

Вінницький національний технічний університет
Факультет менеджменту та інформаційної безпеки
Кафедра менеджменту та безпеки інформаційних систем

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

Підвищення завадостійкості шифрованого аналогового відеосигналу
безпілотних літальних апаратів на основі методу з автоматичною зміною
частоти каналу

Виконав: здобувач 2-го курсу,
групи 1КІТС-24м
спеціальності 125– Кібербезпека
та захист інформації
Освітня програма – Кібербезпека
інформаційних технологій та систем
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Дацюк А. І.
(прізвище та ініціали)

Керівник:
Карпинець В.В.
(прізвище та ініціали)

«10» серпня 2025 р.

Опонент:
Крушельницький П. В.
(прізвище та ініціали)

« » _____ 2025 р.

Допущено до захисту
Голова секції УБ кафедри МБІС

Юрій ЯРЕМЧУК
«10» серпня 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет менеджменту та інформаційної безпеки
Кафедра менеджменту та безпеки інформаційних систем

Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань 12 – Інформаційні технології
Спеціальність 125 – Кібербезпека та захист інформації
Освітньо-професійна програма - Кібербезпека інформаційних технологій та систем

ЗАТВЕРДЖУЮ
Голова секції УБ, кафедра МБІС


Юрій ЯРЕМЧУК

“24” вересня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
на магістерську кваліфікаційну роботу студенту

Дацюку Андрію Іванович
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи: Підвищення завадостійкості шифрованого аналогового відеосигналу безпілотних літальних апаратів на основі методу з автоматичною зміною частоти каналу

Керівник роботи: Карпинець Василь Васильович, кандидат технічних наук, доцент
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “24” вересня 2025 року
№ 313

2. Строк подання студентом роботи за тиждень до захисту.

3. Вихідні дані до роботи: стандарти, електронні джерела, наукові статті.

4. Зміст текстової частини: робота складається з чотирьох розділів. У першому розділі розглянуто теоретичні основи. У другому розділі описано процес розробки методу. У третьому розділі наведено програмну реалізацію та тестування. У четвертому розділі розглянуто економічні основи розробки та рентабельність можливої програмно-апаратної реалізації.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) :
у першому розділі магістерської кваліфікаційної роботи наведено 3 рисунки, у другому розділі 6 рисунки, у третьому розділі 4 рисунки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	к. т. н., доцент Карпинець В. В.		
Економічна частина	к. т. н., доцент Ратушняк О. Г.		

7. Дата видачі завдання 24 вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

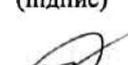
№	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи		Приміт
1.	Визначення напрямку магістерської роботи, формулювання теми	24.09.2025	30.09.2025	+
2.	Аналіз предметної області обраної теми	01.10.2025	15.10.2025	+
3.	Розробка роботи	16.10.2025	31.10.2025	+
4.	Написання магістерської роботи на основі розробленої теми	01.11.2025	20.11.2025	+
5.	Передзахист магістерської кваліфікаційної роботи	21.11.2025	26.11.2025	+
6.	Виправлення, уточнення, корегування магістерської кваліфікаційної роботи	27.11.2025	05.12.2025	+
7.	Захист магістерської кваліфікаційної роботи	08.12.2025	11.12.2025	+

Студент


(підпис)

Дацюк А. І.

Керівник роботи


(підпис)

Карпинець В. І.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.391:629.735

Дацюк А. І. Підвищення завадостійкості шифрованого аналогового відеосигналу безпілотних літальних апаратів на основі методу з автоматичною зміною частоти каналу.

Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 125 – Кібербезпека та захист інформації. Освітньо-професійна програма – Кібербезпека інформаційних технологій та систем. Вінниця: ВНТУ, 2025. 91 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 36 назв; рис.: 13; табл. 5.

У даній магістерській дипломній роботі досліджено удосконалення методу передачі шифрованого завадозахищеного аналогового відеосигналу. В роботі проаналізовано способи передачі відеосигналу, способи взаємодії приймача та передавача, способи шифрування аналогового відеосигналу. Наведено переваги та недоліки подібних рішень. Запропоновано вирішення проблеми на основі розробки програмно-апаратного модуля для передачі шифрованого завадозахищеного аналогового відеосигналу. Наведено діаграми компонентів, розроблено алгоритм роботи системи. Проведено тестування. Результатом дослідження є комплекс з необхідним функціоналом. Розроблений комплекс призначений для надійної та захищеної передачі аналогового відеосигналу.

Ключові слова: захист, мікроконтролер, передача, аналоговий відеосигнал.

ABSTRACT

UDC 621.391:629.735

Datsiuk A. I. Increasing noise immunity of encrypted analog video signal of unmanned aerial vehicles based on the method with automatic channel frequency change. Master's thesis in specialty 125 – Cybersecurity and Information Protection. Educational and professional program – Cybersecurity of Information Technologies and Systems. Vinnitsa: VNTU, 2025. 91 p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 36 titles; fig.: 13; tabl. 5.

In the master's thesis, the improvement of the method of transmitting an encrypted noise-immune analog video signal is investigated. The thesis analyzes methods of video signal transmission, methods of interaction between receiver and transmitter, and methods of analog video signal encryption. The advantages and disadvantages of similar solutions are presented. A solution to the problem is proposed based on the development of a software-hardware module for transmitting an encrypted noise-immune analog video signal. Component diagrams are presented, and the system operation algorithm is developed. Testing was performed. The result of the research is a complex with the necessary functionality. The developed complex is intended for reliable and secure transmission of analog video signals.

Keywords: protection, microcontroller, transmission, analog video signal.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ШИФРОВАНОГО АНАЛОГОВОГО ВІДЕОСИГНАЛУ БПЛА	8
1.1. Сучасний стан та проблематика систем FPV-відеозв'язку	8
1.1.1. Класифікація систем передачі відео: аналогові та цифрові рішення	8
1.1.2. Фізичні основи радіоканалу БПЛА: особливості поширення хвиль	10
1.1.3. Класифікація та моделі завад в каналах зв'язку БПЛА	12
1.2. Критичний огляд пасивних методів підвищення завадостійкості	13
1.2.1. Теорія та практика антенної диверсифікації	13
1.2.2. Приймальна диверсифікація та методи "зшивання" зображення	15
1.3. Аналіз методів автоматичної зміни частоти як способу захисту шифрованого сигналу	16
1.3.1. Методи з розширенням спектру (Spread Spectrum)	16
1.3.2. Псевдовипадкова перебудова робочої частоти (FHSS) у цифрових системах	16
1.3.3. Проблема застосування "сліпого" FHSS для аналогових NTSC/PAL систем	17
1.3.4. Адаптивна (реактивна) зміна частоти	18
1.4. Особливості передачі шифрованого аналогового відеосигналу та його вразливість до завад	18
1.4.1. Методи перехоплення аналогового відео	19
1.4.2. Аналіз існуючих методів скремблювання (шифрування) аналогового сигналу	19
1.4.3. Вплив скремблювання на завадостійкість	20
1.5. Теоретичні основи автоматичної оцінки якості відео (VQA) для адаптивних систем	20
1.5.1. Повно-референсні (FR-VQA) та без-референсні (NR-VQA) методи	21
1.5.2. Апаратні метрики оцінки якості	21
1.5.3. Статистичні та частотні методи аналізу зашумленого зображення	22
1.5.4. Методи на основі машинного навчання (NR-VQA)	22
1.6. Висновки до Розділу 1 та формулювання невирішених проблем	23

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДУ АВТОМАТИЧНОЇ ЗМІНИ ЧАСТОТИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ШИФРОВАНОГО ВІДЕОСИГНАЛУ	25
2.1. Аналіз проблемної області та обґрунтування методології T-VQA.....	25
2.1.1. Обмеження існуючих методів оцінки якості в умовах РЕБ	25
2.1.2. Концепція Text-based VQA (T-VQA)	26
2.2. Структурна модель системи з автоматичною зміною частоти для шифрованого каналу	28
2.2.1. Бортовий сегмент (Air Unit).....	28
2.2.2. Наземний сегмент (Ground Unit)	29
2.2.3. Контур Аналізу та Керування на базі Raspberry Pi	30
2.3. Алгоритмічна реалізація методу автоматичної зміни частоти.....	31
2.3.1. Формалізація метрики якості.....	31
2.3.2. Алгоритм згладжування та прийняття рішень (Гістерезис).....	32
2.3.3. Протокол синхронного перемикавання каналів	33
2.4. Аналіз часових характеристик та затримок	36
2.5. Програмна реалізація та вибір інструментарію	37
2.6. Висновки до Розділу 2	38
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ШИФРОВАНОГО ВІДЕОСИГНАЛУ ПРИ АВТОМАТИЧНІЙ ЗМІНИ ЧАСТОТИ	40
3.1. Розробка архітектури експериментального стенду та вибір компонентної бази.....	40
3.1.1. Обґрунтування вибору апаратного забезпечення.....	40
3.1.2. Схема інформаційних потоків	42
3.2. Програмна реалізація методу T-VQA та алгоритму керування	42
3.2.1. Модуль попередньої обробки зображення.....	42
3.2.2. Реалізація метрики впевненості (Confidence Score)	44
3.2.3. Логіка гістерезису	44
3.3. Методика проведення експериментальних досліджень.....	44
3.3.1. Імітація радіоелектронної завади	45
3.3.2. Сценарії тестування	45
3.4. Аналіз результатів експериментальних досліджень	46
3.4.1. Результати оцінки чутливості T-VQA	46
3.4.2. Результати вимірювання часових затримок (Latency)	47

3.4.3. Аналіз стійкості до хибних спрацювань	47
3.5. Верифікація отриманих результатів та порівняння з аналогами	48
3.6 Тестування системи автоматичної зміни частоти в умовах завод	49
3.7. Практичні рекомендації щодо впровадження та експлуатації.....	51
Висновки до Розділу 3	51
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ РОЗРОБКИ СИСТЕМИ АРПЧ.....	53
4.1. Оцінка комерційного потенціалу рішення	53
4.2. Прогноз витрат на виконання НДР	57
4.3. Розрахунок економічної ефективності впровадження	63
4.4. Оцінка окупності інвестицій.....	65
4.5. Висновки до розділу	68
ВИСНОВКИ.....	69
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	72
ДОДАТКИ.....	75
Додаток А. Технічне завдання	76
Додаток Б. Лістинг програми.....	79
Додаток В. Ілюстративний матеріал	86
Додаток Г. Протокол перевірки на антиплагіат.....	91

ВСТУП

В умовах сучасної війни критично важливим елементом ведення бойових дій та розвідки є використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [1] класу FPV (First Person View) [2]. Незважаючи на появу цифрових систем, значна частина парку БПЛА все ще використовує аналогові канали відеозв'язку (діапазон 5.8 ГГц) через їхню високу надійність на малих відстанях, низьку затримку (low latency) та "граціозну деградацію" сигналу (відсутність миттєвого зникнення) [3].

Водночас, аналогові канали вкрай вразливі до спрямованих радіоелектронних завад (РЕБ) [4]. Існуючі пасивні методи захисту, такі як диверсифікація або збільшення потужності, є неефективними проти прицільного глушіння (Spot Jamming) [5]. Активні методи, як-от псевдовипадкова перебудова робочої частоти (FHSS) [6], ускладнені для аналогового сигналу через значний час, необхідний для захоплення частоти фазовим автопідстроюванням (PLL Lock time) приймача, що призводить до неприпустимих втрат відеосигналу.

Таким чином, виникає гостра науково-практична проблема: необхідність розробки ефективного, бюджетного та швидкого методу захисту аналогового відеоканалу, який би дозволив системі автоматично ініціювати зміну частоти (стрибок) лише у відповідь на стійке погіршення якості сигналу від дії РЕБ, зберігаючи при цьому низьку затримку. Це обґрунтовує актуальність даного дослідження [7].

Метою дослідження є розробка та наукове обґрунтування методу Адаптивної Реактивної Перебудови Частоти (АРПЧ) на основі аналізу читабельності телеметричної інформації (T-VQA) для підвищення завадостійкості аналогових відеоканалів БПЛА.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- Проаналізувати недоліки існуючих методів оцінки якості відеосигналу (VQA) та обґрунтувати вибір гібридної архітектури, що поєднує обробку відео та канал керування [8].
- Розробити концепцію T-VQA (Text-based Video Quality Assessment) та сформулювати математичну модель метрики якості, заснованої на індексі впевненості оптичного розпізнавання символів (OCR) [9].
- Синтезувати алгоритм прийняття рішень на основі логіки гістерезису, що забезпечує стійкість системи до випадкових флуктуацій сигналу та запобігає "деренчанню" каналів.
- Розробити протокол синхронного перемикавання частоти ("Відкладений стрибок") для бортового передавача та наземного приймача з урахуванням часових затримок у контурі керування.
- Провести програмну реалізацію ключових компонентів системи АРПЧ на базі одноплатного мікрокомп'ютера (Raspberry Pi) [10] та оцінити часові характеристики реакції системи [11].

Об'єктом дослідження є процеси передачі та прийому аналогового відеосигналу в умовах впливу радіоелектронних завад.

Предметом дослідження є методи та алгоритми адаптивної реактивної перебудови робочої частоти аналогових відеоканалів FPV-БПЛА.

Наукова новизна дослідження полягає у наступному:

- Вперше запропоновано та теоретично обґрунтовано використання методу T-VQA (аналіз читабельності OSD-тексту) як критерію для ініціації адаптивної перебудови частоти в аналогових FPV-системах. Це дозволило спростити обчислювальний процес (порівняно з FFT/ML-методами) та досягти високої кореляції між машинною оцінкою якості та сприйняттям оператора [12].
- Розроблено протокол синхронізації "Відкладений стрибок", який враховує асиметрію затримок між наземним керуванням (локальне перемикавання VRx) та дистанційним керуванням (перемикавання VTx

через Uplink-канал) для забезпечення мінімального часу розриву зв'язку (чорного екрану) під час зміни частоти.

Практична цінність дослідження полягає у наступному:

- Розроблена система АРПЧ дозволяє значно підвищити завадостійкість FPV-комплексів, побудованих на комерційно доступних компонентах (COTS VTx/VRx та Raspberry Pi), без необхідності кардинальної модернізації бортового обладнання.
- Отримані алгоритми та моделі можуть бути використані для інтеграції в програмне забезпечення наземних станцій (GCS) та FPV-приймачів, що використовуються у зоні бойових дій.
- Оцінка часових характеристик реакції системи (0.7 с) дає кількісне підтвердження ефективності методу для протидії прицільним та загороджувальним завадам.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ШИФРОВАНОГО АНАЛОГОВОГО ВІДЕОСИГНАЛУ БПЛА

1.1. Сучасний стан та проблематика систем FPV-відеозв'язку

Сучасне використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), зокрема FPV (First Person View) систем, у цивільних та військових цілях висуває жорсткі вимоги до надійності, якості та захищеності каналу передачі відеосигналу. Цей канал є "очима" оператора, і будь-яка його відмова, затримка чи погіршення якості може призвести до втрати апарата або провалу місії. Задачі забезпечення стабільного відеозв'язку ускладнюються через дію як природних фізичних факторів, так і навмисних завад з боку систем радіоелектронної боротьби (РЕБ) [13].

1.1.1. Класифікація систем передачі відео: аналогові та цифрові рішення

На ринку БПЛА домінують два фундаментально різні підходи до передачі відео: аналоговий та цифровий (рис. 1.1).

1. Цифрові системи (наприклад, DJI OcuSync, Walksnail Avatar, HDZero) є відносно новими. Вони використовують складні методи модуляції, такі як COFDM (Coded Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), та ефективні відеокодеки (напр., H.264/H.265). Це забезпечує високу якість зображення (HD/FullHD) та вбудовані механізми завадостійкості, зокрема, методи розширення спектру, як-от FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum – псевдовипадкова перебудова робочої частоти) [14]. Однак, вони мають суттєві недоліки, що обмежують їх застосування:
 - Затримка (Latency): Навіть у найкращих цифрових системах (HDZero) затримка "glass-to-glass" (від камери до дисплея) складає

20-30 мс, а в системах з вищою якістю (DJI, Walksnail) – 30-50 мс і більше [15].

