

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістра

(назва освітнього ступеня)

на тему: Метод виявлення БПЛА на основі аналізу радіочастотних сигналів

Виконав: студент 6 курсу, групи РАм-61

спеціальності 172 Електронні комунікації та
радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Башняк В.Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Дунець В.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Хвостівська Л.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Дунець В.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Хвостівський М.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2024

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра радіотехнічних систем
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Дунець В.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)
«29» листопада 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)
Студенту Башняку Володимир Тарасовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Метод виявлення БПЛА на основі аналізу радіочастотних сигналів

Керівник роботи Дунець Василь Любомирович, к.т.н., доцент, завідувач кафедри РТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «29» листопада 2024 року № 4/7-1145
2. Термін подання студентом завершеної роботи 26 грудня 2024р.
3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації про методи виявлення БПЛА на основі аналізу радіочастотних сигналів.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ
Розділ 1. Аналітична частина
Розділ 2. Основна частина
Розділ 3. Науково-дослідна частина
Розділ 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях
Загальні висновки
Перелік посилань
Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
1. Титульний аркуш. 2. Тема, мета, об'єкт, предмет, методи дослідження. 3. Завдання дослідження.
4. Архітектура, конструктивні елементи та основні компоненти більшості моделей БПЛА.
5. Системи виявлення БПЛА. 6. Архітектура SDR. 7. Блок-схема функціонування системи виявлення енергії сигналів. 8. Процес оцінювання параметрів OFDM. 9. Структура модуля машинного навчання. 10. Поточковий граф для виявлення та класифікації сигналів БПЛА у GNU Radio. 11. Діаграма ефективності класифікації сигналів БПЛА. 12. Діаграма рівня виявлення БПЛА. 13. Графік середнього значення отриманої енергії сигналів БПЛА. 14. Результат виявлення енергії сигналу БПЛА. 15. Гістограма розподілу параметрів. 16. Розподіл щільності параметрів. 17. Залежність між ймовірністю виявлення та SNR. 18. Порівняння моделей загасання сигналу БПЛА. 19. Висновки. 20. Дякую за увагу!

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.ф.-м.н, доцент кафедри ПВ Зелінський І.М.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	к.т.н., завідувач кафедри МТ Окіпний І.Б.		

7. Дата видачі завдання _____ 29 листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	29.11.2024	Виконано
2.	Підбір джерел по темі кваліфікаційної роботи	29.11.2024 – 01.12.2024	Виконано
3.	Переклад та опрацювання джерел по темі кваліфікаційної роботи	01.12.2024 – 03.12.2024	Виконано
4.	Виконання дослідження по темі кваліфікаційної роботи	03.12.2024 – 05.12.2024	Виконано
5.	Оформлення розділу «Аналітична частина»	05.12.2024 – 07.12.2024	Виконано
6.	Оформлення розділу «Основна частина»	07.12.2024 – 09.12.2024	Виконано
7.	Оформлення розділу «Науково-дослідна частина»	09.12.2024 – 11.12.2024	Виконано
8.	Оформлення розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	11.12.2024	Виконано
9.	Підготовка графічного матеріалу	11.12.2024 – 12.12.2024	Виконано
10.	Оформлення кваліфікаційної роботи	11.12.2024 – 12.12.2024	Виконано
11.	Нормоконтроль	12.12.2024	Виконано
12.	Перевірка на плагіат	12.12.2024	Виконано
13.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	12.12.2024	Виконано
14.	Захист кваліфікаційної роботи	26.12.2024	

Студент

(підпис)

Башняк В.Т.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Дунець В.Л.

(прізвище та ініціали)

Метод виявлення БПЛА на основі аналізу радіочастотних сигналів // Кваліфікаційна робота освітнього рівня «Магістр» // Башняк Володимир Тарасович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, кафедра радіотехнічних систем, група РАМ-61 // Тернопіль, 2024 // С. 84, рис. – 27, табл. – 10, додат. – 4, бібліогр. – 30.

Ключові слова: ВИЯВЛЕННЯ, БПЛА, РАДІОЧАСТОТНИЙ СИГНАЛ, SDR, GNU RADIO, OFDM, КЛАСИФІКАЦІЯ, МАШИННЕ НАВЧАННЯ.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці методу виявлення БПЛА на основі аналізу РЧ-сигналів із застосуванням SDR та алгоритмів GNU Radio.

У першому розділі проаналізовано сучасні методи виявлення БПЛА, включаючи аудіо-, відео-, тепловізійні, радіолокаційні та РЧ-методи. Висвітлено основні характеристики БПЛА, принципи їх роботи та частотні діапазони, які вони використовують. Описано обмеження існуючих методів, зокрема складнощі у відокремленні сигналів БПЛА від інших джерел. Визначено доцільність застосування РЧ-методів через їхню здатність виявляти сигнали на значних відстанях.

У другому розділі досліджено можливості використання SDR та GNU Radio для виявлення сигналів. Описано архітектуру SDR, включаючи її компоненти – РЧ-секцію, секцію ПЧ та секцію базової смуги. Розглянуто програмну платформу GNU Radio як інструмент для створення SDR-систем. Проведено порівняльний аналіз методів виявлення сигналів, таких як узгоджений фільтр, виявлення енергії та циклостационарних характеристик. Обрано метод виявлення енергії сигналів як оптимальний для реалізації у реальних умовах.

У третьому розділі розроблено та реалізовано метод виявлення сигналів БПЛА на основі SDR та GNU Radio. Створено блок для виявлення енергії сигналу, виконано аналіз ключових параметрів OFDM-сигналів, таких як

довжина циклічного префіксу, інтервал між піднесучими та тривалість символу. Розроблено алгоритми класифікації сигналів із використанням методів ML. Проведено експериментальні дослідження з БПЛА DJI Phantom та Mavic, зібрано навчальні дані та побудовано класифікатор, який демонструє високу точність і ефективність при виявленні та класифікації сигналів.

