторі. Завдяки відсутності етапів цифрової обробки, аналогове обладнання забезпечує миттєву реакцію системи на керуючі впливи. Окрім того, даний клас обладнання рекомендовано для застосування на мікро-БПЛА (класу Tiny Whoop) через найкращі показники масової ефективності та низьке енергоспоживання, а також у навчальному процесі завдяки низькій вартості компонентної бази та прогнозованому характеру деградації сигналу, що дозволяє оператору-початківцю зберігати орієнтацію при погіршенні умов прийому.

Впровадження цифрових систем на базі технологій стиснення відеопотоку (екосистеми DJI, Walksnail) є доцільним для широкого спектра завдань, що вимагають високої інформативності візуального каналу. Рекомендованою сферою застосування цих комплексів є кінематографічна аерозйомка, моніторинг інфраструктури та розвідувальні операції, де пріоритетом є деталізація об'єктів (Full HD роздільна здатність). Висока завадостійкість протоколів OFDM та використання технологій MIMO роблять ці системи безальтернативним вибором для польотів у складній заводській обстановці, наприклад, в умовах щільної міської забудови або промислових зон, а також при виконанні місій на значних дистанціях, де енергетичний вигравш від цифрової обробки сигналу переважає недоліки, пов'язані із затримкою.

Як окремий клас рішень слід виділити цифрову систему HDZero, яку рекомендовано розглядати як компромісну альтернативу для пілотів, що потребують поєднання чіткості цифрового зображення з динамікою аналогових систем. Завдяки архітектурі без двонаправленого стиснення, ця система забезпечує фіксовану низьку затримку, що дозволяє використовувати її у професійному дрон-рейсингу та ситуаціях, де змінна затримка класичних цифрових систем є неприйнятним фактором ризику [14].

3.2 Обґрунтування вибору для типових завдань

Верифікація запропонованих теоретичних рекомендацій вимагає їх проєкції на конкретні експлуатаційні сценарії, що характеризуються діаметрально протилежними векторами вимог. Як модельні завдання розглянуто високодинамічне спортивне пілотування, кінематографічну аерозйомку, інспекцію промислових об'єктів у складних умовах та пошуково-рятувальні операції на значних відстанях.

Завдання 1: Спортивне пілотування (Дрон-рейсинг)

Специфіка професійного дрон-рейсингу, де лінійні швидкості БПЛА перевищують 150 км/год, а траєкторія руху передбачає проходження складних перешкод, висуває ультимативні вимоги до часових характеристик каналу зв'язку. Обґрунтуванням вибору системи HDZero або висококласного аналогового обладнання (на базі модулів Fusion/RapidFIRE) є необхідність забезпечення детермінованої низької затримки в контурі керування «оператор–БПЛА».

Рекомендації: аналіз динаміки польоту показує, що зміна латентності навіть на 10–15 мс (джитер), характерна для систем DJI або Walksnail, призводить до фазового запізнення реакції пілота, що на високих швидкостях унеможлиблює точне траєкторне керування. HDZero, завдяки архітектурі без буферизації кадрів, гарантує стабільний час доставки сигналу (менше 19 мс) незалежно від завадової обстановки. Додатковим аргументом на користь обраних систем є специфічний характер деградації зображення: поява візуального шуму («іскор» або «снігу») замість повної зупинки зображення (freezing) дозволяє пілоту зберігати просторову орієнтацію навіть у критичних зонах прийому, що є вирішальним фактором для збереження апарату під час змагань.

Завдання 2: Кінематографічна аерозйомка

Для завдань створення високоякісного візуального контенту цільовою функцією є максимізація інформативності та естетичної якості відеопотоку.

Рекомендації: у цьому контексті вибір системи DJI O3 Air Unit є безальтернативним з огляду на сукупність характеристик візуалізації та стабільності радіоканалу. Забезпечення трансляції з роздільною здатністю 1080p при 100 кадрах на секунду дозволяє оператору контролювати дрібні деталі сцени, експозицію та фокусування, що недосяжно для аналогових систем. Хоча протокол OcuSync вносить затримку порядку 30–40 мс, для плавних кінематографічних прольотів цей показник знаходиться в межах допустимої похибки і не впливає на якість пілотування.