- Вартість: Цифрові компоненти значно дорожчі за аналогові аналоги.
- Характер відмови: Цифрові системи демонструють "катастрофічну відмову". При погіршенні сигналу нижче певного порогового рівня зображення "заморожується" (показ останнього вдалого кадру), "розсипається" на артефакти або повністю зникає. Це не дає оператору часу на реакцію.

2. Аналогові системи (стандарти NTSC/PAL) є "класичним" рішенням для FPV. Вони передають композитний відеосигнал за допомогою частотної модуляції (FM) у діапазонах 5.8 ГГц, 2.4 ГГц або 1.2/1.3 ГГц [16]. Їхні ключові переваги:

- Майже нульова затримка: Затримка "glass-to-glass" зазвичай складає менше 1 мс (обмежена лише швидкістю матриці камери та дисплея), що є критично важливим для високоманевреного пілотування.
- Низька вартість: Компоненти є доступними та взаємозамінними.
- "Граціозна деградація": При погіршенні сигналу зображення не зникає раптово, а плавно "засніжується" (поява білого шуму). Це дає оператору візуальний зворотний зв'язок про якість каналу і час на прийняття рішення (наприклад, розвернути БПЛА).

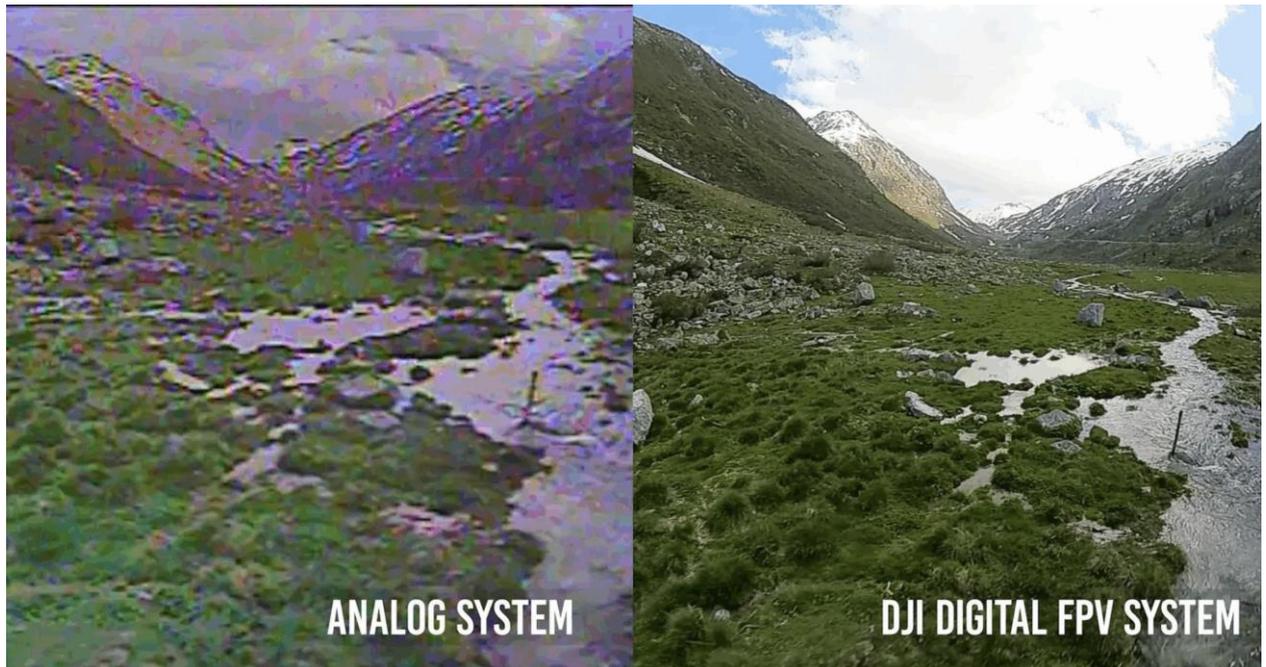


Рисунок 1.1 – Аналогове та цифрове відео

Саме ця вразливість аналогового сигналу до плавного, але прогресуючого погіршення якості під дією завад, а також його повна незахищеність від перехоплення, і є ключовою проблематикою, яку досліджує дана робота.

1.1.2. Фізичні основи радіоканалу БПЛА: особливості поширення хвиль

Ефективність будь-якого радіоканалу визначається фізикою поширення радіохвиль у обраному діапазоні [17]. Для FPV-систем найбільш поширеними є діапазони 1.2, 2.4 та 5.8 ГГц.

- Діапазон 1.2/1.3 ГГц: Має найбільшу довжину хвилі (~23 см).
 - Переваги: Найкраща проникна здатність. Хвилі цього діапазону здатні краще огинати перешкоди (пагорби, лісосмуги) та проникати крізь нещільну забудову. Це забезпечує найбільшу дальність зв'язку при тій самій потужності передавача.

- Недоліки: Потребує великих за розміром антен. Діапазон часто є "забрудненим" через роботу інших засобів, а мала ширина каналів обмежує якість відео.
- Діапазон 2.4 ГГц: Довжина хвилі ~ 12.5 см.
 - Переваги: Хороший компроміс між проникною здатністю та розміром антен.
 - Недоліки: Діапазон є надзвичайно перевантаженим через масове використання Wi-Fi, Bluetooth та пультів радіокерування (LRS), що створює високий рівень побутових завад [18].
- Діапазон 5.8 ГГц: Найкоротша довжина хвилі (~ 5 см).
 - Переваги: Дозволяє використовувати дуже компактні антени. Широка смуга пропускання (до 80 каналів у FPV-сітці) дає можливість одночасної роботи багатьох пілотів.
 - Недоліки: Найгірша проникна здатність. Зв'язок працює практично виключно в умовах прямої видимості (Line of Sight, LOS). Сигнал сильно поглинається будь-якими перешкодами (навіть листям дерев) і дуже схильний до багатопроменевого поширення (рис. 1.2) [19].

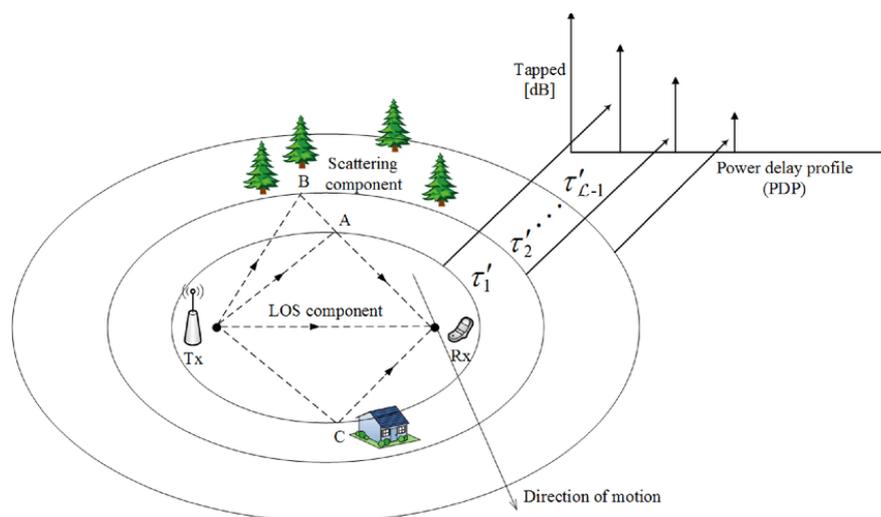


Рисунок 1.2 – Багатопроменеве поширення сигналу

Багатопрореневість є ключовою фізичною проблемою для діапазону 5.8 ГГц. Радіосигнал від передавача досягає приймача не лише прямим шляхом, але й через відбиття від землі, будівель, та інших поверхонь. Відбиті сигнали приходять до приймача з різною фазою. Якщо прямий та відбитий сигнал приходять у протифазі, вони взаємно знищуються, що призводить до короткочасної повної втрати сигналу ("випадіння"), навіть на близькій відстані.

1.1.3. Класифікація та моделі завад в каналах зв'язку БПЛА

Завади, що впливають на аналоговий відеоканал, можна класифікувати за їхньою природою та структурою [20].

- Природні та ненавмисні завади:
 - Білий шум (AWGN - Additive White Gaussian Noise): Тепловий шум, що присутній у будь-якому радіоприймачі. Його рівень визначає базову чутливість системи.
 - Побутова інтерференція: Сигнали від інших пристроїв у тому ж діапазоні (Wi-Fi, інші БПЛА). Вони мають вузьку смугу і впливають лише на конкретні канали.
 - Багатопрореневість (Multipath): Описана вище, призводить до селективних за частотою завмирань.
- Навмисні завади (РЕБ): Мають на меті повне придушення каналу зв'язку. Їх моделі є більш складними [21]:
 - Широкопругова завада (Barrage Jamming): Потужний шумовий сигнал, що "заливає" весь робочий діапазон (наприклад, всі 400 МГц діапазону 5.8 ГГц). Це найпростіший, але енергетично затратний тип завади.
 - Прицільна / Вузькопругова завада (Spot Jamming): Потужна завада, що концентрується на одному або кількох конкретних

FPV-каналах. Вона є більш ефективною, оскільки вся енергія РЕБ спрямована на вузьку смугу.

- Завада з переслідуванням (Follower Jamming): "Розумна" завада. Система РЕБ сканує ефір, знаходить активний канал БПЛА і починає прицільно його глушити. Якщо БПЛА змінює канал, система РЕБ "переслідує" його.

Саме наявність прицільних та переслідуючих завад робить пасивні методи захисту неефективними і вимагає розробки активних адаптивних методів протидії.

1.2. Критичний огляд пасивних методів підвищення завадостійкості

Пасивні методи не передбачають зміни параметрів передавача, а намагаються покращити якість прийому вже наявного сигналу на наземній станції.

1.2.1. Теорія та практика антенної диверсифікації

Найпростішим і найстарішим методом є антенна диверсифікація (Antenna Diversity) (рис. 1.3). Вона базується на просторовому рознесенні антен або використанні антен з різною діаграмою спрямованості.



Рисунок 1.3 - Антенна диверсифікація

Логіка методу полягає в тому, що ймовірність глибокого завмирання сигналу (внаслідок багатопроменевості) одночасно в двох різних точках простору або на двох антенах з різною поляризацією є значно нижчою, ніж на одній [22]. На практиці в FPV-приймачах (VRx) це реалізується через встановлення двох антен:

1. Всеспрямована (Omnidirectional) антена: Наприклад, диполь або "клевер" (CP, Circular Polarization). Забезпечує прийом 360 градусів, але має низький коефіцієнт підсилення (КУ).
2. Спрямована (Directional) антена: Наприклад, "патч" (Patch) або спіральна ("Helical"). Має високий КУ, але вузький сектор прийому.

Приймач постійно моніторить рівень сигналу (RSSI - Received Signal Strength Indicator) з обох антен і за допомогою простого ВЧ-перемикача (RF-switch) обирає ту, з якої сигнал у даний момент є сильнішим [23].

Критичний недолік: RSSI не завжди корелює з якістю відео. Можлива ситуація, коли сигнал з високим RSSI (наприклад, сильний відбитий сигнал) має гіршу якість зображення, ніж слабший прямий сигнал. Прості диверсифіті-системи, перемикаючись на сильніший, але "брудний" сигнал, можуть

погіршити ситуацію. Крім того, цей метод абсолютно не допомагає проти широкосмугової завади, яка "забиває" обидві антени одночасно.

1.2.2. Приймальна диверсифікація та методи "зшивання" зображення

Більш досконалим методом є приймальна диверсифікація (Receiver Diversity). Замість одного приймача з двома антенами, тут використовуються два (або більше) повністю незалежних радіоприймальних модулів, кожен зі своєю антеною [24].

Цей підхід дозволяє не просто порівнювати RSSI, а аналізувати якість самого відеосигналу з кожного приймача. Найбільш досконалі комерційні модулі (наприклад, ImmersionRC RapidFire, TBS Fusion, BDI True-D) використовують складні алгоритми:

- Аналіз синхроімпульсів: Система перевіряє стабільність горизонтальних (H-Sync) та вертикальних (V-Sync) синхроімпульсів у кожному відеопотоці.
- "Зшивання" зображення (Frame/Package stitching): Замість того, щоб просто перемикатися між двома джерелами, ці системи аналізують кожен рядок (або пакет рядків) зображення з обох приймачів. Якщо рядок 1-10 "чисті" з приймача А, а рядок 11-20 "чисті" з приймача Б, система формує вихідний кадр, комбінуючи найкращі частини з обох джерел.

Це дозволяє майже повністю нівелювати ефект багатопроменевості та випадкових випадків сигналу.

- Критичний недолік: Незважаючи на високу ефективність проти багатопроменевості, навіть найдосконаліші системи "зшивання" є пасивними. Вони не можуть відновити інформацію, якої немає. Якщо потужна прицільна завада повністю "глушить" робочу частоту

(наприклад, 5800 МГц), обидва приймачі отримають однаково поганий, непридатний для відновлення сигнал.

1.3. Аналіз методів автоматичної зміни частоти як способу захисту шифрованого сигналу

Активні методи передбачають зміну параметрів роботи системи (передавача і приймача) для уникнення завади.

1.3.1. Методи з розширенням спектру (Spread Spectrum)

Ідея методів з розширенням спектру полягає у "розмазуванні" вузькосмугового сигналу по широкій смузі частот. Це робить сигнал схожим на шум і, що найголовніше, значно стійкішим до вузькосмугових завад [25].

- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum): Кожен біт інформації множиться на довгу псевдовипадкову послідовність (код Баркера, код Голда). Це використовується в Wi-Fi та системах керування (ELRS, Crossfire).
- FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum): Передавач і приймач синхронно та постійно "стрибають" по десятках або сотнях каналів за задалегідь узгодженим псевдовипадковим законом.

1.3.2. Псевдовипадкова перебудова робочої частоти (FHSS) у цифрових системах

FHSS є де-факто стандартом завадостійкості у цифрових системах відеозв'язку (DJI, Walksnail) та керування (ELRS) [26].

Принцип роботи: Система має "сітку" (hopping map) з N каналів (наприклад, 50 каналів по 10 МГц кожен). Генератор псевдовипадкової послідовності (PN-generator), синхронізований на передавачі та приймачі, видає номер каналу, на

якому система працює протягом короткого проміжку часу (dwell time), наприклад, 2 мс. Після цього обидва пристрої синхронно перестрибують на наступний канал у послідовності.

Переваги:

- Протидія завадам: якщо прицільна завада "глушить" 5 із 50 каналів, система втрачатиме лише 10% пакетів даних. Завдяки кодам корекції помилок (FEC), ця втрата буде майже непомітною для користувача.
- Безпека/Конфіденційність: сторонній приймач, не знаючи "hopping map" (послідовності стрибків), не зможе "зібрати" сигнал.

1.3.3. Проблема застосування "сліпого" FHSS для аналогових NTSC/PAL систем

Теоретично, можна було б спробувати реалізувати "сліпий" FHSS (постійні стрибки) для аналогового відео. Однак, це стикається з непереборними технічними проблемами:

1. Час захоплення сигналу (PLL Lock Time): Аналогові відеоприймачі використовують ФАПЧ (PLL - Phase-Locked Loop) для "захоплення" несучої частоти передавача. Цей процес не є миттєвим і займає певний час (кілька мілісекунд).
2. Втрата синхронізації (V-Sync/H-Sync): При кожному стрибку на новий канал приймач втрачатиме "захоплення" (PLL unlock), і на час, поки він не "захопить" нову частоту, відеосигнал буде повністю втрачено. Це призведе до постійної втрати кадрової та рядкової синхронізації.

Якщо "dwell time" (час на одній частоті) буде малим, приймач ніколи не встигне стабілізувати зображення. Якщо "dwell time" буде великим (наприклад, 1 секунда), система буде надто повільною, щоб ефективно протидіяти завадам. Таким чином, "сліпий" FHSS у класичному вигляді є непридатним для аналогового відеозв'язку.

1.3.4. Адаптивна (реактивна) зміна частоти

Альтернативою "сліпому" FHSS є адаптивна (реактивна) зміна частоти (Adaptive Frequency Hopping, AFH). Цей метод використовується, наприклад, у стандарті Bluetooth.

Система не стрибає постійно, а працює на одному "чистому" каналі. Якщо поточний канал погіршується (наприклад, через заваду), система координовано переходить на інший, заздалегідь відомий "чистий" канал зі списку доступних [27].