У четвертому розділі окреслено заходи охорони праці та безпеки під час експлуатації БПЛА, особливо в умовах надзвичайних ситуацій. Розглянуто вимоги до персоналу, техніку безпеки, порядок дій у разі аварій, специфіку роботи в складних умовах і рекомендації для ефективного використання. Наголошено на необхідності спеціальної підготовки операторів, контролю технічного стану обладнання та дотримання законодавчих норм, що є ключовими для безпечної та ефективної роботи.

ANNOTATION

UAV detection method based on analysis of radio frequency signals // Qualification work of the educational level «Master» // Bashniak Volodymyr // Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, Telecommunications and Radio Engineering, group RAm-61 // Ternopil, 2024 // P. 84, fig. – 27, tabl. – 10, annexes. – 4, references – 30.

Keywords: DETECTION, UAV, RADIO FREQUENCY SIGNAL, SDR, GNU RADIO, OFDM, CLASSIFICATION, MACHINE LEARNING.

The qualification work is dedicated to the development of a method for UAV detection based on RF signal analysis using SDR and GNU Radio algorithms.

In the first chapter, modern UAV detection methods are analyzed, including audio, video, thermal imaging, radar, and RF methods. The main characteristics of UAVs, their operating principles, and the frequency ranges they utilize are highlighted. The limitations of existing methods are described, particularly the challenges of distinguishing UAV signals from other sources. The feasibility of applying RF methods is substantiated due to their ability to detect signals over long distances.

The second chapter explores the potential of using SDR and GNU Radio for signal detection. The architecture of SDR is described, including its components: RF section, IF section, and baseband section. The GNU Radio software platform is considered as a tool for creating SDR systems. A comparative analysis of signal detection methods, such as matched filtering, energy detection, and cyclostationary feature detection, is conducted. Energy detection is selected as the optimal method for implementation under real-world conditions.

In the third chapter, a UAV signal detection method based on SDR and GNU Radio is developed and implemented. A block for energy detection is created, and key OFDM signal parameters, such as cyclic prefix length, subcarrier spacing, and symbol

duration, are analyzed. Algorithms for signal classification using ML methods are developed. Experimental studies with DJI Phantom and Mavic UAVs are conducted, training data is collected, and a classifier is built, demonstrating high accuracy and efficiency in signal detection and classification.

The fourth chapter outlines occupational safety and security measures during UAV operation, especially in emergency situations. Personnel requirements, safety techniques, actions in case of accidents, specifics of working under challenging conditions, and recommendations for effective usage are discussed. Emphasis is placed on the need for specialized operator training, monitoring the technical condition of equipment, and compliance with legal regulations, which are key to ensuring safe and effective operation.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ

C++ – Універсальна мова програмування високого рівня з підтримкою декількох парадигм програмування.

CP (англ. Cyclic Prefix) – Циклічний префікс.

DSSS (англ. Direct Sequence Spread Spectrum) – Розширення спектра методом прямої послідовності.

F1-Score – Комплексна метрика для оцінювання моделей класифікації, у якій вирішальне значення мають як точність, так і відгук.

FHSS (англ. Frequency Hopping Spectrum Spreading) – Псевдовипадкове перелаштування робочої частоти.

FM – (англ. Frequency modulation) – Частотна модуляція.

GRC (англ. GNU Radio Companion) – Графічний інструмент для створення відображень сигналів та генерації вихідного коду з потоку графу проєкту.

GNU Radio – Вільна платформа цифрової обробки сигналів.

HackRF One – Широкосмуговий напівдуплексний радіоприймач із програмним забезпеченням, створений і виготовлений Great Scott Gadgets.

KNN (англ. K-Nearest Neighbors) – Метод k-найближчих сусідів.

ML (англ. Machine Learning) – Машинне навчання. Галузь штучного інтелекту, яка розробляє алгоритми для аналізу даних, навчання та прогнозування.

OFDM (англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) – Метод мультиплексування, який підрозподіляє заданий радіоспектр на набір ортогональних піднесних, через які передається інформація.

PSD (англ. Power Spectral Density) – Спектральна щільність потужності.

Python – Інтерпретована об'єктно-орієнтована мова програмування високого рівня із суворою динамічною типізацією.

SDR (англ. Software-Defined Radio) – Програмно-кероване радіо.

SNR (англ. Signal-to-noise ratio) – Співвідношення сигнал/шум.

SWIG (англ. Simplified Wrapper and Interface Generator) – Вільне програмне забезпечування для зв'язування програм та бібліотек, написаних на мовах C та C++, з інтерпретованими або компільованими мовами.

USRP (англ. Universal Software Radio Peripheral) – Лінійка недорогих універсальних рішень для розробки SDR систем.

Wi-Fi (англ. Wireless Fidelity) – Технологія бездротової передачі даних радіоканалами.

АБГШ – Адитивний білий гаусів шум.

АКФ – Автокореляційна функція.

АЦП – Аналого-цифровий перетворювач.

БПЛА (англ. Unmanned Aerial Vehicle, скор. UAV) – Безпілотний літальний апарат.

ВЧ – Високі частоти.

ІЧ – Інфрачервоне випромінювання.

КЗ – Канал зв'язку.

Класифікація – Процес розпізнавання або віднесення об'єкта до певного класу на основі його характеристик.

ПЗ – Програмне забезпечення.

ПК – Персональний комп'ютер.

Прд – Передавач.

Прм – Приймач.

ПЧ – Проміжна частота.

РЧ – Радіочастота.

ЦОС – Цифрова обробка сигналів.

ШПФ (англ. Fast Fourier Transform, скор. FFT) – Швидке перетворення Фур'є.