Завдання 3: Інспекція промислових об'єктів (Indoor/Industrial)

Сценарій обстеження внутрішніх приміщень заводів, шахт ліфтів або металоконструкцій характеризується екстремально високим рівнем багатопроменевої інтерференції. Відбиття радіосигналу від металевих поверхонь призводить до фазових спотворень, які в аналогових системах проявляються у вигляді критичних артефактів («двоїння», зрив синхронізації), що робить зображення непридатним для дефектоскопії.

Рекомендації: для таких умов рекомендовано використання цифрових систем на базі OFDM (DJI/Walksnail). Завдяки використанню захисних інтервалів (Cyclic Prefix) та технології MIMO, ці системи здатні утилізувати енергію відбитих сигналів для підсилення основного каналу, перетворюючи деструктивний фактор інтерференції на конструктивний. Висока роздільна здатність дозволяє оператору виявляти мікротріщини, корозію чи технічні несправності, що неможливо зробити при використанні SD-камер аналогового діапазону.

Завдання 4: Пошуково-рятувальні операції (SAR/Long Range)

Виконання місій з пошуку постраждалих на значних територіях (лісові масиви, гірська місцевість) вимагає поєднання дальності зв'язку та здатності ідентифікувати об'єкти з великої висоти.

Рекомендації: у даному випадку вибір є результатом компромісу. Для ситуацій, що вимагають максимального радіусу дії та проникнення крізь щільну рослинність, доцільно використовувати аналогові системи діапазону 1.2–1.3 ГГц. Зниження частоти забезпечує кращу дифракційну здатність хвиль та менше загасання у лісових масивах порівняно з 5.8 ГГц. Проте, якщо пріоритетом є візуальна ідентифікація об'єктів (людина/тварина/техніка), перевага надається цифровим системам (наприклад, DJI O3), оскільки їх висока чутливість приймача (-105 дБм проти -96 дБм у аналога) частково компенсує втрати на високій частоті, а HD-картинка дозволяє розрізнити деталі з висоти 50–100 метрів, що значно підвищує ефективність пошукових заходів.

3.3 Багатокритеріальний аналіз

Оскільки проектування каналів зв'язку БПЛА відбувається в умовах багатofакторних обмежень, задача вибору обладнання зводиться до пошуку множини ефективних компромісів. Для виключення суб'єктивного фактора при ранжуванні систем доцільно застосувати метод Парето-оптимізації. У рамках цього підходу система вважається Парето-ефективною, якщо покращення одного з її параметрів (наприклад, роздільної здатності) неможливе без погіршення іншого ключового параметра (наприклад, затримки).

Головним простором критеріїв для FPV-систем є двовимірна система координат, де вісь абсцис відображає транспортну затримку (T_{lat} , мс), а вісь ординат — інформативну ємність каналу, виражену через бітрейт або роздільну здатність (Q_{img}). Метою оптимізації є мінімізація T_{lat} при одночасній максимізації Q_{img} .

Аналіз технічних характеристик досліджуваних систем дозволяє сформувавши область допустимих рішень. Аналогові системи (High-End сегмент) займають крайню позицію на вісі затримки (близько 10–15 мс), проте мають мінімальні показники якості зображення. Це робить їх "лівим граничним рішенням" на фронті Парето, яке є оптимальним виключно за критерієм швидкодії. Будь-яка спроба підвищити якість зображення цифровими методами неминуче зміщує точку системи вправо по вісі часу, виводячи її з цієї зони оптимальності.

Система DJI O3 формує протилежний полюс на фронті Парето («праве граничне рішення»). Вона забезпечує абсолютний максимум за критерієм якості (Q_{img}), але ціною найгірших показників затримки. З точки зору теорії оптимізації, ця система є домінуючою для задач, де функція корисності залежить від деталізації (розвідка, зйомка), оскільки жодна інша існуюча система не забезпечує такої якості навіть при більших затримках.