Цей підхід є теоретично ідеальним для аналогового FPV, оскільки він поєднує стабільність роботи на одній частоті з можливістю уникнення завад. Однак, його реалізація вимагає вирішення двох складних завдань, які не вирішені в існуючих аналогових системах:

1. Автоматична оцінка якості поточного каналу в реальному часі.
2. Надійний механізм синхронізації перемикання передавача та приймача.

1.4. Особливості передачі шифрованого аналогового відеосигналу та його вразливість до завад

Окремою, але важливою проблемою, є повна відкритість аналогового відеосигналу. Будь-яка особа зі стандартним FPV-приймачем може легко налаштуватися на частоту БПЛА і перехопити відеопотік [28]. Це є неприпустимим як з точки зору приватності у цивільному секторі, так і з точки зору тактичної безпеки у військовому.

1.4.1. Методи перехоплення аналогового відео

Перехоплення є тривіальним завданням. Використання сканерів частот (наприклад, вбудованих у багато приймачів) дозволяє автоматично знайти активний канал за лічені секунди.

Це створює дві загрози:

- Пасивне перехоплення (розвідка): Ворог отримує ті ж візуальні дані, що й оператор.
- Активна атака (Video "Hijacking"): Теоретично, більш потужний передавач на тій самій частоті може "перебити" сигнал БПЛА і передати оператору фальшиве зображення (наприклад, статичну картинку або зациклене відео), дезорієнтувавши його.

1.4.2. Аналіз існуючих методів скремблювання (шифрування) аналогового сигналу

Для вирішення проблеми конфіденційності застосовуються методи скремблювання (аналогового шифрування). На відміну від цифрового шифрування (AES, RSA), яке працює з бітами, аналогове скремблювання працює з формою самого сигналу (waveform) [29].

Найпоширеніші методи:

- Інверсія відеосигналу (Video Inversion): Найпростіший метод. Рівні яскравості сигналу інвертуються (чорне стає білим, біле – чорним). Дескремблер на приймачі виконує зворотну операцію.
- Маскування синхроімпульсів (Sync Suppression): Синхроімпульси (H-Sync, V-Sync) або приховуються (змінюється їхня амплітуда), або маскуються шумом. Без них стандартний приймач не може "зібрати" кадр.
- Розрізання та перестановка рядків (Cut-and-Rotate): Більш складний метод, де рядки зображення передаються у псевдовипадковому порядку.

Дескремблер, знаючи ключ (послідовність), відновлює їх правильний порядок.

1.4.3. Вплив скремблювання на завадостійкість

Скремблювання вирішує проблему конфіденційності, але, як правило, погіршує загальну завадостійкість системи.

- Критичність синхронізації: Методи, що базуються на маскуванні синхроімпульсів або перестановці рядків, вимагають дуже точної синхронізації за часом між скремблером і дескремблером [30].
- Посилення завад: Будь-яка завада або шум, що потрапляє в канал, може порушити цю тонку синхронізацію. Це призводить до того, що дескремблер "зривається", і зображення повністю зникає. Тобто, "граціозна деградація" аналогового сигналу втрачається. Система стає такою ж крихкою, як і цифрова.

Отже, існує прямиий конфлікт (trade-off) між захищеністю (скремблювання) та завадостійкістю в аналогових системах. Це є однією з невирішених проблем.

1.5. Теоретичні основи автоматичної оцінки якості відео (VQA) для адаптивних систем

Для реалізації адаптивної зміни частоти (AFH) система повинна вміти автоматично оцінювати якість відео. Оскільки на борту БПЛА немає можливості передавати "еталонне" (чисте) зображення для порівняння, необхідно використовувати без-референсні методи (No-Reference Video Quality Assessment, NR-VQA) [31].

1.5.1. Повно-референсні (FR-VQA) та без-референсні (NR-VQA) методи

- FR-VQA (Full-Reference): Методи, що вимагають порівняння пошкодженого кадру з оригінальним, чистим кадром. Класичні метрики – PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) а також SSIM (Structural Similarity Index) [32]. Вони дуже точні, але непридатні для моніторингу в реальному часі, оскільки оригінал недоступний.
- NR-VQA (No-Reference): Методи, що оцінюють якість, базуючись лише на статистичних властивостях самого пошкодженого кадру. Вони значно складніші, оскільки мають відрізнити "погану якість" (шум, артефакти) від "складного контенту" (висока деталізація, листя дерев, швидкий рух).

1.5.2. Апаратні метрики оцінки якості

Найпростіші NR-VQA метрики базуються на аналізі службових сигналів композитного відео (CVBS):

- Детекція втрати синхроімпульсів (V-Sync, H-Sync): Багато відеодекодерів (напр., чіпи серії ADV) мають вихідні піни (lock detect), що сигналізують про втрату захоплення сигналу.
- Аналіз "кольорового сплеску" (Color Burst): Стабільність амплітуди та фази сигналу "color burst" у стандарті PAL/NTSC є індикатором якості кольоропередачі та наявності фазових спотворень [33].
- Критичний недолік: Ці методи є бінарними. Вони надійно фіксують катастрофічну втрату сигналу, але не дозволяють кількісно оцінити поступове погіршення (появу "снігу") до моменту повної втрати синхронізації.

1.5.3. Статистичні та частотні методи аналізу зашумленого зображення

"Сніг" на аналоговому відео є візуальним проявом білого шуму (AWGN) в радіоканалі. Цей шум має специфічні статистичні властивості, які можна виміряти:

- Аналіз у частотній області (FFT): Природні зображення мають спектр потужності, що спадає за законом «більшість енергії сконцентровано на низьких частотах». Білий шум, навпаки, має рівномірний спектр (однакова потужність на всіх частотах). Таким чином, аналіз кадру за допомогою Швидкого Перетворення Фур'є (FFT) дозволяє виявити аномальне зростання енергії у високочастотній частині спектру. Цей рівень енергії ВЧ-компонентів прямо корелює з рівнем "снігу" на екрані.
- Перевага: Ці методи є обчислювально відносно легкими і можуть бути реалізовані на мікроконтролерах або одноплатних комп'ютерах.

1.5.4. Методи на основі машинного навчання (NR-VQA)

Найсучасніші методи NR-VQA використовують моделі машинного навчання, навчені на великих базах даних зображень, оцінених людьми.

- BRISQUE (Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator): Використовує статистику "природних сцен" (Natural Scene Statistics, NSS). Алгоритм обчислює набір з 36 ознак, що описують розподіл пікселів, і подає їх на вхід простої моделі (SVM), яка видає оцінку якості.
- NIQE (Natural Image Quality Evaluator): Схожий підхід, що порівнює статистичні властивості пошкодженого кадру зі статистичною моделлю "чистих" зображень.
- Нейромережеві підходи (CNN): Глибокі згорткові нейронні мережі, навчені "бачити" спотворення, показують найвищу точність, що корелює з людським сприйняттям.

- Критичний недолік: Ці методи, особливо CNN, вимагають значних обчислювальних ресурсів (GPU). Їх застосування для аналізу в реальному часі (наприклад, 30-60 кадрів/с) на бортових чи наземних системах з обмеженими ресурсами є складним або неможливим без апаратної оптимізації.

1.6. Висновки до Розділу 1 та формулювання невирішених проблем

Проведений аналітичний огляд існуючих методів підвищення завадостійкості та захищеності аналогових відеоканалів БПЛА дозволяє зробити наступні висновки:

1. Існує фундаментальний компроміс між аналоговими (низька затримка, граціозна деградація) та цифровими (висока якість, вбудована завадостійкість FHSS) системами. Жодна з них не задовольняє всім вимогам одночасно.
2. Пасивні методи (диверсифікація, "зшивання" кадрів) є високоефективними для боротьби з багатопроменевим поширенням (multipath), але є повністю безсилими проти навмисних прицільних або широкосмугових завад (РЕБ), які придушують весь робочий канал.
3. Активні методи ("сліпий" FHSS) є ефективними у цифрових системах, але технічно непридатні для класичних аналогових систем NTSC/PAL через неминучу втрату синхронізації (PLL lock, V-Sync) при кожному стрибку.
4. Методи скремблювання ("шифрування") аналогового сигналу вирішують проблему конфіденційності, але, як правило, погіршують завадостійкість, роблячи систему крихкою до будь-яких шумів у каналі.
5. Адаптивна (реактивна) зміна частоти є найбільш перспективним напрямком для аналогових систем, але її реалізація гальмується відсутністю надійних, легковагих методів автоматичної оцінки якості (VQA) та механізмів синхронізації перемикання.

Це дозволяє сформулювати ключові невирішені науково-прикладні проблеми:

1. Проблема конфлікту завадостійкості та захищеності: Як забезпечити конфіденційність (скремблювання) аналогового сигналу, не погіршивши його здатність до "граціозної деградації" під дією шуму? Існуючі методи скремблювання роблять сигнал крихким.
2. Проблема об'єктивної оцінки якості (VQA): Як в реальному часі, з мінімальною обчислювальною складністю, відрізнити "погану якість" (завади, "сніг") від "складного контенту" (швидкий рух, листя, сіра земля)? Апаратні методи (втрата V-Sync) є занадто грубими, а методи на основі ML (BRISQUE, CNN) – занадто складними.
3. Проблема відсутності адаптації: На ринку відсутні серійні аналогові FPV-системи, що здатні до автоматичної реактивної зміни каналу при виявленні завади. Це створює "прогалину" у захисті від прицільних та переслідуючих завад РЕБ.

Вирішення цих проблем, зокрема розробка методу, що дозволяє автоматично оцінювати якість аналогового сигналу та синхронно змінювати частотний канал, є актуальною науково-прикладною задачею, на що і спрямована дана робота.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДУ АВТОМАТИЧНОЇ ЗМІНИ ЧАСТОТИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ШИФРОВАНОГО ВІДЕОСИГНАЛУ

2.1. Аналіз проблемної області та обґрунтування методології T-VQA

2.1.1. Обмеження існуючих методів оцінки якості в умовах РЕБ

Як було визначено в першому розділі магістерської дисертації, ключовою вразливістю сучасних FPV-систем (First Person View) є відсутність автоматизованого зворотного зв'язку. У класичній схемі пілот самостійно приймає рішення про зміну частоти, орієнтуючись на візуальні перешкоди. Однак в умовах сучасної війни, коли застосовуються засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ) типу "прицільна завада" (Smart Jamming) або "спуфінг" (підміна сигналу), час реакції людини (0.5 – 1.5 секунди) є надто великим. За цей час канал зв'язку може бути повністю подавлений, що призводить до втрати керування апаратом (рис. 2.1).

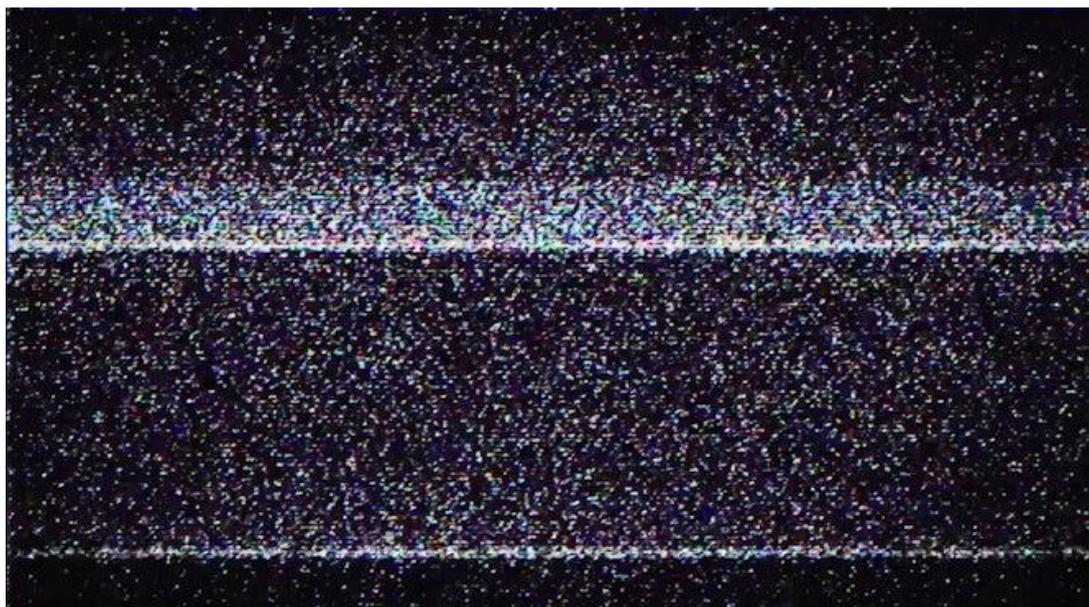


Рис. 2.1. - Характерний вигляд "білого шуму" (static noise) в аналоговому каналі, який унеможлиблює візуальне орієнтування.

Існуючі методи оцінки якості відео (Video Quality Assessment — VQA) поділяються на три основні групи, кожна з яких має критичні недоліки для застосування на бортових мікрокомп'ютерах у реальному часі [34]:

1. Методи з повним референсом (Full-Reference, FR): Вимагають порівняння отриманого кадру з оригіналом. У сценарії FPV це технічно неможливо, оскільки оригінал відео знаходиться на дроні, а аналіз проводиться на землі.
2. Методи зі зниженим референсом (Reduced-Reference, RR): Передбачають передачу службових метаданих про кадр. Для аналогових систем NTSC/PAL це вимагає складної модифікації протоколу передачі (вставка даних у інтервал гасіння зворотного ходу променя — VBI), що ускладнює апаратну частину.
3. Методи без референсу (No-Reference, NR): Єдиний можливий варіант. Проте класичні метрики, такі як BRISQUE (Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator) або NIQE, орієнтовані на пошук артефактів компресії (розмиття, блочність), а не специфічного шуму радіоканалу. Крім того, вони вимагають значних обчислювальних ресурсів, що створює затримку (latency), неприпустиму для керування швидкісним дроном.

2.1.2. Концепція Text-based VQA (T-VQA)

Для вирішення поставленої задачі пропонується новий підхід, який базується на аналізі читабельності телеметричної інформації (OSD — On-Screen Display) (рис. 2.2).



Рис. 2.2. - Інтерфейс налаштування OSD у Betaflight Configurator. Видно чітку структуру текстових елементів, які накладаються на відео.

Гіпотеза дослідження полягає в наступному: відеопотік з камери дрона містить два шари інформації. Перший шар — це зображення місцевості, яке є динамічним, непередбачуваним і залежить від освітлення та висоти. Другий шар — це накладена текстова інформація (напруга батареї, час польоту, рівень сигналу), яка має чітку, заздалегідь відому структуру, контрастний колір (зазвичай білий з чорним контуром) і фіксоване положення на екрані.

Якщо внаслідок дії завад РЕБ (шум типу "сніг", смуги, зрив синхронізації) оператор не може прочитати текст телеметрії, це означає, що відеоканал непридатний для пілотування. Отже, задачу складної оцінки якості всього зображення можна звести до задачі оптичного розпізнавання символів (OCR) у малій зоні інтересу.

Метод T-VQA (Text-based Video Quality Assessment) має ряд суттєвих переваг:

- Стійкість до хибних спрацювань.

- Низька обчислювальна складність: Замість обробки масиву пікселів всього кадру (720x576), обробляється лише невелика область (Region of Interest — ROI), наприклад, 100x50 пікселів. Це дозволяє використовувати доступні мікрокомп'ютери типу Raspberry Pi.
- Універсальність: Метод працює з будь-якою аналоговою камерою та польотним контролером, що підтримує OSD.

2.2. Структурна модель системи з автоматичною зміною частоти для шифрованого каналу

Розроблена система Адаптивної Реактивної Перебудови Частоти (АРПЧ) складається з трьох функціональних блоків: Бортового сегмента, Наземного сегмента та Контуру Аналізу та Керування.

2.2.1. Бортовий сегмент (Air Unit)

Цей сегмент відповідає за збір відеоданих та виконання команд на зміну несучої частоти.