ЗМІСТ

ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	14
1.1. БПЛА	14
1.2. Методи виявлення БПЛА	14
1.2.1. Метод виявлення БПЛА за звуковими сигналами	15
1.2.2. Метод виявлення БПЛА за відеосигналами	15
1.2.3. Метод виявлення БПЛА за допомогою тепловізійних систем	15
1.2.4. Радіолокаційне виявлення БПЛА	16
1.2.5. Радіочастотне виявлення БПЛА	16
1.3. Архітектура та технології зв'язку БПЛА	17
1.3.1. Частотні діапазони та модуляції у зв'язку БПЛА	18
1.3.2. Постановка проблеми	18
1.3.3. Метод виявлення та класифікації сигналів БПЛА	19
1.4. Висновок до першого розділу	20
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА	22
2.1. SDR	22
2.2. Історія розвитку SDR	22
2.3. Переваги SDR	22
2.4. Архітектура SDR	23
2.5. Концепція GNU Radio та GRC	24
2.6. Структура модулів та можливості GNU Radio для аналізу радіосигналів	26
2.7. HackRF One	27
2.8. Фактори, що впливають на ефективність методів виявлення сигналів	27
2.9. Методи виявлення сигналів	28
2.9.1. Узгоджений фільтр	28
2.9.2. Виявлення енергії	28
2.9.3. Виявлення статистичних властивостей	29

2.9.4. Виявлення власних значень	30
2.10. Порівняльний аналіз методів виявлення сигналів.....	30
2.11. Висновок до другого розділу	32
РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	33
3.1. Виявлення сигналу БПЛА	33
3.2. Опис потокового графу	34
3.3. OFDM	36
3.3.1. Концепція ортогональності.....	37
3.3.2. Ключові параметри та класифікація модуляції OFDM.....	39
3.3.3. Приклад деяких ключових параметрів OFDM.....	40
3.3.4. Реалізація оцінювання параметрів OFDM.....	40
3.3.5. Реалізація оцінювача параметрів OFDM у GNU Radio.....	41
3.4. Класифікація за допомогою ML	42
3.4.1. Класифікатор ML	44
3.4.2. ML у GNU Radio	45
3.4.3. Інструменти, використані для ML.....	46
3.5. Опис використаних параметрів	47
3.5.1. Параметри виявлення енергії сигналів БПЛА	47
3.5.2. Оцінювач параметрів OFDM	48
3.6. Налаштування та тестування	48
3.7. Принцип роботи	49
3.8. Навчання та тестування даних ML.....	50
3.8.1. Тестування та результати	51
3.8.2. Очікувані результати тестування в реальному часі	53
3.8.3. Тестування в реальному часі	53
3.8.4. Спостереження за тестуванням у реальному часі	54
3.9. Тестування SNR для виявлення БПЛА.....	55
3.9.1. Результати тестування SNR для виявлення БПЛА.....	56
3.10. Результати дослідження	60
3.11. Моделі поширення радіосигналів	61

3.11.1. Модель поширення сигналу у вільному просторі	62
3.11.2. Двопроменева модель поширення сигналу	62
3.11.3. Емпірична модель поширення сигналу	62
3.12. Висновок до третього розділу	63
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	65
4.1. Вимоги забезпечення охорони праці та техніки безпеки при виконанні робіт по застосуванню БПЛА	65
4.2. Інструкція з охорони праці для оператора наземних засобів керування БПЛА.....	68
4.3. Інструкція з безпеки польотів.....	71
4.4. Функції, завдання та способи застосування БПЛА в умовах надзвичайних ситуацій	73
4.5. Розробка вимог безпеки праці при настанні НС.....	77
4.6. Висновок до четвертого розділу.....	79
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	81
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	82
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Актуальність теми. З розвитком технологій БПЛА стали доступними для широкого кола користувачів, що привело до збільшення їх застосування не лише для цивільних, а й для потенційно небезпечних цілей. Використання БПЛА може загрожувати безпеці населення, підприємств та державних об'єктів. У зв'язку з цим актуальною є розробка ефективних методів виявлення БПЛА за допомогою аналізу РЧ-сигналів, що дозволить здійснювати моніторинг та запобігати загрозам з боку БПЛА.

Мета і задачі дослідження. Метою даної кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» є обґрунтування та розробка методу виявлення БПЛА на основі аналізу РЧ-сигналів із застосуванням SDR та алгоритмів GNU Radio. Для досягнення поставленої мети потрібно виконати ряд завдань, зокрема:

- Вивчити та проаналізувати існуючі методи виявлення БПЛА, зокрема РЧ-аналіз.
- Дослідити можливості SDR та ПЗ GNU Radio для виявлення сигналів БПЛА.
- Розробити систему виявлення РЧ-сигналів із використанням алгоритмів GNU Radio.
- Провести експериментальне тестування розробленої системи на базі SDR обладнання.
- Оцінити точність виявлення сигналів БПЛА з використання розробленого методу.

Об'єкт дослідження. Метод виявлення сигналів БПЛА.

Предмет дослідження. Моделювання за допомогою GNU Radio РЧ-сигналів БПЛА.

Методи дослідження. В роботі використовуються методи спектрального аналізу РЧ-сигналів, алгоритми GNU Radio для класифікації сигналів, а також SDR для виявлення РЧ-сигналів БПЛА. Застосовуються інструменти GNU Radio та платформа HackRF для збору та обробки сигналів.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблений метод виявлення РЧ-сигналів БПЛА може бути використаний для захисту цивільних і стратегічних об'єктів від небажаних БПЛА. Метод дає змогу виявляти та ідентифікувати БПЛА на основі їх РЧ-характеристик, що є ефективним рішенням для моніторингу та забезпечення безпеки на територіях, де використання БПЛА може завдати шкоди.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна роботи полягає у розробці нового методу класифікації РЧ-сигналів БПЛА, що поєднує використання SDR технологій з алгоритмами для точного виявлення та ідентифікації БПЛА. Запропонований метод базується на аналізі параметрів OFDM та застосуванні виявлення енергії сигналів, що дає змогу більш ефективно ідентифікувати БПЛА на основі їх унікальних сигналів.

Публікації. Викладені в роботі результати доповідалися та обговорювалися на XIII міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 11-12 грудня 2024 року).