Система HDZero займає проміжну позицію на кривій Парето. Вона не є домінованою (suboptimal) ані аналоговими системами (оскільки має значно вищу

якість), ані системами DJI (оскільки має фіксовану та значно меншу затримку). Це дозволяє класифікувати HDZero як унікальне компромісне рішення, що забезпечує баланс параметрів, недосяжний для граничних систем.

Водночас старі цифрові протоколи першого покоління або бюджетні аналогові системи низької якості опиняються в зоні "домінованих рішень" (нижче кривої Парето). Їх використання є технічно необґрунтованим, оскільки на ринку існують альтернативи, які є кращими хоча б за одним параметром при рівності іншого. Графічну ілюстрацію множини оптимальних рішень та фронту Парето наведено на рисунку 3.1.

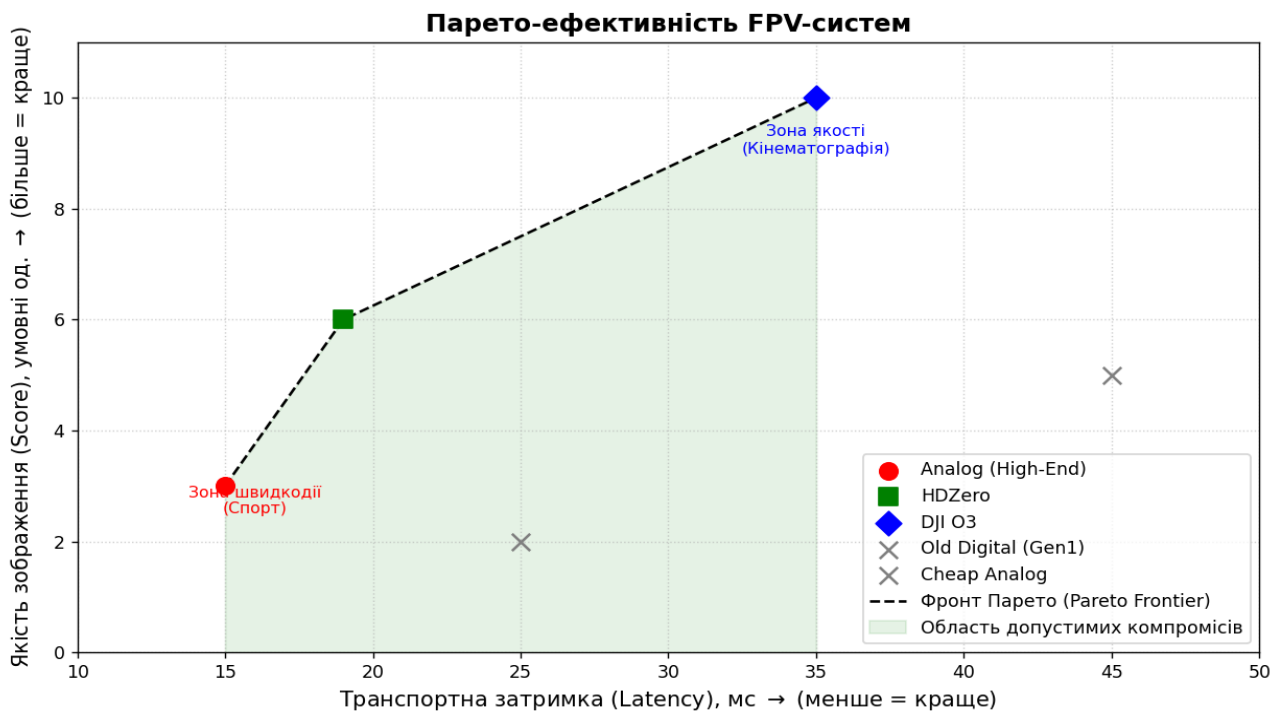


Рисунок 3.1 – Графічна інтерпретація Парето-ефективності сучасних систем відеозв'язку FPV

Таким чином, застосування Парето-аналізу доводить, що всі три розглянуті архітектури (Analog High-End, HDZero, DJI O3) знаходяться на межі ефективності і формують множину оптимальних рішень. Вибір конкретного елемента з цієї

множини залежить не від якості самої системи, а виключно від обмежень конкретного технічного завдання. Для спортивного застосування вектор переваги зміщується вліво по фронті Парето (мінімізація затримки), тоді як для моніторингу та зйомки — вправо (максимізація якості), при цьому перехід між цими станами є дискретним і вимагає повної зміни апаратної платформи.