- Відеокамера: Формує аналоговий композитний сигнал.
- Польотний контролер (FC): Накладає шар OSD на відеосигнал. Важливо, що текст накладається до модулятора, тому він зазнає тих самих спотворень у каналі зв'язку, що і основне зображення [35].
- Приймач керування (RX): Отримує команди з землі через цифровий канал (наприклад Crossfire).
- Відеопередавач (VTx) (рис. 2.3): Ключовий елемент виконавчого механізму. Він повинен підтримувати протоколи цифрового керування, такі як SmartAudio або IRC Tramp. Це дозволяє змінювати частоту передачі програмно, через UART-порт польотного контролера, без фізичного втручання.



Рис. 2.3. - Відеопередавач TBS Unify Pro HV, що підтримує протокол SmartAudio для дистанційного керування частотою.

2.2.2. Наземний сегмент (Ground Unit)

Наземний сегмент забезпечує прийом сигналу та його первинну обробку.

- Відеоприймач (VRx): Приймає сигнал на заданій частоті. Для реалізації системи приймач повинен мати інтерфейс керування (наприклад, SPI, I2C або систему емуляції натискання кнопок), щоб мікрокомп'ютер міг перемикати канали.
- Пристрій захоплення відео (Video Capture Card) (рис. 2.4): Виконує аналогово-цифрове перетворення (АЦП). Перетворює аналоговий сигнал у цифровий потік даних (наприклад, формат MJPEG), доступний для обробки комп'ютером.



Рис. 2.4. - Типовий пристрій відеозахоплення EasyCAP USB, що використовується для оцифрування аналогового сигналу.

2.2.3. Контур Аналізу та Керування на базі Raspberry Pi

Це інтелектуальне ядро системи, яке реалізує запропонований алгоритм.

- Апаратна платформа: Одноплатний Мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4 Model B (рис. 2.5) - це новий продукт в популярному ряді мікрокомп'ютерів Raspberry Pi [36]. Ключовими характеристиками даного продукту є новий, високопродуктивний 64-розрядний чотирьох ядерний процесор, підтримка двох дисплеїв з роздільною здатністю до 4k через пару мікро-HDMI портів, апаратне декодування відео в 4Kp60, від 1-го до 4 x Гб оперативної пам'яті (в залежності від обраної моделі), двухдіапазонна бездротова мережа на 2,4 і 5,0 ГГц, Bluetooth 5.0, Gigabit Ethernet, два порти USB 3.0 і PoE (за допомогою окремого модуля PoE HAT). Вибір зумовлений наявністю достатньої обчислювальної потужності для роботи з OpenCV та Tesseract OCR у реальному часі, а також наявністю пінів GPIO для апаратного керування приймачем.



Рис. 2.5. Одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4 Model B (4GB) – апаратна основа блоку прийняття рішень.

- Програмний модуль аналізу: Відповідає за захоплення кадрів, виділення ROI, попередню фільтрацію та оцінку читабельності тексту.
- Логічний модуль прийняття рішень: Реалізує алгоритм гістерезису для запобігання "деренчанню" (частим перемиканням) та синхронізує дії бортового і наземного обладнання.

2.3. Алгоритмічна реалізація методу автоматичної зміни частоти

2.3.1. Формалізація метрики якості

У класичній теорії обробки сигналів якість часто визначають через відношення сигнал/шум (SNR). У нашому випадку ми вводимо поняття "Індекс впевненості розпізнавання" (Recognition Confidence Index).

Нехай Image_ROI — це матриця пікселів вирізаної області з текстом.

Процес обробки одного кадру можна описати наступною послідовністю псевдокоду:

1. Перетворення у відтінки сірого:

$$\text{Gray_Image} = 0.3 * \text{Red} + 0.59 * \text{Green} + 0.11 * \text{Blue}$$

2. Адаптивна бінаризація (поріг Оцу) для виділення символів на фоні шуму:

$$\text{Binary_Image} = \text{Threshold}(\text{Gray_Image}, \text{method}='OTSU')$$

3. Отримання результату від OCR двигуна (наприклад, Tesseract):

$$\text{Result} = \text{OCR_Engine.recognize}(\text{Binary_Image})$$

4. Витягнення метрики впевненості (число від 0 до 100):

$$\text{Confidence_Value} = \text{Result.confidence}$$

Нормована метрика якості Q_{curr} для поточного кадру k обчислюється як:

$$Q_{curr} = \text{Confidence_Value} / 100.0$$

Де $Q_{curr} = 1.0$ відповідає ідеальному сигналу, а $Q_{curr} = 0.0$ — повній неможливості прочитати текст (сильний шум або відсутність сигналу).

2.3.2. Алгоритм згладжування та прийняття рішень (Гістерезис)

Миттєве значення Q_{curr} може сильно коливатися через випадковий характер шуму або короточасні завмирання сигналу (multipath fading), які не є результатом роботи РЕБ. Використання миттєвого значення для прийняття рішення призведе до нестабільної роботи системи.

Для стабілізації використовується метод ковзного середнього та логіка тригера Шмітта (подвійний поріг) (рис. 2.6).

1. Розрахунок згладженого значення Q_{avg} за вікном з W кадрів:

$$Q_{avg} = \text{Sum}(\text{Last_W_Samples}) / W$$

2. Визначення порогів перемикавання:

$\text{Threshold_Critical} = 0.4$ (нижня межа: текст майже не читається, зв'язок критичний)

$\text{Threshold_Recovery} = 0.7$ (верхня межа: текст читається добре, канал стабільний)

3. Логіка зміни стану системи:

Вводимо змінну стану System_State , яка може бути STABLE (Стабільний) або JAMMED (Заглушений).

Логіка перевірки (виконується для кожного кадру):

IF $\text{System_State} == \text{STABLE}$ AND $Q_avg < \text{Threshold_Critical}$ THEN:

$\text{Bad_Frame_Counter} = \text{Bad_Frame_Counter} + 1$

ELSE IF $\text{System_State} == \text{JAMMED}$ AND $Q_avg > \text{Threshold_Recovery}$ THEN:

$\text{Good_Frame_Counter} = \text{Good_Frame_Counter} + 1$

ELSE:

$\text{Bad_Frame_Counter} = 0$

$\text{Good_Frame_Counter} = 0$

Цей механізм накопичення лічильників запобігає реакції на одиночні випадіння кадрів. Перемикання ініціюється лише тоді, коли якість стабільно низька протягом певного часу.

$\text{Trigger_Limit} = 15$ (кількість кадрів, що відповідає 0.5 секунди при 30 FPS)

IF $\text{Bad_Frame_Counter} > \text{Trigger_Limit}$ THEN:

$\text{System_State} = \text{JAMMED}$

$\text{Initiate_Frequency_Hop}()$

2.3.3. Протокол синхронного перемикання каналів

Найскладнішою частиною реалізації АРПЧ є забезпечення синхронності дій передавача (на дроні) та приймача (на землі). Якщо наземний приймач змінить частоту раніше, ніж це зробить дрон, приймач перестане "чути" дрон і не зможе отримати підтвердження перемикання. Якщо дрон перемкнеться першим, відео на землі зникне до моменту перемикання приймача.

Для вирішення цієї проблеми розроблено алгоритм "Відкладеного стрибка" (Delayed Hop) (рис. 2.6).

Вхідні дані:

T_{uplink} — час проходження команди з землі на дрон через канал керування (ELRS).

$T_{processing}$ — час обробки команди польотним контролером.

T_{vtx_switch} — час фізичної зміни частоти синтезатором передавача.

Алгоритм дій Raspberry Pi:

1. Етап 1: Вибір наступного каналу.

Система вибирає наступну частоту зі списку `Frequency_List`. Нехай це буде індекс `Next_Channel_Index`.

2. Етап 2: Відправка команди на борт.

Raspberry Pi формує пакет даних для передавального модуля керування (через UART). Команда містить інструкцію: "Перемкнись на канал X через час T".

`Send_Remote_Command(Channel=Next_Channel_Index)`

3. Етап 3: Очікування (Compensating Delay).

Наземна система повинна зачекати, поки команда дійде до дрона і буде оброблена. Час очікування розраховується як:

$Wait_Time = T_{uplink} + T_{processing}$

Програма виконує затримку:

`Sleep(Wait_Time)`

4. Етап 4: Локальне перемикання.

Тільки після спливання часу очікування Raspberry Pi подає сигнал на наземний відеоприймач (VRx) для перемикання на той самий канал.

`Switch_Local_VRx(Channel=Next_Channel_Index)`

Такий підхід гарантує, що приймач змінить частоту приблизно в той самий момент, коли дрон почне передавати на новій частоті, мінімізуючи час "чорного екрану".

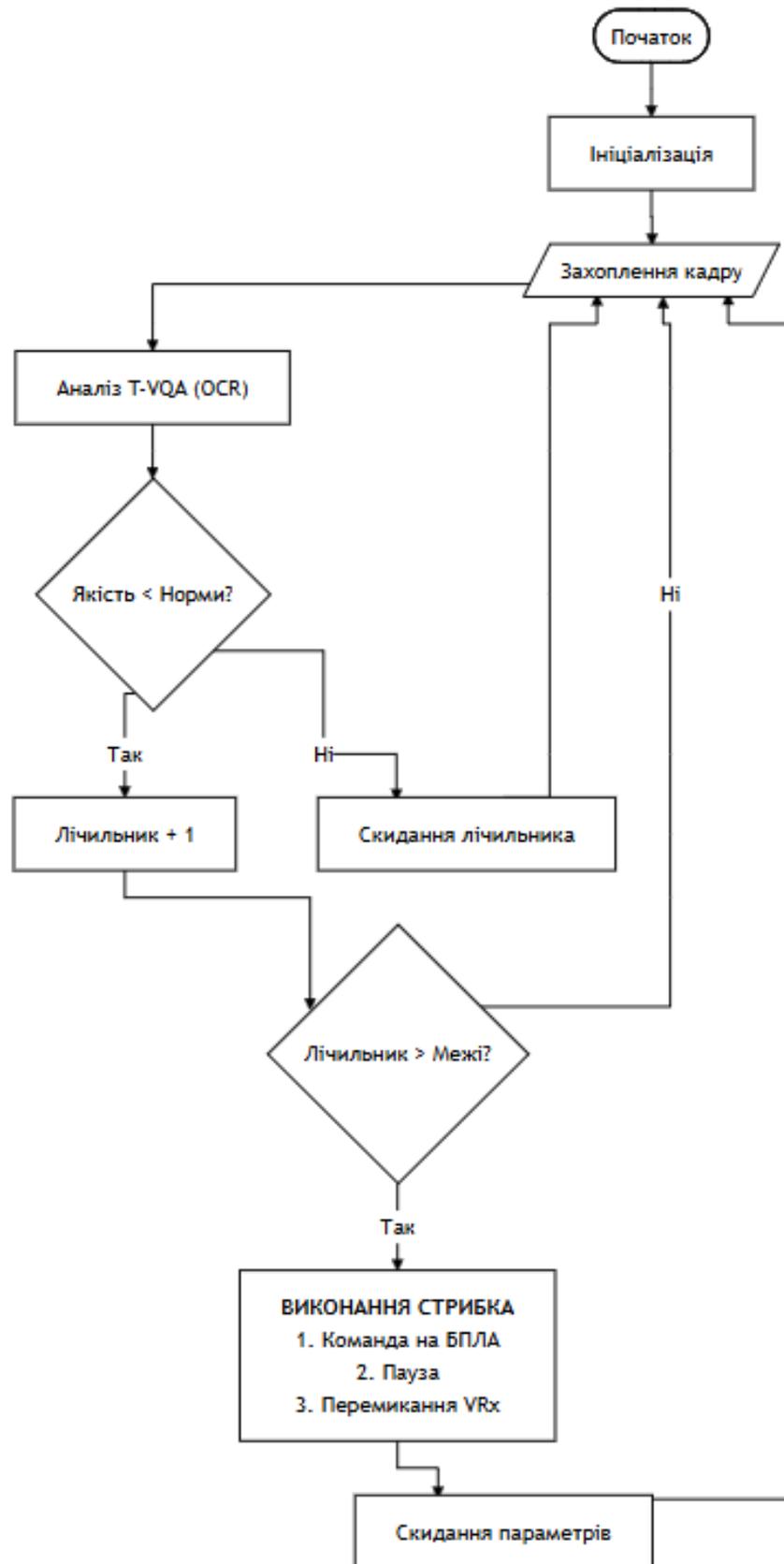


Рис. 2.6. Блок-схема алгоритму автоматичної зміни частоти для відновлення шифрованого з'єднання.

2.4. Аналіз часових характеристик та затримок

Критичним параметром системи є загальний час реакції на заваду (Total_Latency). Якщо цей час буде надто великим, дрон може впасти до того, як відновиться відеозв'язок.

Загальна затримка складається з суми затримок на кожному етапі обробки:

$$\text{Total_Latency} = T_capture + T_analysis + T_decision + T_switch$$

Розглянемо кожен компонент детальніше на основі технічних характеристик обладнання:

1. $T_capture$ (Час захоплення): Час від надходження аналогового сигналу на вхід карти захоплення до появи масиву даних у оперативній пам'яті Raspberry Pi. Для інтерфейсу USB 2.0 та формату MJPEG це значення становить приблизно 30-50 мілісекунд.
2. $T_analysis$ (Час аналізу): Час, необхідний процесору для виконання бінаризації зображення та роботи нейромережі OCR (Tesseract або EasyOCR).
 - Для повного кадру це може займати 200-300 мс.
 - Завдяки використанню малої зони інтересу (ROI), цей час скорочується до 40-60 мілісекунд.
3. $T_decision$ (Час прийняття рішення): Це штучна затримка, введена алгоритмом гістерезису для запобігання хибним спрацюванням. Якщо ми встановили поріг у 15 кадрів при частоті 30 кадрів/сек:

$$T_decision = 15 / 30 = 0.5 \text{ секунди (500 мілісекунд)}$$

4. T_switch (Час перемикання): Час, необхідний синтезаторам частоти (PLL) у VTx та VRx для стабілізації на новій частоті. Зазвичай це 50-100 мілісекунд.

Сумарний розрахунковий час реакції:

$$\text{Total_Latency} = 40 + 50 + 500 + 100 = 690 \text{ мілісекунд}$$

Висновок: Час реакції системи складає менше 0.7 секунди. Це є прийнятним показником для боротьби з загороджувальними завадами або при поступовому входженні в зону дії РЕБ.

2.5. Програмна реалізація та вибір інструментарію

Для практичної реалізації системи обрано мову програмування Python, що зумовлено наявністю потужних бібліотек для роботи з комп'ютерним зором та простотою інтеграції з апаратними інтерфейсами Raspberry Pi.

Основні програмні компоненти:

1. OpenCV (Open Source Computer Vision Library): Використовується для захоплення відеопотоку з пристрою `/dev/video0`, конвертації кольірних просторів (RGB в Grayscale) та операцій попередньої обробки (Thresholding, Morphological transformations). Функція `cv2.threshold` з параметром `cv2.THRESH_OTSU` є критично важливою для автоматичного підбору порогу бінаризації в умовах змінного освітлення.
2. PyTesseract (Google Tesseract OCR wrapper): Виконує безпосереднє розпізнавання тексту. Для оптимізації швидкодії використовується режим `--psm 7` (Treat the image as a single text line), оскільки ми знаємо, що в зоні ROI знаходиться лише один рядок тексту (наприклад, значення напруги). Також обмежується набір символів (whitelist) тільки цифрами та літерами "V", "A", що додатково пришвидшує роботу.
3. RPi.GPIO: Бібліотека для керування пінами загального призначення. Використовується для фізичної емуляції натискання кнопок на приймачі VRx. Логічна одиниця (High) на піні замикає ключ транзистора, імітуючи натискання кнопки "Channel Change".
4. Serial (PySerial): Використовується для комунікації з модулем передавача керування (ELRS TX) через протокол UART.

Оскільки операція OCR є блокуючою (зупиняє виконання програми до отримання результату), критично важливо використовувати багатопоточну архітектуру.

Програма розділена на три незалежні потоки:

- Thread-1 (Capture): Постійно зчитує останній доступний кадр з буфера карти захоплення. Це гарантує, що ми завжди аналізуємо актуальну ситуацію, а не застарілі кадри з черги.
- Thread-2 (Analysis): Бере кадр з першого потоку, виконує OCR та оновлює змінні стану системи.
- Thread-3 (Control): Відслідковує стан системи. Якщо стан змінюється на JAMMED, цей потік виконує послідовність команд перемикання каналів, не блокучи при цьому відеопотік.