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. БПЛА

БПЛА, більш відомий як дрон, є комплексом, що включає сам літальний пристрій, станцію управління і бездротовий зв'язок між ними. Цей термін використовується для позначення апаратів, які виконують різні завдання – від розважальних і цивільних до професійних. Термін «дрон» є популярнішим серед аматорів і зазвичай застосовується у військовому контексті, хоча в побуті також позначає різні типи БПЛА.

В останні роки зростає зацікавленість у використанні БПЛА завдяки їхній доступності, що зумовлено розвитком недорогих сенсорів. Це дало поштовх до нових сфер цивільного використання. Зниження вартості зробило БПЛА доступнішими для приватних осіб, і сьогодні їх активно застосовують як у комерційних, так і в освітніх цілях [1]. Проте, поряд із позитивними аспектами, БПЛА можуть становити і певну загрозу.

Однією з основних проблем є виявлення БПЛА, що стало викликом для дослідників та ентузіастів. Основні труднощі наступні:

- БПЛА можуть з'являтися з будь-якого напрямку, тому методи виявлення повинні забезпечувати моніторинг кількох напрямків одночасно.
- Складно відрізнити БПЛА від інших об'єктів, наприклад, повітряних зміїв або птахів, особливо якщо він перебуває далеко від місця виявлення.
- БПЛА обмежені зарядом акумулятора і працюють на малій висоті, що може знижувати ефективність їх використання через вплив об'єктів і навколишнього середовища.

1.2. Методи виявлення БПЛА

У наукових джерелах описано різні методи виявлення БПЛА, серед яких виділяються аудіо-, відео-, тепловізійні, радіолокаційні та РЧ-методи. У [2]

розглядаються певні труднощі, що виникають при виявленні БПЛА, а також пропонується аудіорешітковий підхід для виявлення. У [3] подано метод виявлення сигналів БПЛА за допомогою пасивної радіолокаційної техніки. У [1] розкрито основи РЧ-методу для виявлення БПЛА. Тепловий підхід для виявлення БПЛА детально аналізується у [4].

1.2.1. Метод виявлення БПЛА за звуковими сигналами

Підхід до звукового виявлення БПЛА використовує масив мікрофонів, розташованих у різних напрямках, для вловлювання навколишніх звуків від БПЛА. Більшість мікрофонів, задіяних у цьому процесі, здатні приймати звук на відстані 7,62-9,14 м. Записані звукові хвилі обробляються та фільтруються для аналізу цільової частоти. Відомо, що багато моделей БПЛА мають безщіткові двигуни постійного струму, які створюють характерний шиплячий ВЧ-звук (приблизно 40 кГц), що є унікальним для більшості БПЛА. За допомогою ЦОС можна виокремити конкретну частоту, необхідну для визначення присутності БПЛА поблизу. Основна перевага цього методу полягає в його ефективності в тихих умовах; однак, у міських або шумних середовищах із низьким SNR його ефективність знижується.

1.2.2. Метод виявлення БПЛА за відеосигналами

Для відеовиявлення сигналів БПЛА камери здатні охоплювати до 106,68 метрів з адекватною роздільною здатністю, що робить цей метод економічно ефективним. Однак, однією з головних проблем є труднощі у точному відокремленні БПЛА від птахів. На жаль, цей метод стає малоефективним у зонах, де часто ширяють птахи.

1.2.3. Метод виявлення БПЛА за допомогою тепловізійних систем

Завдяки властивостям температури об'єкти, тепліші за абсолютний нуль, випромінюють ІЧ-випромінювання, що може бути зафіксоване тепловізійними системами. Цей метод також підходить для виявлення БПЛА, особливо тих, що

оснащені двигунами, переважно з фіксованим крилом, і може працювати на відстані до 106,68 м. Наприклад, турбовентиляторні або турбореактивні двигуни виділяють гарячі вихлопні гази, що спрощує їх фіксацію. Проте, метод малоефективний у випадках, коли корпус БПЛА містить багато пластику або випромінює недостатньо тепла, як, наприклад, більшість пластикових квадрокоптерів з електродвигунами. У таких ситуаціях цей метод може розпізнати птаха чи інший об'єкт як тепліший, ніж БПЛА. Через таку ненадійність метод варто використовувати як доповнення до інших способів виявлення, а не як окремий інструмент.

1.2.4. Радіолокаційне виявлення БПЛА

Радіолокаційні системи ефективно виявляють великі повітряні об'єкти, але з труднощами справляються з дрібнішими, такими як квадрокоптери. Через свої розміри і використання пластикових матеріалів, ці невеликі електронні БПЛА, що стали популярними у повсякденному житті, часто залишаються непоміченими радарами, оскільки ці системи не були первинно призначені для їх виявлення. У роботі [3] запропоновано пасивний підхід до радіолокаційного виявлення сигналів БПЛА.

1.2.5. Радіочастотне виявлення БПЛА

Виявлення сигналів БПЛА за його РЧ-сигнатурою є одним із дієвих методів для ідентифікації БПЛА на значній відстані. Протокол зв'язку таких апаратів побудований так, що БПЛА постійно з'єднаний із наземною станцією управління (контролером), через яку здійснюється передача відеозображення. Завдяки особливостям бездротових сигналів, ці РЧ-сигнали можна виявити навіть на великій дистанції. Повністю уникнути РЧ-виявлення практично неможливо. Хоча деякі БПЛА з фіксованим двигуном можуть підійматися на дуже великі висоти, уникаючи виявлення, здебільшого ефективність цього методу залежить від потужності Прд і чутливості Прм.

1.3. Архітектура та технології зв'язку БПЛА

БПЛА складається з двох основних компонентів: пульта дистанційного керування та літального апарату. Зв'язок між ними здійснюється через РЧ КЗ. На рисунку 1.1 наведено архітектуру, конструктивні елементи та основні компоненти більшості моделей БПЛА.