4 РОЗРАХУНОК МАКСИМАЛЬНИХ ДИСТАНЦІЙ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

4.1 Особливості поширення радіохвиль сантиметрового діапазону

Математичне моделювання радіоліній для FPV-систем вимагає врахування специфіки розповсюдження електромагнітних коливань у діапазоні надвисоких частот (SHF), зокрема на опорній частоті 5.8 ГГц (довжина хвилі $\lambda \approx 5.17$ см). Поширення радіохвиль у цьому спектрі характеризується квазіоптичними властивостями, що означає їх прямолінійний рух та високу чутливість до фізичних перешкод. Визначальним фактором надійності зв'язку виступає наявність прямої оптичної видимості (Line of Sight – LOS) між антенами передавача (на борту БПЛА) та приймача (на наземній станції). Будь-яке екранування сигналу рельєфом місцевості, рослинністю або інфраструктурними об'єктами призводить до критичного загасання (атенюації), яке на цих частотах може досягати десятків децибел, унеможливаючи подальший прийом сигналу.

Однак наявність лише геометричної прямої видимості є недостатньою умовою для якісної передачі широкосмугового відеосигналу. Критичного значення набуває поняття зони Френеля — об'ємної області простору у формі еліпсоїда обертання між передавачем та приймачем, у якій поширюється основна частка енергії радіохвилі. Для забезпечення рівня сигналу, близького до розрахункового у вільному просторі, необхідно, щоб перша зона Френеля була вільною від перешкод щонайменше на 60%. Потрапляння сторонніх об'єктів (наприклад, верхівок

дерев або будівель) у цей простір, навіть без перекриття лінії візування, викликає дифракційні явища, що призводять до фазових спотворень та різкого падіння потужності на вході приймача [15].

Основним механізмом втрат енергії є загасання у вільному просторі (Free Space Path Loss – FSPL), яке має квадратичну залежність від частоти та відстані. Це фізичне обмеження диктує необхідність використання спрямованих антен з високим коефіцієнтом підсилення для компенсації втрат при збільшенні дистанції. Окрім FSPL, на частотах вище 5 ГГц вагомим фактором стає атмосферне поглинання, зумовлене резонансними явищами у молекулах кисню та водяної пари, а також розсіюванням на гідрометеорах (дощ, туман, сніг), що вносить додаткове погонне загасання радіолінії.

В умовах урбанізованого середовища домінантним деструктивним фактором виступає багатопроменеве поширення радіохвиль (Multipath Propagation). Внаслідок багаторазових відбиттів від поверхонь будівель, металевих конструкцій та підстилаючої поверхні, на вхід приймача надходить суперпозиція копій переданого сигналу з різними амплітудами та фазовими затримками. Інтерференція цих копій призводить до виникнення частотно-селективних завмирань (fading), які можуть спричиняти глибокі "провали" рівня сигналу навіть на невеликих дистанціях, що особливо критично для аналогових систем відеозв'язку [8].