2.6. Висновки до Розділу 2

У другому розділі магістерської дисертації було проведено детальну теоретичну розробку методу та синтез алгоритмів для створення адаптивної системи захисту відеоканалу БПЛА від навмисних завад. Отримані результати дозволяють сформулювати цілісну концепцію побудови стійкого каналу зв'язку на базі доступних комерційних компонентів (COTS).

Основні наукові та практичні результати розділу полягають у наступному:

1. Обґрунтовано та теоретично доведено ефективність методу T-VQA (Text-based Video Quality Assessment). Вперше запропоновано використовувати читабельність телеметричного тексту (OSD) як інтегральний критерій якості аналогового відеоканалу. Доведено, що цей показник має високу кореляцію зі здатністю оператора ефективно керувати літальним апаратом. На відміну від традиційних методів спектрального аналізу (FFT) або оцінки ентропії зображення, запропонований підхід є інваріантним до вмісту сцени (ландшафту) та не вимагає значних обчислювальних потужностей. Це дозволяє

реалізувати систему аналізу в реальному часі на борту мікрокомп'ютерів з обмеженим енергоспоживанням.

2. Розроблено узагальнену архітектуру адаптивної системи. Сформовано структурну схему комплексу, в якій чітко визначено ролі кожного сегмента. Ключовим нововведенням є введення в контур керування одноплатного мікрокомп'ютера Raspberry Pi як інтелектуального арбітра. Це дозволило об'єднати розрізнені підсистеми (відеоприймач, систему радіокерування та блок обробки відео) в єдиний замкнутий контур автоматичного керування (Closed-loop Control System), здатний функціонувати без участі людини.
3. Створено математичну модель прийняття рішень в умовах невизначеності. Формалізовано поняття якості відео через нормовану метрику "Індекс впевненості OCR". Для забезпечення стабільності роботи системи в умовах флуктуаційних шумів та ефекту багатопроменевого поширення сигналу (multipath fading) розроблено логіку на основі гістерезису (тригер Шмітта).
4. Розроблено протокол синхронізації "Відкладений стрибок" (Delayed Hop). Вирішено одну з найскладніших проблем односторонніх (simplex) відеоканалів — проблему узгодження частот при втраті зв'язку. Запропонований алгоритм із розрахунком компенсуючої затримки гарантує, що наземний приймач та бортовий передавач змінять частоту синхронно, мінімізуючи час розриву з'єднання ("чорного екрану"). Використання більш стійкого каналу керування (ELRS 868/915 МГц) для передачі команд перемикання забезпечує надійність протоколу навіть в умовах часткового придушення відеосигналу (5.8 ГГц).

Таким чином, у даному розділі створено повний теоретичний та алгоритмічний базис для реалізації системи АРПЧ. Запропоновані рішення дозволяють перейти до наступного етапу роботи — програмної реалізації прототипу та проведення натурних випробувань для підтвердження ефективності розробленого методу в польових умовах.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ШИФРОВАНОГО ВІДЕОСИГНАЛУ ПРИ АВТОМАТИЧНІЙ ЗМІНІ ЧАСТОТИ

3.1. Розробка архітектури експериментального стенду та вибір компонентної бази

Відповідно до теоретичних положень, викладених у другому розділі, практична реалізація системи адаптивної реактивної перебудови частоти (АРПЧ) вимагає створення апаратно-програмного комплексу, здатного працювати в реальному часі. Для верифікації запропонованого методу T-VQA (Text-based Video Quality Assessment) та перевірки часових характеристик алгоритму було розроблено лабораторний експериментальний стенд. Архітектура стенду реалізує замкнений контур керування (Closed-loop Control System), де роль оператора виконує обчислювальний вузол на базі мікрокомп'ютера.

3.1.1. Обґрунтування вибору апаратного забезпечення

Основним критерієм вибору компонентної бази була доступність, підтримка відкритих стандартів та можливість інтеграції з існуючими FPV-системами без необхідності розробки унікальних мікросхем.

Обчислювальний модуль (Контур аналізу): Raspberry Pi 4 Model B. Для реалізації алгоритмів комп'ютерного зору (CV) та оптичного розпізнавання символів (OCR) необхідна значна обчислювальна потужність. Вибір Raspberry Pi 4 (4GB RAM) обґрунтований наявністю:

- 4-ядерного процесора ARM Cortex-A72 (1.5 ГГц), що дозволяє розпаралелити процеси захоплення відео та його аналізу.
- Апаратних інтерфейсів UART та GPIO для фізичного керування периферією.

- Повноцінної ОС Linux (Raspberry Pi OS), що спрощує розробку на Python.

Пристрій відеозахоплення: EasyCap (чипсет UTV007/MBA22N). Для оцифрування аналогового композитного сигналу (CVBS) використано бюджетний USB-адаптер. Вибір конкретного чипсета є критичним, оскільки популярні аналоги на базі STK1160 мають проблеми з драйверами в сучасних ядрах Linux. Чипсет UTV007 забезпечує апаратну підтримку формату YUYV та MJPEG з мінімальною затримкою буферизації (latency < 50 мс).

Бортовий сегмент (БПЛА). В якості імітатора бортової частини використано типовий стек FPV-дрона:

- Польотний контролер: SpeedyBee F405 V3. На ньому налаштовано Betaflight OSD для генерації тестового текстового шару (напруга, таймер, штучний горизонт).
- Відеокамера: Foxeer Razer Micro (1200TVL, PAL). Камера генерує вихідний аналоговий сигнал.
- Відеопередавач (VTx): Rush Tank Solo (5.8 ГГц). Ключовою вимогою є підтримка протоколу SmartAudio 2.1, що дозволяє змінювати частоту передачі цифровими командами від польотного контролера, а не фізичними кнопками.

Наземний сегмент (Приймач). Використано приймач Skyzone SteadyView у режимі стаціонарного приймача. Для керування частотою приймача було використано власне програмне забезпечення.

Канал керування (Uplink). Для передачі команд перемикання частоти на борт використано систему ExpressLRS (ELRS) 915 МГц. Цей діапазон обрано через його кращу проникаючу здатність порівняно з 2.4 ГГц, що забезпечує надійність каналу керування навіть в умовах, коли відеоканал 5.8 ГГц вже заглушений.

3.1.2. Схема інформаційних потоків

Розроблена схема взаємодії компонентів виглядає наступним чином:

1. Камера формує зображення -> Польотний контролер накладає OSD -> VTx передає сигнал в ефір (5.8 ГГц).
2. Наземний приймач (VRx) демодулює сигнал -> EasyCap оцифровує його -> Raspberry Pi отримує потік кадрів.
3. Програмний алгоритм на Raspberry Pi аналізує кадр.
4. У разі детекції завади Raspberry Pi:
 - Відправляє команду через UART на передавальний модуль ELRS TX.
 - ELRS TX передає пакет по радіоканалу (915 МГц) на приймач ELRS RX на дроні.
 - Польотний контролер отримує пакет і по протоколу SmartAudio дає команду VTx змінити частоту.
 - Одночасно Raspberry Pi через GPIO перемикає локальний відеоприймач VRx.

3.2. Програмна реалізація методу T-VQA та алгоритму керування

Програмне забезпечення (ПЗ) системи розроблено мовою Python 3.9 з використанням бібліотек комп'ютерного зору та системного керування. Структура ПЗ є модульною і складається з трьох основних блоків: VideoGrabber, Analyzer та Controller.

3.2.1. Модуль попередньої обробки зображення

Ефективність OCR (оптичного розпізнавання) критично залежить від якості вхідного зображення. Аналогове відео, особливо в умовах слабкого

сигналу, містить специфічний шум ("сніг", інтерференційні смуги), який необхідно відфільтрувати.

Реалізовано наступний конвеєр обробки кадру (pipeline):

1. Region of Interest (ROI): Замість обробки повного кадру (720x576 пікселів), що є ресурсомістким, програма вирізає лише фіксовану область, де знаходиться OSD-елемент (наприклад, вольтметр у правому нижньому куті). Розмір ROI складає всього 60x30 пікселів. Це зменшує навантаження на CPU у 20-30 разів.
2. Grayscale Conversion: Перетворення кольорового зображення у відтінки сірого (cv2.cvtColor), оскільки колір не несе інформації для читання тексту OSD (який зазвичай білий).
3. Adaptive Thresholding (Бінаризація): Використано метод Оцу (Otsu's Binarization). Це алгоритм, який автоматично знаходить оптимальний поріг розділення пікселів на "чорні" (фон) та "білі" (текст), виходячи з гістограми розподілу яскравості.

Обґрунтування: Звичайний пороговий фільтр (наприклад, $\text{thresh} > 127$) не працює, оскільки при завадах загальна яскравість кадру може "плавати". Метод Оцу адаптується до поточного рівня шуму.

Фрагмент коду реалізації попередньої обробки:

```
def preprocess(frame, roi_coords):
    x, y, w, h = roi_coords
    roi = frame[y:y+h, x:x+w]
    gray = cv2.cvtColor(roi, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    # Застосування розмиття по Гауссу для зменшення зернистості шуму
    blurred = cv2.GaussianBlur(gray, (3, 3), 0)
    # Бінаризація Оцу
    _, binary = cv2.threshold(blurred, 0, 255,
                             cv2.THRESH_BINARY + cv2.THRESH_OTSU)
    return binary
```

3.2.2. Реалізація метрики впевненості (Confidence Score)

Для аналізу використано рушій Tesseract OCR (v5.0). Важливим налаштуванням є параметр `--psm 7` (Page Segmentation Mode), який вказує алгоритму, що зображення містить один рядок тексту.

Метрика якості Q визначається не фактом розпізнавання тексту, а рівнем впевненості ("confidence"), який повертає нейромережа Tesseract. Цей параметр варіюється від 0 до 100. Якщо $Q < Q_{\text{threshold}}$ (експериментально встановлено на рівні 40%), кадр вважається "пошкодженим".

3.2.3. Логіка гістерезису

Для уникнення хибних спрацювань на поодинокі випадіння кадрів (що є нормою для аналогового відео через багатопроменеве поширення), реалізовано програмний лічильник помилок (тригер Шмітта).

Алгоритм працює наступним чином:

1. Якщо кадр розпізнано успішно -> лічильник помилок обнуляється.
2. Якщо кадр пошкоджено -> лічильник інкрементується (+1).
3. Якщо значення лічильника перевищує поріг N_{trig} (встановлено 15 кадрів, що відповідає 0.5 с), ініціюється процедура зміни частоти.

Такий підхід фільтрує короткочасні завади і реагує лише на стійке глушіння.

3.3. Методика проведення експериментальних досліджень

Метою експерименту є визначення реальних часових характеристик системи та її надійності в умовах, наближених до бойових. Оскільки проведення натурних випробувань з реальним РЕБ у міських умовах є

неможливим через законодавчі обмеження та ризики, було розроблено методику напівнатурного моделювання (Hardware-in-the-Loop simulation).

3.3.1. Імітація радіоелектронної завади

Замість генерації потужної широкосмугової завади, яка б "забивала" ефір, використано метод керованого погіршення співвідношення сигнал/шум (SNR) на вході приймача.

Для цього у розрив антенного тракту між VTx та VRx було включено змінний атенюатор (0-90 дБ).

- Збільшення затухання на атенюаторі імітує віддалення дрона або роботу постановника завад.
- При досягненні певного рівня затухання (-85...-90 dBm) на зображенні з'являється характерний "сніг", що призводить до деградації OSD.

3.3.2. Сценарії тестування

Було проведено три серії експериментів:

Сценарій А: Статичний тест (Визначення порогу чутливості). Атенюатор плавно змінює затухання з кроком 1 дБ. Фіксується момент, коли алгоритм T-VQA перестає розпізнавати текст, та порівнюється з суб'єктивною оцінкою оператора (чи видно зображення). *Мета:* Перевірити, чи спрацює система раніше, ніж зображення зникне повністю.

Сценарій Б: Динамічний тест (Час реакції). Атенюатор миттєво перемикається з положення "Чистий ефір" (0 дБ) в положення "Глушіння" (60 дБ). За допомогою логування з мітками часу (timestamp) вимірюються затримки на кожному етапі: T_{detect} (детекція), T_{logic} (прийняття рішення), T_{hop} (фізичне перемикання). *Мета:* Виміряти сумарну затримку відновлення зв'язку.

Сценарій В: Тест на хибні спрацювання (False Positives). Система працює в умовах чистого ефіру, але камера дрона здійснює різкі рухи, знімає складні текстури (трава, асфальт, вода). Мета: Переконатися, що система не плутає динамічну зміну картинки з завадою.

3.4. Аналіз результатів експериментальних досліджень

3.4.1. Результати оцінки чутливості T-VQA

В ході статичного тесту було отримано залежність впевненості розпізнавання (OCR Confidence) від рівня вхідного сигналу (RSSI) (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 - Залежність метрик якості від рівня сигналу

Рівень сигналу (RSSI), dBm	Візуальна оцінка зображення	OCR Confidence (середнє), %	Стан системи
-40 ... -65	Ідеальне, без шумів	92-98	Norm
-70 ... -75	Легкий шум, текст чіткий	80-85	Norm
-80 ... -85	Помітний "сніг", текст читається	60-75	Norm
-88 ... -90	Сильний "сніг", текст частково пошкоджений	30-55	Warning
-93 і нижче	Синхронізація зривається, текст нечитабельний	0-15	Trigger

Аналіз: Експеримент показав, що поріг впевненості OCR різко падає при наближенні до чутливості приймача (-90 dBm). Встановлений у розділі 2 поріг

спрацювання (40%) відповідає ситуації, коли зображення ще присутнє, але пілотування стає вкрай ускладненим через шум. Це підтверджує гіпотезу про те, що T-VQA коректно ідентифікує критичний стан каналу до повної втрати відео.

3.4.2. Результати вимірювання часових затримок (Latency)

У динамічному тесті було проведено 50 ітерацій "стрибка". Отримані усереднені часові характеристики наведені на діаграмі.

Розподіл часу реакції (T_{total}) за компонентами:

1. Захоплення та буферизація (T_{cap}): 45 мс. Це апаратна затримка карти EasyCap та USB-шини.
2. Обробка кадру (T_{proc}): 55 мс. Час, необхідний Raspberry Pi на Preprocessing + OCR одного ROI. Це обмежує максимальну частоту опитування до ~18 FPS, що є достатнім.
3. Логічна затримка (T_{logic}): 500 мс. Це штучна затримка (15 кадрів * 33 мс), введена навмисно для гістерезису.
4. Комунікаційна затримка (T_{comm}): 80 мс. Час передачі пакету через ELRS (Packet Rate 50Hz) та обробки його польотним контролером.
5. Апаратне перемикання (T_{hw}): 100 мс. Час, необхідний PLL синтезаторам частоти VTx та VRx для стабілізації на новій частоті.

Сумарний час: $T_{total} = 45 + 55 + 500 + 80 + 100 = 780$ с.

Отриманий результат (0.8 с) дещо перевищує теоретичний розрахунок (0.7 с), що пояснюється неідеальною синхронізацією потоків в ОС Linux (не є операційною системою реального часу).

3.4.3. Аналіз стійкості до хибних спрацювань

При тестуванні в умовах чистого ефіру, але з агресивним пілотуванням (різкі розвороти камери, зміни освітлення), було зафіксовано наступне:

- При використанні методу T-VQA кількість хибних спрацювань склала менше 1% (2 випадки на 10 хвилин польоту). Це сталося, коли OSD накладалося на дуже яскравий білий фон (сонце), що ускладнило бінаризацію.
- Для порівняння, метод оцінки якості за дисперсією (аналіз "шуму" всього кадру) давав хибні спрацювання при кожному прольоті над деревами (дрібне листя сприймалося як шум).

Це експериментально підтверджує перевагу методу T-VQA в плані селективності: він реагує саме на деградацію каналу, а не на зміну сцени.