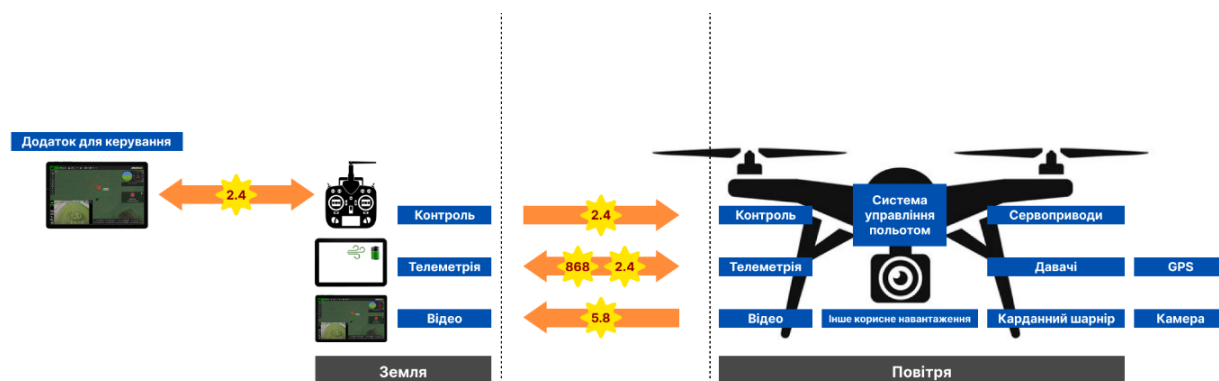


Рис. 1.1. – Компоненти БПЛА

Для класифікації РЧ-сигналів основну увагу приділено зв'язку між наземною частиною (пульт) і повітряним апаратом (БПЛА). Пульт дистанційного керування забезпечує керування БПЛА, передає дані, відео та іншу інформацію між пристроями. Переважна більшість контролерів функціонує у діапазоні 2,4 ГГц, використовуючи запатентовану технологію модуляції зі стрибкоподібною перебудовою частоти (FHSS) [6]. Ця модуляція підвищує стійкість та дальність зв'язку. Модуляція FHSS застосовується не тільки у військовій техніці, але й в електронних пристроях, таких як мобільні телефони, завдяки здатності ефективно захищатися від перешкод. У військовій сфері FHSS може мати критично важливе значення, забезпечуючи низьку ймовірність виявлення, що допомагає приховати існування сигналу від противника. Проте така функція ускладнює виявлення БПЛА. Контролери, що використовують FHSS, здатні протистояти глушінню завдяки змінним частотам передачі, охоплюючи весь спектр, на якому працює БПЛА. Пульт та БПЛА взаємодіють через сигнали управління, передачу відео та інші КЗ.

У додатку Б у таблиці Б.1 наведено перелік систем керування, які застосовуються у БПЛА, діапазони частот, на яких вони функціонують, та особливості технологій модуляції.

У додатку Б у таблиці Б.2 подано інформацію про передачу відео між пультом та БПЛА, включаючи діапазони частот та модуляції, що застосовуються.

1.3.1. Частотні діапазони та модуляції у зв'язку БПЛА

БПЛА, подібно до інших радіокерованих пристроїв, функціонують за принципом зв'язку між Прд (контролером) та Прм, розташованим на літальному апараті, здатним інтерпретувати сигнали з пульта керування [7]. Зазвичай FCC-режим виділяє для радіокерованих БПЛА частоти 27 МГц і 49 МГц, але сучасні моделі, як правило, працюють у діапазонах 2,4 ГГц або 5 ГГц, що визначаються виробниками. Оскільки Прд й Прм доступні в широкому спектрі частот, налаштовані на замовлення БПЛА можуть використовувати частоти, відмінні від стандартних. Додаткові неліцензійні діапазони, що застосовуються для новітніх БПЛА, включають 433 МГц, 868 МГц та 5,8 ГГц. Частота 2,4 ГГц, зазвичай, використовується для управління, а 5,8 ГГц – для відеотрансляцій. Діапазони 433 МГц і 868 МГц, крім 2,4 ГГц, зазвичай застосовуються для телеметрії. У додатку Б у таблиці Б.3 наведено огляд поширених частот та методів модуляції, використовуваних БПЛА.

1.3.2. Постановка проблеми

На основі доступних даних по БПЛА метою цієї кваліфікаційної роботи є розробка методу виявлення БПЛА, що базується на аналізі РЧ-сигналу, а також класифікації БПЛА з використанням алгоритмів ML. Метод буде реалізований на основі SDR, де GRC слугуватиме програмною складовою, а HackRF – апаратною. Основні питання, на які потрібно знайти відповіді:

- Чи можливо виявити БПЛА шляхом аналізу їх радіосигналів?
- Які характеристики сигналу можна виділити?

- Які ознаки є найбільш ефективними для виявлення та класифікації?
- Яка точність модуля для РЧ-виявлення?
- Чи здатні точно розрізняти БПЛА різних класів?

1.3.3. Метод виявлення та класифікації сигналів БПЛА

Підхід базується на концепції, викладеній у [5]. Планується застосувати методи РЧ-виявлення для ідентифікації, виділення ознак та класифікації сигналів БПЛА за допомогою алгоритмів ML. Особлива увага приділяється параметрам OFDM-сигналів, а також енергетичним та іншим статистичним характеристикам, що пов'язані з отриманими сигналами. Іншими словами, для виявлення сигналу буде використовуватися метод виявлення енергії сигналів, який вирізняється простотою і не вимагає значних обчислювальних ресурсів. Після вилучення необхідних ознак з вхідного сигналу проводиться додаткова обробка, включаючи маркування та навчання виділених ознак. Це необхідно, оскільки для класифікації сигналів БПЛА буде використано ПЗ GRC. Для процесів виявлення, виділення, класифікації та тестування застосовуються блоки GNU Radio, а навчання та обробку даних буде проведено на Python. Після завершення навчання на Python буде створено тестовий файл, який завантажиться в блок GNU Radio для тестування та аналізу ML в режимі реального часу.