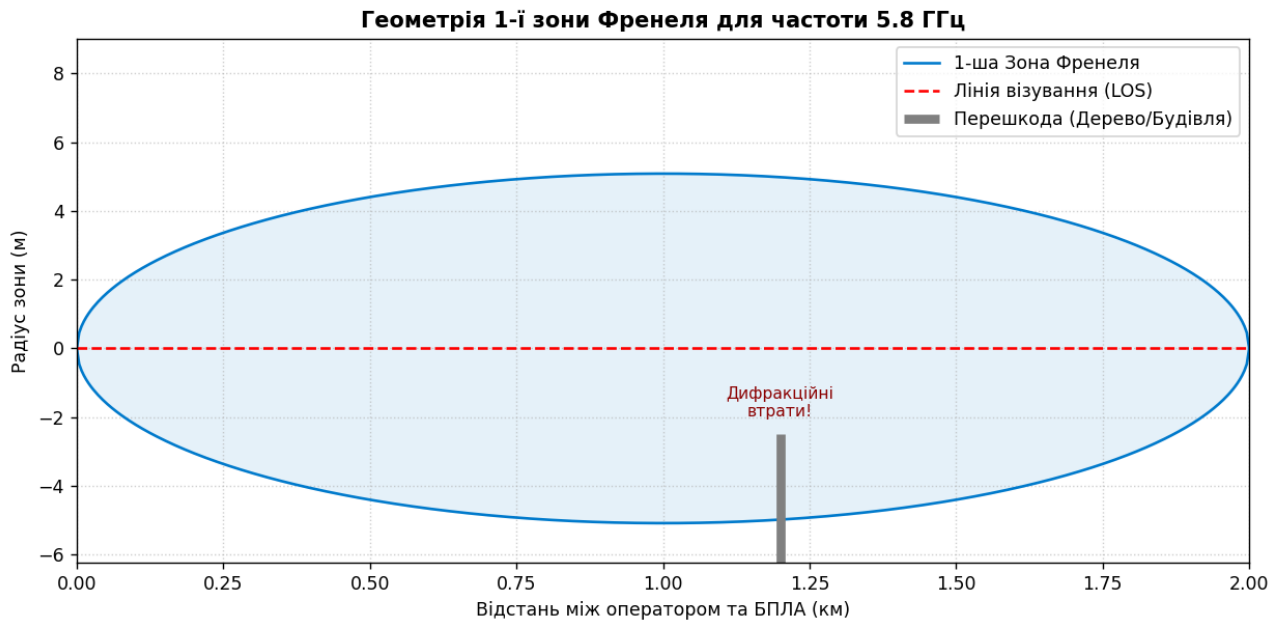


Рисунок 4.1 – Схематичне зображення першої зони Френеля та вплив перешкод на поширення сигналу

4.2 Методика розрахунку енергетичного бюджету радіолінії

Методичною основою для визначення граничної дальності радіозв'язку є розрахунок енергетичного бюджету радіолінії (Link Budget). Цей підхід дозволяє оцінити баланс між потужністю передавача, підсиленням антен та сумарними втратами на трасі поширення сигналу. Математичною моделлю процесу виступає рівняння передачі Фрііса в логарифмічній формі, що дозволяє оперувати рівнями потужності в децибел-міліватах (дБм)[16].

Рівняння енергетичного балансу системи має вигляд:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{\Sigma} \quad (4.1)$$

де:

- P_{RX} – розрахункова потужність сигналу на вході приймача (дБм);
- P_{TX} – вихідна потужність передавача (дБм);
- G_{TX} – коефіцієнт підсилення передавальної антени (дБі);
- G_{RX} – коефіцієнт підсилення приймальної антени (дБі);

- L_{Σ} – сумарні втрати енергії в каналі зв'язку (дБ).

Сумарні втрати L_{Σ} складаються з втрат у вільному просторі (L_{FSPL}) та додаткових втрат (L_{add}), що включають згасання в кабелях, роз'ємах, атмосферне поглинання та кросполяризаційні втрати:

$$L_{\Sigma} = L_{\text{FSPL}} + L_{\text{add}} \quad (4.2)$$

Базові втрати поширення радіохвиль у вільному просторі (L_{FSPL}) розраховуються за емпіричною формулою:

$$L_{\text{FSPL}} \text{ (дБ)} = 32.44 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d) \quad (4.3)$$

де:

- f – несуча частота (МГц);
- d – дистанція між передавачем та приймачем (км);
- 32.44 – коригувальний коефіцієнт для обраних одиниць вимірювання.

Умовою існування стійкого каналу зв'язку є перевищення рівня прийнятого сигналу над пороговою чутливістю приймача (S_{RX}) з урахуванням необхідного запасу на завмирання (FM – Fade Margin):

$$P_{\text{RX}} \geq S_{\text{RX}} + \text{FM} \quad (4.4)$$

Для систем FPV, що експлуатуються в умовах прямої видимості, рекомендоване значення технологічного запасу FM становить 10–15 дБ. Це гарантує стабільність лінку при короткочасних флуктуаціях сигналу, викликаних зміною орієнтації антен або атмосферними явищами.