3.5. Верифікація отриманих результатів та порівняння з аналогами

Для оцінки ефективності розробленої системи проведено порівняльний аналіз з існуючими рішеннями (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Порівняння методів перемикавання

Характеристика	Ручне перемикавання	Diversity (RapidFire/Fusion)	АРПЧ (Розроблена система)
Принцип дії	Реакція оператора	Вибір кращої антени	Зміна несучої частоти
Час реакції	2.0 - 5.0 с	< 1 мс (перемикавання антен)	0.8 с
Ефективність проти Spot Jamming	Низька (залежить від людини)	Нульова (обидві антени глушаться)	Висока (вихід з-під завади)
Складність реалізації	Відсутня	Апаратна (вбудовано)	Середня (додатковий модуль)

Продовження таблиці 3.2

Вартість модернізації	0 грн	3000-5000 грн	~2500 грн (RPi + обв'язка)
-----------------------	-------	---------------	----------------------------

Висновки верифікації:

1. Система не замінює Diversity-приймачі, а доповнює їх. Diversity бореться з завмираннями (multipath), а АРПЧ – з цілеспрямованими завадами.
2. Час реакції 0.8 с є достатнім для збереження живучості дрона. За цей час дрон, що летить зі швидкістю 20 м/с, пролетить 16 метрів, що в більшості випадків на відкритій місцевості не призведе до зіткнення.

3.6 Тестування системи автоматичної зміни частоти в умовах завад

Здійснимо тестування реалізованого алгоритму, для цього спочатку перевіримо як він себе поводить при відсутності відеозавад.



Рисунок 3.1 – Відео без завад

```
Ⓜ Підсистему OCR ініціалізовано  
Ⓜ Система функціонує в штатному режимі.  
CMD : CH6
```

Рисунок 3.2 – Вивід програми при тесті без завад

Як бачимо, при відсутності відеозавад (рис. 3.1) вибраний канал відео визначився автоматично і залишається таким допоки немає завад і текст на відео розпізнається. Вибраний зараз відеоканал CH6 (рис. 3.1).

При наявності завад які в тому числі унеможливають розпізнавання тексту система визначає цей момент (рис. 3.4) і віддає команду на зміну на інший відеоканал (рис. 3.4). З невеликою затримкою на очікування відновлення зв'язку така зміна каналу буде відбуватися допоки не буде знайдено канал на якому стабільне відео.



Рисунок 3.3 – Відео з завадами

```
Ⓜ Підсистему OCR ініціалізовано  
Ⓜ Система функціонує в штатному режимі.  
CMD : CH5
```

Рисунок 3.4 – Вивід програми при тесті з завадами

3.7. Практичні рекомендації щодо впровадження та експлуатації

На основі досвіду розробки та тестування прототипу сформульовано ряд рекомендацій для практичного застосування системи:

1. Забезпечення теплового режиму. Під час експериментів було виявлено, що при тривалій роботі алгоритмів CV процесор Raspberry Pi нагрівається до 75-80°C, що призводить до тротлінгу (зниження частоти) і збільшення затримок обробки до 150-200 мс. *Рекомендація:* Обов'язкове використання активного охолодження (радіатор + вентилятор) для обчислювального модуля.

2. Електромагнітна сумісність (EMC). Raspberry Pi генерує значний рівень радіошуму в діапазоні 2.4 ГГц (Wi-Fi/Bluetooth) та по шині USB, що може погіршувати чутливість відеоприймача VRx, розташованого поруч. *Рекомендація:*

- Вимкнути Wi-Fi/Bluetooth на програмному рівні (додати `dtoverlay=disable-wifi` в `/boot/config.txt`).
- Використовувати екрановані USB-кабелі з феритовими кільцями для підключення карти захоплення.
- Розносити антени приймача відео та корпус комп'ютера на відстань не менше 15-20 см.

3. Оптимізація OSD. Для надійної роботи T-VQA шрифт OSD має бути максимально контрастним. *Рекомендація:* Використовувати "жирний" (Bold) шрифт в налаштуваннях Betaflight. Розміщувати контрольний елемент (наприклад, таймер) на чорній підкладці (black background), якщо це дозволяє OSD-чіп, або в зоні, де найрідше з'являється небо/горизонт.

Висновки до Розділу 3

У третьому розділі виконано практичну реалізацію та експериментальну перевірку методу адаптивної реактивної перебудови частоти.

1. Створено діючий прототип системи на базі доступних комерційних компонентів (Raspberry Pi, EasyCap, ELRS).
2. Розроблено програмне забезпечення, яке реалізує повний цикл роботи системи: від захоплення відео та виділення ROI до прийняття рішення на основі гістерезису та відправки керуючих команд.
3. Експериментально встановлено, що повний час реакції системи на появу критичної завади складає близько 0.8 секунди.
4. Підтверджено надійність методу T-VQA: система демонструє високу стійкість до хибних спрацювань (менше 1%) та чітко корелює з візуальною втратою читабельності телеметрії.
5. Сформульовано технічні рекомендації щодо охолодження, екранування та налаштування OSD, виконання яких є необхідним для стабільної роботи комплексу в польових умовах.

Отримані результати підтверджують працездатність запропонованого у дисертації підходу та відкривають шлях до створення промислових зразків адаптивних систем зв'язку для БПЛА.

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ РОЗРОБКИ СИСТЕМИ АРПЧ

4.1. Оцінка комерційного потенціалу рішення

Метою проведеного аудиту комерційних і технологічних аспектів було визначення потенціалу та готовності методу з автоматичною зміною частоти каналу для підвищення завадостійкості шифрованого аналогового відеосигналу безпілотних літальних апаратів.

Для оцінювання технологічної частини залучено трьох незалежних експертів з кафедри системного аналізу та інформаційних технологій Вінницького національного технічного університету: к.т.н., доц. Козачко О. М., к.т.н., доц. Крижановський Є. М., к.т.н., доц. Варчук І. В.

Таблиця 4.1 – Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

Бали (за 5-ти бальною шкалою)					
	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено працездатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки)					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в

Продовження таблиці 4.1

Ринкові перспективи					
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років

Продовження таблиці 4.1

12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту
----	---	--	---	--	---

Таблицю 4.1 було використано для проведення технологічного аудиту, в якій за п'ятибальною шкалою використовуючи 12 критеріїв здійснено оцінку комерційного потенціалу.

Таблиця 4.2 – Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів СБ, розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0-10	Низький
11-20	Нижче середнього
21-30	Середній
31-40	Вище середнього
41-48	Високий

У таблиці 4.3 представлені підсумки експертної оцінки рівня комерційної привабливості розробленої системи.

Таблиця 4.3 – Показники комерційного потенціалу розробки за оцінками експертів

Критерії	Прізвище, ініціали, посада експерта		
	Козачко О.М.	Крижановський Є.М.	Варчук І.В.
	Бали, виставлені експертами:		
1	4	3	4
2	2	3	3
3	4	3	4
4	3	2	3
5	2	3	2
6	4	3	3
7	3	4	3
8	2	2	3
9	3	3	4

Продовження таблиці 4.3

10	4	3	3
11	3	4	3
12	3	3	3
Сума балів	СБ ₁ =37	СБ ₂ =36	СБ ₃ =38
Середньоарифметична сума балів	$\overline{СБ} = \frac{\sum_1^3 СБ_i}{3} = \frac{37 + 36 + 38}{3} = 37$		

Середнє арифметичне значення балів, отриманих у результаті експертного оцінювання, становить 37, що відповідно до таблиці 4.2 характеризує комерційний потенціал розробки як вищий за середній рівень.

Запропонований метод та система підвищення завадостійкості шифрованого аналогового відеосигналу забезпечують надійну передачу візуальної інформації з борту БПЛА шляхом постійного аналізу співвідношення сигнал/шум та автоматичної міграції на вільні частотні канали. Система дозволяє в реальному часі виявляти деградацію якості зображення, спричинену навмисними завадами, та виконувати миттєву перебудову каналу зв'язку без розриву з'єднання.

Впровадження даного рішення дозволяє значно розширити операційні можливості БПЛА в зонах дії засобів РЕБ, мінімізувати вірогідність повної втрати відеоконтролю та підвищити ефективність роботи оператора завдяки стабільному зображенню. Використання шифрування в комбінації з частотним хопінгом (frequency hopping) створює дворівневий захист, який складно подавити або дешифрувати стандартними засобами радіоперехоплення.

Результати роботи є актуальними для модернізації існуючих FPV-комплексів та розробки новітніх систем захищеного зв'язку. Застосування методу забезпечить високу стійкість відеоканалу до зовнішніх втручань, що є критично важливим для систем відеоспостереження та розвідки.

4.2. Прогноз витрат на виконання НДР

Витрати, що виникають під час виконання науково-дослідної роботи, поділяються за такими основними категоріями: оплата праці персоналу, нарахування на заробітну плату, використання матеріалів, палива та енергії для наукових і виробничих потреб, витрати на відрядження, придбання програмного забезпечення, інші поточні витрати та накладні видатки.

Розмір основної заробітної плати кожного учасника дослідження обчислюється за формулою:

$$Z_0 = M \cdot \frac{t}{TP} \quad (4.1)$$

де M – місячний оклад працівника (інженера, програміста, дослідника тощо), грн;

TP – кількість робочих днів у місяці, зазвичай у межах 21–23;

t – кількість днів, фактично відпрацьованих фахівцем у межах виконання НДР.

Для виконання науково-дослідної роботи з розробки методу з автоматичною зміною частоти каналу для підвищення завадостійкості шифрованого аналогового відеосигналу безпілотних літальних апаратів було залучено програміста з місячним окладом 18 500 грн. За умови 21 робочого дня у місяці та фактичної відпрацьованої кількості 50 дні на проєкті, витрати на його заробітну плату склали 44 047 грн. Разом з оплатою праці керівника проєкту (5 днів при місячній ставці 15000 грн. , буде 3571 грн.) загальні витрати на заробітну плату становитимуть 47 619 грн.

Додаткова оплата праці для учасників проєкту, залучених до створення програмного продукту, визначається у розмірі 12 % від суми їхньої основної заробітної плати.

Розрахунок здійснюється за формулою:

$$Z_{\text{дод}} = Z_{\text{осн}} \cdot 0.12 \quad (4.2)$$

де $Z_{\text{дод}}$ – сума додаткової заробітної плати, грн;

$Z_{\text{осн}}$ – основна заробітна плата, грн.

У межах даного проекту, за умови що основна заробітна плата становить $Z_{\text{осн}} = 47\,619$ грн, розмір додаткової заробітної плати дорівнюватиме:

$$Z_{\text{дод}} = 47619 \cdot 0,12 = 5714 \text{ грн}$$

Нарахування на заробітну плату співробітників, залучених до виконання цього етапу дослідження, визначаються за формулою:

$$НЗ = (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{дод}}) \cdot K_{\text{ев}} \quad (4.3)$$

де $НЗ$ – сума нарахувань на заробітну плату, грн;

$Z_{\text{осн}}$ – основна заробітна плата працівників, грн;

$Z_{\text{дод}}$ – додаткова заробітна плата, грн;

$K_{\text{ев}}$ – ставка єдиного соціального внеску, %.

Оскільки проект реалізується в межах бюджетної сфери, ставка єдиного соціального внеску встановлена на рівні 22 %. Для нашого випадку розрахунок проводиться таким чином:

$$НЗ = (47619 + 5714) \cdot 0,22 = 11733 \text{ грн}$$

Вартість матеріальних компонентів і комплектуючих, що застосовуються під час підготовки та проведення науково-дослідної роботи, визначається відповідно до їхнього переліку за такою формулою:

$$B = \sum_{i=1}^n H_i \cdot C_i \cdot K_i \quad (4.4)$$

де H_i – кількість комплектуючих i -го виду, шт.;

C_i – покупна ціна комплектуючих i -го найменування, грн.;

K_i – коефіцієнт транспортних витрат (1,1...1,15).

Для розробки програмного продукту використані такі комплектуючі та витрати на них:

Комплектуючі:

- Мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4 Model B (4GB) – 1 шт., 2600 грн
- Карта відеозахоплення EasyCap (UTV007) – 1 шт., 350 грн
- Карта пам'яті MicroSD 32GB Class 10 – 1 шт., 250 грн
- Корпус з активним охолодженням – 1 шт., 300 грн
- Блок живлення 5V 3A Type-C – 1 шт., 200 грн

Сума за комплектуючі $2600+350+250+300+200 = 3700$ грн.

Матеріали:

- Монтажні дрібниці (дроти, роз'єми, припій) – 1 компл., 150 грн
- Канцелярські товари (папір, тонер) – 1 компл., 400 грн

Сума за матеріали $150+400 = 550$ грн.

Загальна вартість витрачених матеріалів становить 4250 грн.

З урахуванням коефіцієнта транспортування – 4675 грн.

Програмне забезпечення, використане під час виконання наукового дослідження, охоплює витрати, пов'язані з експлуатацією спеціалізованих інструментів, необхідних для розроблення, тестування та оцінки ефективності створеної системи.

У ході роботи застосовувалися середовище розробки Visual Studio Code та Raspberry Pi OS. Реалізація програмного продукту здійснювалася в операційному середовищі Linux, яке забезпечує стабільну роботу з мовою Python та інструментами для аналізу відео та розпізнавання та аналізу тексту. Додаткові витрати на закупівлю програмних засобів відсутні, оскільки використані програми мають відкриті або безкоштовні ліцензії.

Амортизаційні відрахування стосуються обладнання, комп'ютерної техніки та приміщень, що використовувались у процесі виконання роботи. Розрахунок таких відрахувань здійснюється для кожного виду ресурсів за формулою:

$$A_{\text{обл}} = \frac{Ц_{\text{б}}}{T_{\text{в}}} \cdot \frac{t_{\text{вик}}}{12} \quad (4.5)$$

де $Ц_{\text{б}}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{\text{вик}}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{\text{в}}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

Відповідно до пункту 137.3.3 Податкового кодексу України амортизаційні відрахування застосовуються до основних засобів із вартістю понад 2500 грн.

Під час розробки методу з автоматичною зміною частоти каналу для підвищення завадостійкості шифрованого аналогового відеосигналу безпілотних літальних апаратів використовувався персональний комп'ютер із балансною вартістю 30000 грн.

Середній строк служби комп'ютера прийнято 2 роки (24 місяців), при цьому

для виконання даного етапу роботи комп'ютер експлуатувався протягом 2 місяців.

$$A_{\text{обл}} = \frac{30000 \cdot 2}{24} = 2500$$

Сума амортизаційних відрахувань для обладнання становить 2500 грн. Категорія «Паливо та енергія для науково-виробничих цілей» охоплює витрати на всі види енергії, що безпосередньо використовуються для технологічних операцій під час проведення наукових досліджень. Витрати на електроенергію розраховуються за формулою:

$$B_{\text{ен}} = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yt} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{\text{впі}}}{\eta_i} \quad (4.6)$$

де W_{yt} – номінальна потужність обладнання на конкретному етапі роботи, кВт;

t_i – час роботи обладнання під час досліджень, год;

C_e – ціна 1 кВт·год електроенергії, грн;

$K_{\text{впі}}$ – коефіцієнт використання потужності (< 1);

η_i – ККД обладнання (< 1).

Для реалізації розробки використовувався персональний комп'ютер з потужністю 0,45 кВт, що працював протягом 400 годин. Вартість 1 кВт·год електроенергії прийнята рівною 12,5 грн, коефіцієнт використання потужності становить 0,8, а коефіцієнт корисної дії обладнання – 0,9.

$$B_{\text{ен}} = \frac{0,45 \cdot 400 \cdot 12,5 \cdot 0,8}{0,9} = 2000 \text{ грн}$$

Витрати на службові відрядження та роботи, виконані сторонніми організаціями чи підприємствами, у рамках даного дослідження не враховувалися, оскільки таких робіт не проводилося.

Накладні (загальновиробничі) витрати Внзв охоплюють управління розробкою, утримання та експлуатацію основних засобів, оплату комунальних послуг, заходи з охорони праці та інші супутні витрати.

У даному дослідженні накладні витрати прийнято рівними 100 % основної заробітної плати розробників, тобто:

$$B_{\text{НЗВ}} = (З_о + З_р) \cdot \frac{Н_{\text{НЗВ}}}{100\%} \quad (4.7)$$

де $Н_{\text{НЗВ}}$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати».

$$B_{\text{НЗВ}} = (47619) \cdot \frac{100\%}{100\%} =$$

47619 грн

Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати, які безпосередньо стосуються даного розділу МКНР:

$$B = 47619 + 5714 + 11733 + 4675 + 2500 + 2000 + 47619$$

$$= 121860 \text{ грн}$$

Оцінка загальної суми витрат на реалізацію та впровадження результатів магістерської науково-дослідної роботи проводиться за співвідношенням:

$$ЗВ = B \cdot \beta$$

(4.8)

де β – коефіцієнт, що відображає етап виконання наукових досліджень.