На рисунку 1.2 зображено системи виявлення БПЛА з використанням активного (а) та пасивного (б) підходів.

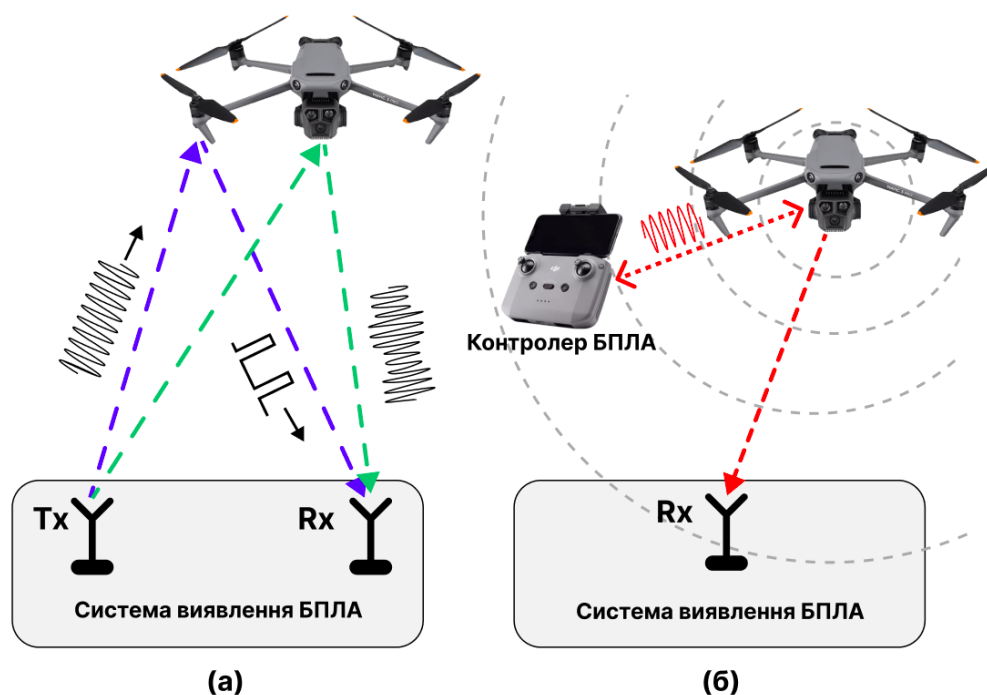


Рис. 1.2. – Системи виявлення БПЛА: (а) активний і (б) пасивний підходи

1. Активний підхід (а). Система виявлення БПЛА складається з Прд (Tx) та Прм (Rx), які спільно формують активну схему. Прд випромінює радіосигнали, які відбиваються від БПЛА, а Прм приймає ці відбиті сигнали для подальшої обробки та ідентифікації об'єкта.

2. Пасивний підхід (б). Система складається лише з Прм (Rx), який пасивно фіксує сигнали, що випромінюються самим БПЛА або його контролером. Цей підхід базується на аналізі вже існуючих сигналів у середовищі без активного випромінювання з боку системи.

Рис. 1.2 демонструє принципові відмінності між двома підходами до виявлення БПЛА.

1.4. Висновок до першого розділу

У першому розділі кваліфікаційної роботи:

– Проведено детальний аналіз сучасних аспектів використання та виявлення БПЛА.

- Розглянуто ключові характеристики, принципи роботи та методи виявлення БПЛА.

- Описано проблематику виявлення БПЛА, що полягає у їх здатності рухатися з будь-якого напрямку, труднощах у розпізнаванні серед інших об'єктів, а також обмеженнях, пов'язаних із їх конструкцією та використанням у міських умовах.

Серед методів виявлення БПЛА проаналізовано аудіо-, відео-, тепловізійні, радіолокаційні та РЧ методи. Кожен із цих методів має свої переваги та обмеження. Аудіометод ефективний у тихих середовищах, але втрачає точність у шумних умовах. Метод виявлення відеосигналів забезпечує високу деталізацію на великих відстанях, проте стикається з проблемами розрізнення БПЛА і птахів. Тепловізійний метод ефективний для виявлення апаратів із двигунами, що виділяють тепло, але має обмеження при роботі з пластиковими корпусами. Радіолокаційні системи здатні виявляти великі об'єкти, але є менш ефективними для малих БПЛА через їхні розміри та матеріали. Найбільш перспективним є РЧ-метод, який дозволяє виявляти сигнали БПЛА на значних відстанях завдяки унікальним характеристикам їх радіосигналів.

Також охарактеризовано частотні діапазони, що використовуються для управління, передачі відео та телеметрії БПЛА, а також методи модуляції, які забезпечують стабільність і захищеність сигналу. Особливу увагу приділено технології FHSS, яка підвищує стійкість до перешкод і знижує ймовірність виявлення сигналів БПЛА.

На основі проведеного аналізу визначено основні проблеми, які потребують вирішення в рамках кваліфікаційної роботи: можливість виявлення БПЛА шляхом аналізу радіосигналів, виділення ключових характеристик сигналів, їх класифікація та оцінка точності методів виявлення. Ці завдання визначають напрямок подальшого дослідження, метою якого є розробка ефективного методу виявлення БПЛА на основі аналізу їх РЧ-сигналів.

РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1. SDR

З розвитком комунікаційних технологій – голосових дзвінків, передачі даних, відеозв'язку та командних каналів – все більш актуальними стають пристрої, які легко налаштовуються і є економічно вигідними. SDR саме відповідає цим вимогам: це технологія, де більшість функцій фізичного рівня реалізуються через ПЗ, як зазначено в [8]. Такий підхід дозволяє змінювати функціонал без зміни апаратної частини, що робить SDR надзвичайно практичним у сучасному світі.