Для знаходження теоретичної максимальної дальності (d_{max}) рівняння розв'язується відносно параметра d при умові $P_{\text{RX}} = S_{\text{RX}}$:

$$20 \log_{10}(d_{\text{max}}) = P_{\text{TX}} + G_{\text{TX}} + G_{\text{RX}} - S_{\text{RX}} - L_{\text{add}} - 32.44 - 20 \log_{10}(f) \quad (4.5)$$

Отримана методика дозволяє провести порівняльну оцінку потенціалу дальності для різних апаратних конфігурацій. На рисунку 4.2 зображено залежність втрат від відстані.

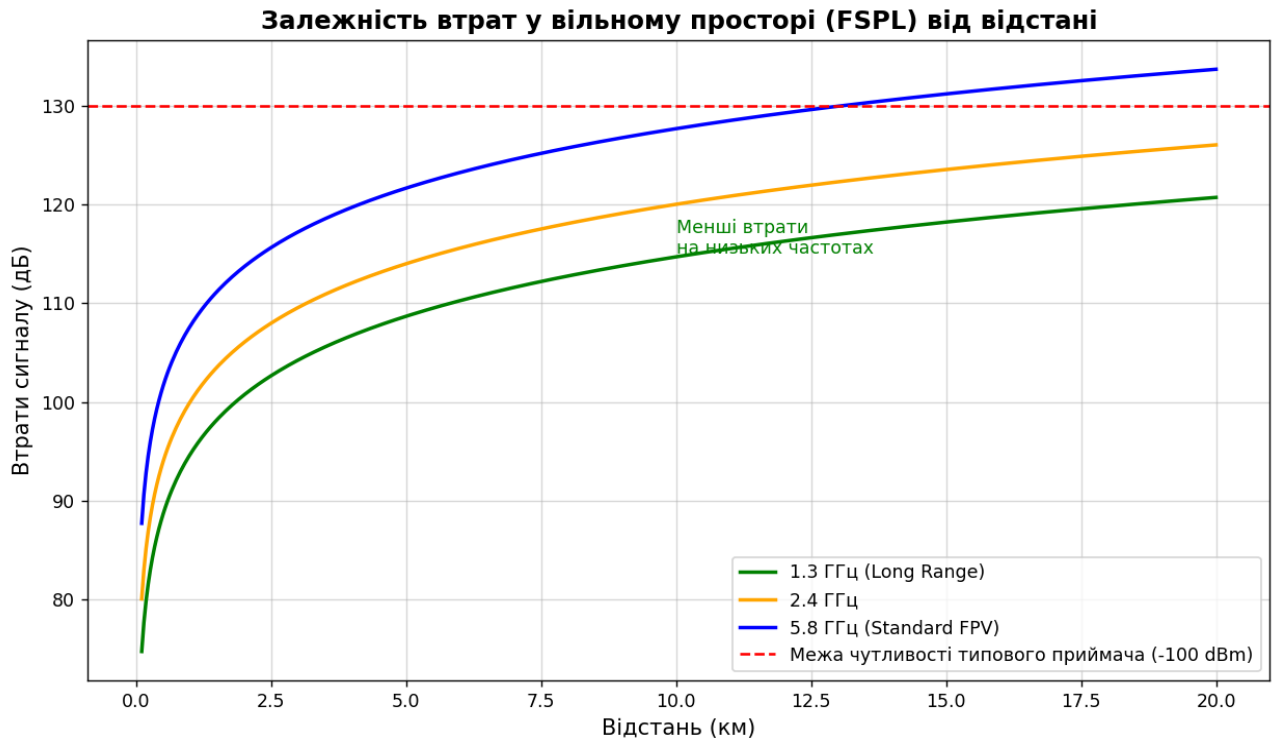


Рисунок 4.2 – Залежність втрат у вільному просторі від відстані

4.3 Результати розрахунків

На основі розробленої методики проведено розрахунок граничних дистанцій для двох характерних апаратних конфігурацій, що функціонують у смузі частот 5800 МГц. Розрахунок виконано для умов ідеального вільного простору (FSPL) із введенням коефіцієнта технологічного запасу 3 дБ на втрати у фідерному тракті та неузгодженість поляризації.