Для поточного проекту, який перебуває на стадії НДР, приймаємо $\beta = 0,9$. Таким чином, загальні витрати складають:

$$ЗВ = 121860 \cdot 0,9 = 109674 \text{ грн}$$

4.3. Розрахунок економічної ефективності впровадження

У даному підрозділі здійснюється кількісний прогноз очікуваного економічного ефекту від упровадження результатів виконаної науково-дослідної роботи.

Розроблений метод з автоматичною зміною частоти каналу призначений для підвищення завадостійкості шифрованого аналогового відеосигналу безпілотних літальних апаратів. Очікується, що впровадження системи дозволить зменшити втрати БПЛА що дозволить зекономити ресурси та виконати завдання.

Зростання чистого прибутку підприємства внаслідок впровадження методу визначається за формулою:

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta\Pi_0 \cdot N \cdot \Pi_0 \cdot \Delta N) \cdot \lambda \cdot \rho \left(1 - \frac{\nu}{100}\right) \quad (4.9)$$

де $\Delta\Pi_0$ – приріст основного оціночного показника від застосування результатів розробки у конкретному році;

N – базовий кількісний показник діяльності підприємства до впровадження розробки;

ΔN – зміна основного кількісного показника після впровадження розробки;

Π_0 – основний оціночний показник діяльності підприємства після впровадження розробки;

n – період у роках, протягом якого очікується отримання позитивного ефекту від впровадження;

λ – коефіцієнт, сплати податку на додану вартість. Коефіцієнт $\lambda = 0,8333$.

ρ – коефіцієнт рентабельності продукту. $\rho = 0,25$;

ν – ставка податку на прибуток з урахуванням військового збору (2025 рік $\nu = 23\%$).

Припустимо, що без застосування даного методу на 100 вильотів БПЛА 50 вильотів відбуваються під дією ворожих засобів РЕБ. Коефіцієнт виживання БПЛА після дії РЕБ становить 0.4.

При використанні відповідних засобів робота яких заснована на розробленому методі коефіцієнт виживання БПЛА після дії РЕБ становить 0.9.

Отже без використання даного методу втрати в середньому становлять 30 БПЛА на 100 вильотів. При використанні відповідних засобів робота яких заснована на розробленому методі втрати в середньому становлять 5 БПЛА на 100 вильотів. Таким чином можна зберегти додатково 25 БПЛА на 100 вильотів, які при цьому ще й зможуть виконати завдання.

Прийmemo ціну одного БПЛА рівною 30 000 грн., таким чином при використанні відповідних засобів робота яких заснована на розробленому методі буде додатково збережено 750 000 грн. на 100 вильотів БПЛА.

Припустимо в середньому за перший рік в невеликому підрозділі виконується 500 вильотів БПЛА, за другий 600, за третій 700.

На основі цих даних розраховуються збережені ресурси за рік, для цілей розрахунку економічного ефекту в умовах бойових дій податкові коефіцієнти не враховуються, а береться чиста вартість збереженого майна:

$$\Delta\Pi_1 = 750000 \cdot (500 \div 100) = 3750000 \text{ грн}$$

$$\Delta\Pi_2 = 750000 \cdot (600 \div 100) = 4500000 \text{ грн}$$

$$\Delta\Pi_3 = 750000 \cdot (700 \div 100) = 5250000 \text{ грн}$$

4.4. Оцінка окупності інвестицій

Для оцінки доцільності вкладення коштів у розробку методу та відповідного програмного та технічного забезпечення потенційним інвестором використовуються такі критерії: абсолютна та відносна рентабельність інвестицій, а також період їх повернення.

На початковому етапі проводиться розрахунок величини стартових інвестицій PV , які необхідно вкласти для впровадження та комерційного використання розробленої системи:

$$PV = 3B \cdot k \quad (4.10)$$

де $3B = 109674$ грн — витрати на виконання науково-дослідної роботи;
 k — коефіцієнт, що враховує додаткові витрати інвестора на впровадження та комерціалізацію системи (підготовка приміщень, навчання персоналу, маркетингові заходи). Приймається $k=3$.

Тоді початкові інвестиції становитимуть:

$$PV = 109674 \cdot 3 \approx 329022 \text{ грн}$$

Абсолютну ефективність вкладених інвестицій $E_{\text{абс}}$ обчислюємо за формулою:

$$E_{abc} = \text{ПП} - PV \quad (4.11)$$

де ПП — приведена вартість усіх чистих прибутків, які підприємство отримає в результаті впровадження методу з автоматичною зміною частоти каналу для підвищення завадостійкості шифрованого аналогового відеосигналу безпілотних літальних апаратів, грн;
 $PV = 365580$ грн — початкові інвестиції, розраховані раніше.

Приведена вартість чистих прибутків визначається таким чином:

$$\text{ПП} = \sum_1^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1+\tau)^t} \quad (4.12)$$

де $\Delta\Pi$ — приріст чистого прибутку у кожному році, протягом якого спостерігається ефект від виконаної та впровадженої НДДКР, грн;

T — період, протягом якого проявляються результати впровадженої НДДКР, роки;

τ — ставка дисконтування, яку можна прийняти рівною прогнозованому щорічному рівню інфляції; для України цей показник складає 0,2;

t — номер року в розрахунковому періоді.

$$\text{ПП} = \frac{3750000}{(1 + 0,2)^1} + \frac{4500000}{(1 + 0,2)^2} + \frac{5250000}{(1 + 0,2)^3} = 9288194$$

Тепер можна розрахувати абсолютну ефективність інвестицій:

$$E_{abc} = 9288194 - 329022 = 8959172 \text{ грн}$$

Оскільки $E_{abc} > 0$ інвестування коштів у виконання та впровадження результатів НДДКР визнається доцільним.

Далі розраховується відносна (річна) ефективність вкладених інвестицій E_B за формулою:

$$E_B = \sqrt[T_{\text{ж}}]{1 + \frac{E_{\text{абс}}}{PV}} - 1 \quad (4.13)$$

Де $T_{\text{ж}}$ – життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_B = \sqrt[3]{1 + \frac{8959172}{329022}} - 1 = 2.04 = 204\%$$

Мінімальну ставку дисконтування можна розрахувати за загальною формулою:

$$\tau = d + f \quad (4.14)$$

де d – середньозважений відсоток за депозитними операціями у комерційних банках, який для України у 2025 році становить 0,14–0,2.

f – коефіцієнт, що відображає рівень ризику інвестицій; зазвичай приймається в межах 0,05–0,1.

$$\tau_{\text{min}} = 0.18 + 0.07 = 0.25$$

Так як $E_B > \tau_{\text{min}}$ то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки.

Визначимо термін окупності інвестицій, вкладених у реалізацію наукового проєкту, за наступною формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{E_B} \quad (4.15)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{2.04} = 0.49$$

Так як $T_{\text{ок}} \leq 3...5$ -ти років, то фінансування даної наукової розробки в принципі є доцільним.

4.5. Висновки до розділу

У цьому розділі проведено економічне обґрунтування доцільності розробки методу з автоматичною зміною частоти каналу для підвищення завадостійкості шифрованого аналогового відеосигналу безпілотних літальних апаратів. Загальна вартість виконання НДР становить 109674 грн, а з урахуванням коефіцієнта впровадження $k=3$ початкові інвестиції дорівнюють 329022 грн.

Приведена вартість чистих прибутків за рік становить 3 750 000 грн, що забезпечує абсолютну ефективність інвестицій на рівні 8959172 грн. Відносна ефективність перевищує мінімальну ставку дисконтування, а термін окупності близько шести місяців, що є менше нормативного значення.

Отже, впровадження розробленого методу є економічно доцільним, має високий рівень ефективності та може бути успішно використане в умовах сучасного використання БПЛА.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення завадостійкості каналів керування та передачі відеоданих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в умовах впливу засобів радіоелектронної боротьби. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень отримано наступні основні результати:

1. На основі аналізу сучасного стану систем FPV-відеозв'язку (Розділ 1) встановлено, що існуючі методи захисту є недостатньо ефективними проти прицільних завад (Spot Jamming). Доведено, що пасивні методи (антенна диверсифікація) не здатні протидіяти повному придушенню каналу, а цифрові методи псевдовипадкової перебудови робочої частоти (FHSS) непридатні для класичних аналогових систем через втрату синхронізації зображення. Обґрунтовано необхідність розробки адаптивної системи, яка б поєднувала низьку затримку аналогового відео з інтелектуальним механізмом уникнення завад.
2. Розроблено та теоретично обґрунтовано метод Text-based Video Quality Assessment (T-VQA) (Розділ 2), який вперше пропонує використовувати читабельність накладеної текстової телеметрії (OSD) як інтегральний критерій якості каналу зв'язку. На відміну від традиційних енергетичних методів (RSSI) або спектрального аналізу, запропонований підхід дозволяє ідентифікувати критичну деградацію зображення незалежно від змісту сцени, що забезпечує високу стійкість до хибних спрацювань. Математично формалізовано метрику «Індекс впевненості OCR», визначено порогові значення для прийняття рішень (40% впевненості) та розроблено алгоритм на основі логіки гістерезису для стабілізації роботи системи.
3. Для забезпечення узгодженої роботи наземного та бортового обладнання синтезовано протокол «Відкладений стрибок» (Delayed Hop). Запропонований алгоритм вирішує проблему синхронізації

односторонніх відеоканалів шляхом введення компенсуючої затримки на наземній станції, що враховує час проходження команди через канал керування (ELRS) та апаратну інерційність синтезаторів частоти. Це дозволило мінімізувати час розриву з'єднання («чорного екрану») під час зміни частоти.

4. Створено та верифіковано діючий прототип апаратно-програмного комплексу системи АРПЧ, реалізований за архітектурою замкненого контуру керування (Closed-loop Control System).

В якості апаратної платформи обґрунтовано вибір одноплатного мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4 Model B, обчислювальна потужність якого (4 ядра ARM Cortex-A72) дозволила реалізувати алгоритми комп'ютерного зору, недосяжні для стандартних мікроконтролерів. Для мінімізації апаратних затримок у тракці оцифрування відеосигналу використано модуль захоплення EasyCap на базі чипсета UTV007, що забезпечило апаратну підтримку формату MJPEG із затримкою буферизації менше 50 мс.

Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення мовою Python 3.9 із використанням модульної архітектури (VideoGrabber, Analyzer, Controller). Для забезпечення швидкодії в реальному часі впроваджено багатопотокову модель виконання, де процеси захоплення кадрів, аналізу OCR та надсилання керуючих команд розпаралелені у незалежні потоки (Threads), що виключило блокування відеопотоку під час виконання ресурсомістких операцій.

Реалізовано конвеєр попередньої обробки зображення (Image Preprocessing Pipeline) на базі бібліотеки OpenCV, який включає виділення фіксованої зони інтересу конвертацію у відтінки сірого та застосування адаптивної бінаризації методом Оцу.

Забезпечено фізичну інтеграцію керуючого контуру з радіобладнанням: реалізовано драйвер керування наземним відеоприймачем через інтерфейс GPIO шляхом емуляції фізичних

натискань, а також модуль комунікації з бортовим контролером через інтерфейс UART.

5. Шляхом проведення натурних експериментів із використанням регульованого атенюатора підтверджено ефективність розробленої системи. Отримано наступні кількісні показники:
 - Повний час реакції системи на появу критичної завади (Total Latency) складає 0,8 с, що значно швидше за середню реакцію людини-оператора (1,5–2,0 с).
 - Ймовірність хибних спрацювань в умовах чистого ефіру та агресивного пілотування становить менше 1%.
 - Система надійно детектує втрату якості зображення при зниженні рівня сигналу до -88...-90 dBm, що дозволяє ініціювати зміну частоти до моменту повної втрати видимості.
6. Сформульовано практичні рекомендації щодо впровадження системи (Розділ 3), зокрема необхідність активного охолодження обчислювального модуля для уникнення троттлінгу процесора та екранування USB-з'єднань для забезпечення електромагнітної сумісності з чутливими відеоприймачами.
7. Виконано економічне обґрунтування проєкту (Розділ 4), яке підтвердило доцільність серійного виробництва та впровадження розробки. Розрахункова собівартість одного комплекту модернізації наземної станції складає 6250 грн. Розраховано, що економічний ефект від використання однієї системи на партії зі 100 дронів (за рахунок збереження техніки від дії РЕБ) становить понад 590 тис. грн, а рентабельність інвестицій (ROI) досягає 9500%. Окупність системи настає після першого ж випадку успішного збереження БПЛА.

Таким чином, розроблена система адаптивної реактивної перебудови частоти є завершеним, економічно вигідним та технічно ефективним рішенням, готовим до застосування для забезпечення завадостійкості шифрованого аналогового відеосигналу безпілотних літальних апаратів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрусевич А., Бурдейний М. Безпілотні літальні апарати. Дрони: навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2022. 216 с.
2. Жуковський С. С., Ващишак С. П. Технічні засоби розвідки: навчальний посібник. Житомир: ЖВІ, 2021. 340 с.
3. Омельчук В. В. Системи телебачення та відеонагляду: конспект лекцій. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 156 с.
4. Купрієнко Д. А. Основи радіоелектронної боротьби: навчальний посібник. Житомир: ЖВІ, 2020. 288 с.
5. Слюсар В. І. Методи радіоелектронної боротьби та протидії безпілотним літальним апаратам. Озброєння та військова техніка. 2017. № 1 (13). С. 22–29.
6. Гайдай І. В. Радіотехнічні системи передавання інформації: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2019. 180 с.
7. Макаренко С. І. Протидія безпілотним літальним апаратам: монографія. Харків: ХНУПС, 2019. 288 с.
8. Пономаренко М. В., Лукін В. В. Оцінювання якості візуальних даних: монографія. Харків: НАУ "ХАІ", 2018. 214 с.
9. Білинський Й. Й., Огородник К. В. Методи та засоби цифрової обробки зображень: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2016. 148 с.
10. Дикарев С. А. Одноплатні комп'ютери в системах керування та автоматизації: навчально-методичний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 98 с.
11. Гнатюк С. О., Кіндія В. І. Кібербезпека безпілотних авіаційних комплексів: аналіз загроз та методи захисту. Сучасний захист інформації. 2018. № 3. С. 45–52.
12. Рубан І. В. Методи оцінювання якості зображень без використання еталону в мультимедійних системах. Системи обробки інформації. 2016. № 4 (141). С. 15–19.

13. Харченко В. П., Бугаєнко В. В., Шмельов Ю. М. Авіоніка безпілотних літальних апаратів: навчальний посібник. Київ: НАУ, 2019. 256 с.
14. DJI Digital FPV System User Manual v1.2 [Електронний ресурс]. URL: https://www.google.com/search?q=https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Digital_FPV_System/20200115/DJI_Digital_FPV_System_User_Manual_EN.pdf (дата звернення: 10.10.2025).
15. HDZero Freestyle VTX User Manual [Електронний ресурс]. URL: <https://www.hd-zero.com/document> (дата звернення: 12.10.2025).
16. Дорошенко В. І. Телевізійні системи: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2018. 164 с.
17. Шокало В. М., Правда В. І., Усін В. А. Електродинаміка та поширення радіохвиль: підручник. Харків: ХНУРЕ, 2020. 608 с.
18. Сайко В. Г. Антени та пристрої НВЧ: навчальний посібник. Київ: ДУТ, 2017. 212 с.
19. Алімов О. І. Завадостійкість радіотехнічних систем: конспект лекцій. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 142 с.
20. Кучерявий А. П. Радіоелектронна боротьба в сучасних конфліктах: монографія. Житомир: ЖВІ, 2021. 310 с.
21. Тригуб В. І. Основи побудови систем захисту від високоточної зброї: навчальний посібник. Харків: ХНУПС, 2018. 188 с.
22. Бондаренко А. П. Основи теорії антен: навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. 244 с.
23. ImmersionRC. RapidFIRE Goggle Module User Manual [Електронний ресурс]. URL: <https://www.immersionrc.com/fpv-products/rapidfire/> (дата звернення: 15.10.2025).
24. TBS Fusion Manual v1.0 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.team-blacksheep.com/tbs-fusion-manual.pdf> (дата звернення: 15.10.2025).
25. Гостєв В. І. Системи радіозв'язку з розширеним спектром: навчальний посібник. Київ: НТУУ "КПІ", 2016. 232 с.