2.2. Історія розвитку SDR

Джо Мітола з компанії Mitre часто вважається засновником SDR [9]. Історію розвитку SDR можна простежити ще з середини 1980-х років. Однією з перших значущих розробок у цій галузі була система SpeakEasy, створена компаніями Hazeltine та Motorola для військово-повітряної бази Рим-Гріффіс. SpeakEasy стала платформою для трансивера, побудованою на основі технології SDR, і забезпечувала тактичний військовий зв'язок у широкому частотному діапазоні – від 2 МГц до 2 ГГц. Крім того, вона дозволяла сумісність між різними стандартами повітряного інтерфейсу різних родів військ. У технології SpeakEasy використовувалися численні концепції та технології бездротового зв'язку для підтримки багатодіапазонних і багаторежимних операцій. З того часу й до сьогодні багато фахівців зробили вагомий внесок у розвиток SDR, що виходить за межі даної кваліфікаційної роботи.

2.3. Переваги SDR

Переваги SDR охоплюють, але не обмежуються такими аспектами:

- Забезпечує високу інтероперабельність, оскільки підтримує кілька стандартів завдяки можливостям багатодіапазонного та багатомодового режимів.

- Економічно вигідне для користувачів через зниження вартості володіння, потребує мінімального обслуговування і має простий процес розгортання.

- Має високу стабільність завдяки широкому використанню універсальних апаратних платформ.

- SDR є гнучким у налаштуванні, що сприяє швидкому переходу до нових стандартів і технологій завдяки можливостям програмування та переналаштування.

2.4. Архітектура SDR

Архітектура SDR поділяється на три основні частини: РЧ-секцію, секцію ПЧ та секцію базової смуги. РЧ-сигнали приймаються антенами й перетворюються на сигнали ПЧ. Далі сигнали ПЧ перетворюються в базовий діапазон, де здійснюється ЦОС в ПЗ [9]. Це перетворення РЧ-сигналів у ПЧ дозволяє врахувати апаратні та програмні обмеження швидкодії для комерційних компонентів COTS (Commercial Off-The-Shelf). Оцифрування сигналу за допомогою АЦП підготовлює його для подальшої цифрової обробки.

На рисунку 2.1 наведено архітектуру SDR, яка складається із трьох основних секцій:

- РЧ-секція. Складається з антени та радіочастотного переднього кінця (RF front end), який виконує функцію прийому та первинної обробки сигналу на радіочастоті.

- Секція ПЧ. Включає АЦП для оцифровки сигналу і цифрове перетворення “вгору” або “вниз” для зміни частотного діапазону.

- Базовий діапазон. Містить блок ЦОС, який забезпечує обробку базового діапазону, включаючи демодуляцію, декодування та інші функції.



Рис. 2.1. – Архітектура SDR

Рис. 2.1 ілюструє принципову схему роботи SDR, яка дозволяє налаштовувати параметри сигналів програмно, забезпечуючи гнучкість і універсальність у роботі з різними сигналами.

2.5. Концепція GNU Radio та GRC

GNU Radio – це інструмент із відкритим кодом, який став однією з основ SDR. Завдяки активній підтримці спільноти, великій бібліотеці інструментів обробки та універсальності, цей фреймворк користується популярністю серед академічних дослідників, комерційних компаній та студентів [9]. GNU Radio сумісний з усіма основними операційними системами для ПК, хоча продуктивність відрізняється. Ubuntu показує найкращі результати завдяки гнучкості та доступу до додаткових фреймворків. Його можна використовувати з різними апаратними компонентами, такими як USRP, HackRF, Raspberry Pi, для створення SDR [9]. Основною мовою для обробки сигналів є C++, хоча Python також використовується для написання блоків, але він поступається за швидкістю C++. Python зазвичай застосовують для скриптів, які з'єднують блоки обробки. Бібліотека GNU Radio включає численні готові блоки, а за допомогою SWIG користувачі можуть створювати власні модулі OOT для конкретних завдань. Нещодавнє оновлення GNU Radio дозволяє використовувати багатоядерність, що дозволяє розподіляти блоки по різних ядрах процесора,

ефективніше використовуючи ресурси. GNU Radio складається з модулів для обробки сигналів, таких як модуляція, демодуляція, ШПФ, кодування, фільтрування тощо. Модулі з'єднуються потоками даних, утворюючи потоковий граф для визначення напрямку потоку.

На рисунку 2.2 наведено потоковий граф у середовищі GRC, де:

- Random Source: генерує випадкові значення в діапазоні від 0 до 2 із заданою кількістю вибірок (1 тис.) та повторюваністю.
- Throttle: обмежує швидкість обробки сигналу до встановленої частоти (32 тис.), забезпечуючи узгодженість роботи з потоком даних.
- Null Sink: приймає оброблені дані, але не виконує подальших дій із ними, використовується для тестування або зниження навантаження.

Також представлена змінна `samp_rate` зі значенням 32 тис., яка задає частоту дискретизації для системи. Цей потоковий граф демонструє основний принцип створення потоків обробки сигналів у GRC.