Для аналогової системи (конфігурація: VTX Rush Tank Mini, $P_{TX} = 800$ мВт / 29 дБм, приймальний модуль TBS Fusion із всеспрямованою антеною $G_{RX} = 2.5$ дБі) розрахунковий енергетичний бюджет дозволяє досягти теоретичної дальності зв'язку 9,29 км. Обмежуючим фактором у даній архітектурі виступає порогова чутливість приймача на рівні -96 дБм, що є типовим показником для демодуляторів частотно-модульованого сигналу широкої смуги.

Для цифрової системи (конфігурація: DJI O3 Air Unit, $P_{TX} = 1000$ мВт / 30 дБм, інтегровані антени DJI Goggles 2 з $G_{RX} \approx 4$ дБі) розрахункова дальність становить 34,9 км. Більш ніж трикратна перевага над аналоговою системою досягається не стільки за рахунок незначного збільшення потужності передавача (+1 дБ), скільки завдяки кардинально вищій чутливості приймального тракту (-105 дБм). Це пояснюється використанням когерентної обробки сигналів та алгоритмів корекції помилок, які дозволяють відновлювати інформацію навіть при від'ємному співвідношенні сигнал/шум, що фізично неможливо для аналогової FM-демодуляції.

Однак отримані результати вимагають верифікації за критерієм геометричної прямої видимості (Radio Line of Sight). Згідно з формулою дальності радіогоризонту ($D_{LOS} \approx 4.12(\sqrt{H_{TX}} + \sqrt{H_{RX}})$), для реалізації енергетичного потенціалу цифрової системи у 35 км, за умови знаходження оператора на поверхні землі ($H_{RX} = 1.7$ м), висота польоту БПЛА (H_{TX}) повинна становити не менше 50–60 метрів. Польоти на менших висотах призведуть до екранування сигналу кривизною земної поверхні значно раніше, ніж вичерпається енергетичний запас лінії. За умови відсутності рефракції відстані зменшаться на 15%.

Таким чином, практична дальність радіозв'язку є результатом суперпозиції двох обмежуючих факторів: енергетики прийомо-передавального тракту та геометрії простору. Для аналогових систем домінуючим обмеженням є швидке загасання сигналу, тоді як для цифрових систем критичним стає забезпечення умов прямої видимості та чистоти зони Френеля.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання підвищення ефективності експлуатації безпілотних авіаційних комплексів шляхом системного аналізу та обґрунтування вибору архітектури відеозв'язку. На основі проведених досліджень сформульовано наступні висновки:

1. Аналіз стану проблеми. Встановлено, що сучасний етап розвитку FPV-систем характеризується технологічним дуалізмом: одночасним існуванням аналогових стандартів (CVBS/FM) та стрімкою експансією цифрових протоколів (OFDM). Доведено, що перехід на цифрові технології передачі даних, попри суттєве покращення якості візуалізації, вносить низку технічних обмежень (змінна

латентність, порогова деградація), що перетворює процес вибору обладнання на задачу багатокритеріальної оптимізації.

2. Класифікація та архітектура. Проведено поглиблений аналіз принципів побудови каналів зв'язку. Визначено, що фундаментальна відмінність між системами полягає у методах обробки спектра: аналогові системи забезпечують детерміновану мінімальну затримку за рахунок прямої модуляції, тоді як цифрові системи (DJI, Walksnail) використовують буферизацію та алгоритми корекції помилок (ARQ) для максимізації інформативності каналу ціною часових втрат. Виокремлено клас гібридних рішень (HDZero), що поєднують цифрову чіткість із відсутністю двонаправленого стиснення.

3. Порівняльний аналіз. На основі методу Парето-оптимізації доведено відсутність універсально ефективною системи. Побудована множина оптимальних рішень демонструє, що вираш у якості зображення неминуче супроводжується погіршенням часових характеристик. Ідентифіковано критичні межі застосування технологій: для аналогових систем – це задачі з вимогою до латентності < 20 мс, для цифрових систем з компресією – задачі, що вимагають роздільної здатності Full HD та роботи в умовах багатопроменевої інтерференції.