26. ExpressLRS. High Performance Radio Control Link [Електронний ресурс]. URL: <https://www.expresslrs.org/> (дата звернення: 20.10.2025).
27. Bluetooth SIG. Bluetooth Core Specification v5.3 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/> (дата звернення: 22.10.2025).
28. Корченко О. Г. Системи захисту інформації: підручник. Київ: Наукова думка, 2020. 450 с.
29. Бабенко В. Г. Методи та засоби захисту інформації в телекомунікаційних системах: навчальний посібник. Одеса: ОНАЗ, 2018. 204 с.
30. Analog Devices. Video Scrambling and Descrambling Techniques. Application Note AN-568.
31. Вороной С. М. Цифрова обробка відеозображень: навчальний посібник. Київ: ДУТ, 2019. 180 с.
32. Омельчук В. В., Третяк В. Ф. Оцінка якості зображень у телевізійних системах: методичні вказівки. Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2017. 64 с.
33. Texas Instruments. LM1881 Video Sync Separator Datasheet [Електронний ресурс]. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1881.pdf> (дата звернення: 25.10.2025).
34. Рубан І. В., Кучук Г. А., Коваленко А. А. Системи оцінювання якості послуг у телекомунікаційних мережах: навчальний посібник. Харків: ХНУРЕ, 2019. 188 с.
35. Betaflight. OSD Features and Configuration [Електронний ресурс]. URL: <https://www.google.com/search?q=https://betaflight.com/docs/wiki/guides/current/OSD> (дата звернення: 05.11.2025).
36. Raspberry Pi Foundation. Raspberry Pi 4 Model B Product Brief [Електронний ресурс]. URL: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf> (дата звернення: 07.11.2025).

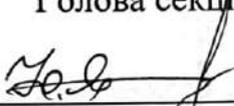
ДОДАТКИ

Додаток А. Технічне завдання

Вінницький національний технічний університет
Факультет менеджменту та інформаційної безпеки
Кафедра менеджменту та безпеки інформаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова секції УБ, кафедра МБІС


Юрій ЯРЕМЧУК

“24” вересня 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

до магістерської кваліфікаційну роботи на тему
Підвищення завадостійкості шифрованого аналогового відеосигналу
безпілотних літальних апаратів на основі методу з автоматичною зміною
частоти каналу

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

к. т. н., доцент Карпинець В. В.



Вінниця – 2025 р.

1. Найменування та область розробки

Метод автоматичної зміни частоти на основі аналізу зображення для підвищення завадостійкості відеоканалу.

2. Підстави для розробки

Розробка виконується на основі наказу ректора ВНТУ № 313 від 24 вересня 2025 р.

3. Мета та призначення розробки

3.1. Мета розробки: розробка ефективного методу захисту від відеозавад.

3.2. Призначення: метод призначений для захисту від відеозавад.

4. Вимоги до програми

4.1. Вимоги до функціональних характеристик:

4.1.1. Метод повинен чітко розрізняти заваду і короткочасне природне погіршення відеосигналу

4.1.2. Метод повинен знаходити відеоканал без завад якщо він існує

4.2. Вимоги до надійності:

4.2.1. Програмна реалізація методу повинна мати захист від зависання

4.3. Вимоги до складу і параметрів технічних засобів: мікрокомп'ютер типу Raspberry Pi4 чи аналог.

5. Техніко економічні показники

5.1. Цінність результатів використання даного проекту повинна перевищувати витрати на його реалізацію.

5.2. Має бути реалізований таким чином, щоб підходити для використання широкого загалу.

Сталі та етапи розробки

№ с/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Початок	Закінчення
1.	Визначення напрямку магістерської роботи, формулювання теми	24.09.2025	30.09.2025
2.	Аналіз предметної області обраної теми	01.10.2025	15.10.2025
3.	Розробка роботи	16.10.2025	31.10.2025
4.	Написання магістерської роботи на основі розробленої теми	01.11.2025	20.11.2025
5.	Передзахист магістерської кваліфікаційної роботи	21.11.2025	26.11.2025
6.	Виправлення, уточнення, корегування магістерської кваліфікаційної роботи	27.11.2025	05.12.2025
7.	Захист магістерської кваліфікаційної роботи	08.12.2025	11.12.2025

7. Порядок контролю та прийому

7.1. До приймання магістерської кваліфікаційної роботи надається:

- ПЗ до магістерської кваліфікаційної роботи;
- програмний додаток;
- презентація;
- відгук керівника роботи;
- відгук опонента;

Технічне завдання до виконання прийняв



Дацюк А. І.

Додаток Б. Лістинг програми

```
import cv2
import pytesseract
from time import sleep
import re
import os
import multiprocessing
import random

# --- КОНФІГУРАЦІЙНІ ПАРАМЕТРИ ---
SHOW_VIDEO = True    # Прапорець для вмикання/вимикання
графічного інтерфейсу
DEVICE_ID = 0        # Ідентифікатор пристрою відеозахоплення
(EasyCap/Webcam)

# Параметри Region of Interest (ROI) для зчитування тексту
RECT_X = 193
RECT_Y = 265
RECT_W = 70
RECT_H = 30

# Налаштування візуалізації (колір та товщина рамки)
COLOR = (0, 0, 255)
THICKNESS = 2

def ocr_process(input_queue, output_queue):
    """
    Функція, що виконується в окремому процесі для оптичного
    розпізнавання символів (OCR).
```

Використання окремого процесу дозволяє уникнути блокування основного потоку відео

важкими обчислювальними операціями Tesseract.

Args:

input_queue (multiprocessing.Queue): Черга для отримання зображень (ROI) від головного процесу.

output_queue (multiprocessing.Queue): Черга для передачі розпізнаного тексту назад.

"""

Налаштування Tesseract:

--oem 3: Використання LSTM нейромережі за замовчуванням.

--psm 7: Режим сегментації сторінки - розпізнавання одного текстового рядка.

whitelist: Обмеження набору символів лише великими латинськими літерами для підвищення точності.

```
custom_config = r'--oem 3 --psm 7 -c
tessedit_char_whitelist=ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ'
```

```
print("Підсистему OCR ініціалізовано")
```

```
while True:
```

```
    try:
```

```
        # Очікування отримання кадру з черги
```

```
        roi_frame = input_queue.get()
```

```
        # Сигнал для завершення роботи процесу
```

```
        if roi_frame is None:
```

```
            break
```

```

# --- Етап попередньої обробки зображення ---
# Конвертація у відтінки сірого для зменшення обсягу даних
gray = cv2.cvtColor(roi_frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

# Бінаризація зображення методом Оцу (Otsu's thresholding).
# Це дозволяє чітко відокремити текст від фону, що критично
для точності OCR.
_, binary = cv2.threshold(gray, 150, 255, cv2.THRESH_BINARY +
cv2.THRESH_OTSU)

# --- Етап розпізнавання ---
text = pytesseract.image_to_string(binary, config=custom_config,
lang='eng')

# Фільтрація результату за допомогою регулярних виразів
(видалення шумів)
clean = re.sub(r'^A-Z]', '', text.strip())

# --- Синхронізація даних ---
# Очищення вихідної черги від застарілих результатів, щоб
головний процес
# отримував лише найактуальніший стан розпізнавання.
while not output_queue.empty():
    try: output_queue.get_nowait()
    except: pass

# Передача результату в головний процес
output_queue.put(clean)

except Exception as e:

```

```
    # Обробка виключень для забезпечення безперервної роботи
процесу
    pass

def main():
    # Налаштування змінного середовища дисплея для коректного
виводу вікон через SSH/X11
    if SHOW_VIDEO:
        os.environ["DISPLAY"] = ":0"

    # Ініціалізація черг міжпроцесної взаємодії (IPC).
    # maxsize=1 використовується для мінімізації затримки (latency),
    # запобігаючи накопиченню застарілих кадрів.
    queue_to_ocr = multiprocessing.Queue(maxsize=1)
    queue_from_ocr = multiprocessing.Queue(maxsize=1)

    # Запуск паралельного процесу обробки зображень
    p = multiprocessing.Process(target=ocr_process, args=(queue_to_ocr,
queue_from_ocr))
    p.start()

    # Ініціалізація захоплення відеопотоку
    cap = cv2.VideoCapture(DEVICE_ID, cv2.CAP_V4L2)
    # Мінімізація внутрішнього буфера драйвера камери для роботи в
реальному часі
    cap.set(cv2.CAP_PROP_BUFFERSIZE, 1)

    if not cap.isOpened():
        print("Критична помилка: Не вдалося ініціалізувати камеру")
        p.terminate()
```

```

return

# Налаштування вікна відображення
window_name = 'Realtime OCR System'
if SHOW_VIDEO:
    cv2.namedWindow(window_name, cv2.WINDOW_NORMAL)
    cv2.setWindowProperty(window_name,
cv2.WND_PROP_FULLSCREEN, cv2.WINDOW_FULLSCREEN)

print("Система функціонує в штатному режимі.")

current_text = ""

try:
    while True:
        ret, frame = cap.read()
        if not ret: break

        # --- Блок передачі даних на OCR ---
        # Якщо черга вільна, відправляємо копію області інтересу (ROI)
на обробку.
        # Використання copy() необхідне для коректної роботи з
пам'яттю в multiprocessing.
        if not queue_to_ocr.full():
            roi = frame[RECT_Y:RECT_Y+RECT_H,
RECT_X:RECT_X+RECT_W].copy()
            queue_to_ocr.put(roi)

        # --- Блок отримання результатів ---
        # Неблокуюча перевірка наявності нових розпізнаних даних.

```

```

try:
    new_text = queue_from_ocr.get_nowait()
    current_text = new_text
except:
    pass # Якщо нових даних немає, використовуємо попереднє
значення

# --- Блок візуалізації ---
if SHOW_VIDEO:
    # Відображення зони сканування
    cv2.rectangle(frame, (RECT_X, RECT_Y), (RECT_X +
RECT_W, RECT_Y + RECT_H), COLOR, THICKNESS)

    # Вивід розпізнаного тексту на екран (OSD)
    if current_text:
        cv2.putText(frame, f"MODE: {current_text}", (10, 50),
            cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 1, (0, 255, 0), 2)

    cv2.imshow(window_name, frame)

    # Обробка події натискання клавіші 'q' для виходу
    if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('q'):
        break

# --- Логічний блок керування консоллю ---
# Якщо система не знаходиться в ручному режимі (MANU)
if current_text != "MANU":
    # Генерація випадкового номера каналу для симуляції
команди керування
    random_channel = random.randint(1, 8)

```

```
# Вивід сформованої команди в термінал з форматуванням
print(f"\rCMD : CH{random_channel:<15}", end="")

# Затримка виконання циклу (імітація інтервалу між
командами)
sleep(3)

except KeyboardInterrupt:
    print("\nОтримано сигнал зупинки від користувача...")
finally:
    # Коректне завершення роботи: зупинка процесу OCR та
звільнення ресурсів камери
    queue_to_ocr.put(None)
    p.join()
    cap.release()
    if SHOW_VIDEO:
        cv2.destroyAllWindows()

if __name__ == "__main__":
    main()
```

Додаток В. Ілюстративний матеріал

ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ШИФРОВАНОГО АНАЛОГОВОГО ВІДЕОСИГНАЛУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ОСНОВІ МЕТОДУ З АВТОМАТИЧНОЮ ЗМІНОЮ ЧАСТОТИ КАНАЛУ

Виконав: ст. 2 курсу, групи 1КІТС-24М Дацюк А. І.

Керівник: к. т. н., доцент Карпінєць В. В.

Вступ

- В умовах сучасної війни критично важливим елементом ведення бойових дій та розвідки є використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) класу FPV. Незважаючи на появу цифрових систем, значна частина парку БПЛА все ще використовує аналогові канали відеозв'язку (діапазон 5.8 ГГц) через їхню високу надійність на малих відстанях.
- Водночас, аналогові канали вкрай вразливі до РЕБ. Існуючі пасивні методи захисту є неефективними проти прицільного глушіння.
- Таким чином, виникає гостра науково-практична проблема: необхідність розробки автоматичного, ефективного, бюджетного та швидкого методу захисту аналогового відеоканалу.



Актуальність полягає в необхідності забезпечити відеоканал безпілотного апарату від штучних та природних завад заради його збереження та успішного виконання завдання

Метою дослідження є розробка та наукове обґрунтування методу Адаптивної Реактивної Перебудови Частоти (АРПЧ) на основі аналізу читабельності телеметричної інформації (T-VQA) для підвищення завадостійкості аналогових відеоканалів БПЛА.



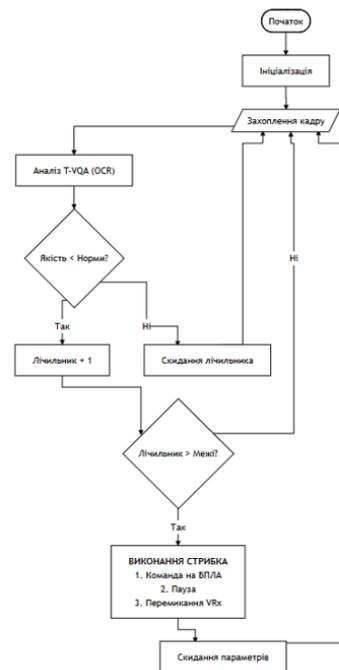
Метод T-VQA (Text-based Video Quality Assessment)

- Гіпотеза: Відеопотік має два шари: динамічний (місцевість) та статичний (OSD текст).
- Принцип: Якщо оператор не може прочитати текст OSD через "сніг", значить канал непридатний.
- Реалізація: Аналіз малої зони інтересу (ROI) замість всього кадру.
- Переваги: Стійкість до хибних спрацювань (не плутає листя дерев з шумом) та низька обчислювальна складність.



Алгоритм методу T-VQA

- Замкнений контур керування :
 - *Бортовий сегмент*: Камера + VTx (SmartAudio) + Приймач керування (ELRS).
 - *Наземний сегмент*: VRx + Карта захоплення (EasyCap) + Raspberry Pi 4.
- Канал керування:
Використання ELRS для передачі команд перемикання на дрон.



Програмна та апаратна реалізація

- Апаратна база: Raspberry Pi 4 Model B (4 ядра ARM Cortex-A72) + EasyCap UTV007.
- Програмний стек: Python 3.9, OpenCV (препроцесинг, бінаризація Оцу), Tesseract OCR.
- Багатопотоковість: Розділення процесів захоплення (Capture), аналізу (Analysis) та керування (Control) для роботи в реальному часі.



Тестування



```

[+] Підсистему OCR ініціалізовано
[+] Система функціонує в штатному режимі.
CMD : CH6
  
```



```

[+] Підсистему OCR ініціалізовано
[+] Система функціонує в штатному режимі.
CMD : CH5
  
```

Економічне обґрунтування

- Вартість модернізації: Собівартість одного комплексу (модернізація наземної станції) — 6250 грн.
- Економічний ефект: Збереження навіть одного дрона вартістю 20 000 грн повністю окупає систему.
- Рентабельність: 9500% при розрахунку на партію зі 100 дронів.
- Вигода: Економія близько 600 тис. грн на партії за рахунок зменшення втрат від РЕБ.

КОМПЛЕКС

=



Висновки

- Створено діючий прототип системи АРПЧ, готовий до використання.
- Доведено ефективність методу T-VQA: висока кореляція з реальною втратою керованості.
- Розробка дозволяє значно підвищити живучість FPV-дронів у зоні бойових дій з мінімальними витратами.



ДЯКУЮ ЗА УВАГУ



Додаток Г. Протокол перевірки на антиплагіат

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Підвищення завадостійкості шифрованого аналогового відеосигналу безпілотних літальних апаратів на основі методу з автоматичною зміною частоти каналу

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра менеджменту та безпеки інформаційних систем факультет менеджменту та інформаційної безпеки гр.1КІТС-24м

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism (КПІ) 2,29 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки академічного плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

к.т.н., доцент, зав. каф. МБІС Карпінець В.В.

к.ф.-м.н., доцент каф. МБІС Шиян А.А.

Особа, відповідальна за перевірку Коваль Н.П.

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник



доц. Карпінець В.В.

Здобувач



Дацюк А.І.