4. Практичні рекомендації. Розроблено науково обґрунтовану методіку вибору апаратного забезпечення для типових експлуатаційних сценаріїв.

– Для високодинамічного пілотування (дрон-рейсинг) рекомендовано використання систем з фіксованою затримкою (Analog/HDZero) для уникнення фазового запізнення в контурі керування.

– Для розвідувальних та кінематографічних місій обґрунтовано безальтернативність цифрових систем на базі OFDM (DJI O3) через їх здатність забезпечувати високу деталізацію та використовувати відбиті сигнали для підвищення стабільності лінку.

5. Математичне моделювання. Розрахунок енергетичного бюджету радіоліній у діапазоні 5.8 ГГц підтвердив значну перевагу цифрових протоколів

передачі. Завдяки високій чутливості приймального тракту (-105 дБм), теоретична дальність цифрової системи досягає 34,9 км проти 9,3 км у аналогових аналогів (при співставній потужності передавача). Водночас аналіз геометричних факторів показав, що практична реалізація цього потенціалу можлива лише за умови забезпечення чистоти зони Френеля та прямої видимості, що вимагає висоти польоту носія не менше 50–60 метрів.

Результати роботи становлять цілісну методичну базу для інженерного проектування каналів зв'язку БПЛА, дозволяючи мінімізувати ризики на етапі розробки та підвищити результативність виконання польотних завдань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ромоданов В. А., Комаров М. М. Системи та засоби радіозв'язку з БПЛА: підручник. Київ: НАУ, 2019. 210 с.
2. GetFPV. What is FPV? A Beginner's Guide. URL: <https://www.getfpv.com/learn/what-is-fpv> (дата звернення: 12.10.2025).
3. Peterson, A. Digital vs. Analog FPV: A Comprehensive Performance Analysis // Journal of Unmanned Vehicle Systems. 2022. Vol. 10, No. 3. P. 112-125.
4. Liang, O. The Ultimate FPV Shopping List. Oscar Liang Blog. URL: <https://oscarliang.com/fpv-shopping-list/> (дата звернення: 15.10.2025).

5. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. – [Чинний від 2017-01-01]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 32 с.
6. Starr, J. FPV Flight Dynamics: The Complete Guide to FPV Drone Racing and Freestyle. New York: Apress, 2021. 350 p.
7. Bard, J. FPV Video Latency: Analog vs. Digital Tested. 2022. URL: <https://www.fpvcompare.com/fpv-video-latency-analog-vs-digital-tested> (дата звернення: 19.10.2025).
8. Іванов С. О., Петренко В. П. Особливості розповсюдження радіохвиль у діапазоні 5 ГГц в умовах міської забудови // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2021. № 84. С. 45-52.
9. Balanis, C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016. 1104 p.
10. Team BlackSheep. TBS Fusion Goggle Receiver Module. URL: <https://www.team-blacksheep.com/products/prod:fusion> (дата звернення: 18.10.2025).
11. ImmersionRC. RapidFIRE Goggle Module Technology. URL: <https://www.immersionrc.com/fpv-products/rapidfire/> (дата звернення: 18.10.2025).
12. DJI Technology Co., Ltd. DJI O3 Air Unit User Manual. 2023. URL: <https://www.dji.com/o3-air-unit> (дата звернення: 20.10.2025).
13. Caddx FPV. Walksnail Avatar HD FPV System. 2023. URL: <https://caddxfpv.com/collections/walksnail-avatar-system> (дата звернення: 20.10.2025).
14. Divimath Inc. HDZero Technology Overview. 2023. URL: <https://www.hd-zero.com/> (дата звернення: 20.10.2025).
15. Saunders, S. R., & Aragón-Zavala, A. Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2007. 478 p.
16. Recommendation ITU-R P.525-4. Calculation of free-space attenuation. – Geneva : International Telecommunication Union, 2019. – 4 p.