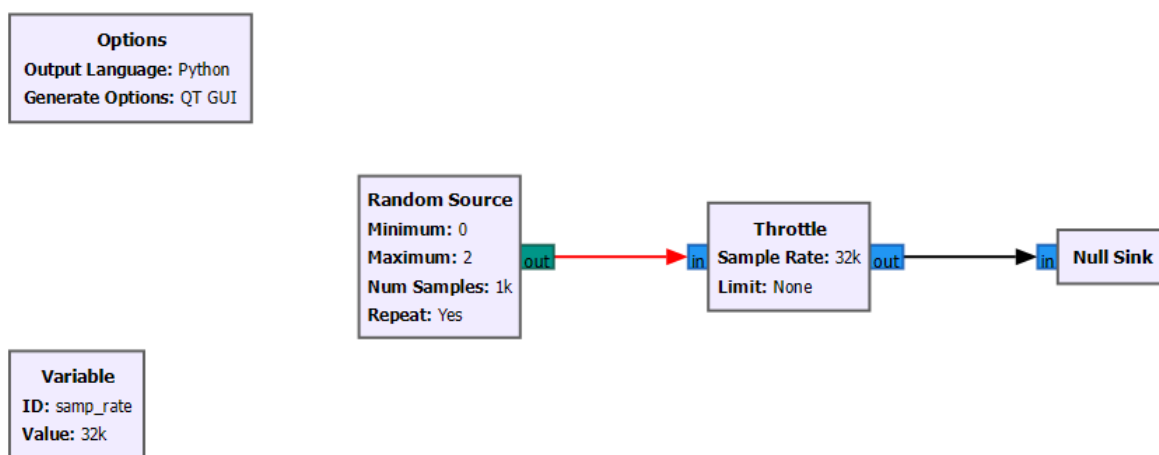


Рис. 2.2. – Потоковий граф в середовищі GRC

GRC – графічний інструмент для створення потокового графу і генерації коду. Завдяки активній онлайн-спільноті GRC є дуже інтуїтивною та потужною платформою. Користувачі можуть графічно створювати потік, поєднуючи блоки з бібліотек GNU Radio. Модулі в GRC поділяються на три категорії:

- Блок джерела: це GRC-блоки, що мають лише вихідні порти і забезпечують введення даних у блок-схему. Наприклад, блок випадкового джерела.
- Блоки вводу/виводу: отримують потоки даних, обробляють їх та повертають в блок-схему через вихідний порт, наприклад, блок дроселя.
- Блоки поглинача: мають лише вхідні порти для прийому даних. Прикладом є нульовий поглинач, що зберігає дані у файлі, та графічний аналізатор, який візуалізує дані.

2.6. Структура модулів та можливості GNU Radio для аналізу радіосигналів

Модулі GNU Radio мають такі підкаталоги: ``apps``, ``cmake``, ``docs``, ``lib``, ``swig``, ``python``, ``include`` і ``grc`` [9]. Кожен з цих підкаталогів містить інструменти ``autoconf``, ``libtool`` і ``automake``, що забезпечують можливість незалежної компіляції.

У додатку Б у таблиці Б.4 наведено опис структури модуля GNU Radio.

Вибір GNU Radio як платформи залежить від завдань, які хочемо виконати. Для даного випадку, де потрібно виявити БПЛА за характеристиками його радіосигналів, GNU Radio є ефективним інструментом. Ця програмна платформа дозволяє створювати радіосистеми без спеціального апаратного забезпечення і є вигідною за вартістю завдяки відкритому коду. Зокрема, пристрої на зразок USRP, HackRF є доступними та легко придбаними. Можливо, GNU Radio менш продуктивна порівняно з деякими іншими системами, але її ефективність значною мірою залежить від характеристик хост-комп'ютера, що ускладнює пряму порівняльну оцінку. Простота архітектури та наявність зручного графічного інтерфейсу роблять її легкою у використанні. До того ж, активна підтримка веб-спільноти забезпечує її функціональність і майбутню застосовність у різноманітних проектах.

2.7. HackRF One

На рисунку 2.3 зображено апаратне забезпечення HackRF One.



Рис. 2.3. – Апаратне забезпечення HackRF One

HackRF One від Great Scott Gadgets – це SDR-пристрій з 8-бітним АЦП, робочим діапазоном від 10 МГц до 6 ГГц і пропускну здатністю до 20 МГц. Максимальна частота дискретизації становить 20 мільйонів відліків на секунду, що дозволяє переглядати спектр у межах до 20 МГц у середовищі GNU Radio. Однак існують певні обмеження: діапазон 2,4-2,5 ГГц, що має ширину 100 МГц, не може бути повністю охоплений одночасно. Втім, пристрій може швидко сканувати вузькі канали. Для використання HackRF One у режимі передачі та прийому сигналів необхідно встановити відповідні драйвери в GRC.

2.8. Фактори, що впливають на ефективність методів виявлення сигналів

У науковій літературі представлено кілька різних методів до виявлення сигналів. Обраний метод виявлення має забезпечувати подолання численних перешкод, які можуть ускладнювати процес виявлення. Існуючі на сьогоднішній день методи часто залежать від цих факторів, що знижує їх ефективність.

До ключових факторів, що можуть впливати на процес виявлення, належать:

- Низьке SNR під час передач.
- Проблеми багатопроементовості та завмирання у бездротових КЗ.
- Змінний рівень шуму в КЗ.
- Потреба у мінімізації часу реакції.

2.9. Методи виявлення сигналів

Нижче описано деякі основні методи виявлення сигналів, з акцентом на їхні обмеження через негативні фактори.

2.9.1. Узгоджений фільтр

Оптимальним методом для виявлення сигналів при максимальному SNR є використання узгодженого фільтра. Головна перевага цього методу – невеликий час виконання, але для його застосування потрібно заздалегідь знати характеристики сигналу. Цей метод включає демодуляцію, що потребує синхронізації з джерелом сигналу, оцінки умов каналу і розуміння природи сигналу. Узгоджений фільтр здебільшого корисний для вузькоспеціалізованих Прм, як-от у телевізійному мовленні.

2.9.2. Виявлення енергії

На рисунку 2.4 зображено блок-схему, що демонструє процес виявлення енергії сигналів, які використовуються для ідентифікації БПЛА, де:

- Вхідний сигнал $y(x)$: це сигнал, отриманий від Прм.
- А/D перетворення: аналоговий сигнал перетворюється на цифровий для подальшої обробки.
- ШПФ: виконується спектральний аналіз сигналу для виявлення його частотних компонент.
- Квадратичний пристрій $|\cdot|^2$: обчислюється потужність сигналу.

- Середня сума за N : визначається середнє значення енергії за N відліків.
- Поріг: порівняння середнього значення енергії з пороговим значенням для прийняття рішення.
- Статистика тестування: аналізуються характеристики сигналу для оцінки його належності до БПЛА.
- Рішення щодо давачів: на основі результатів статистичного тестування приймається рішення про присутність сигналу БПЛА.

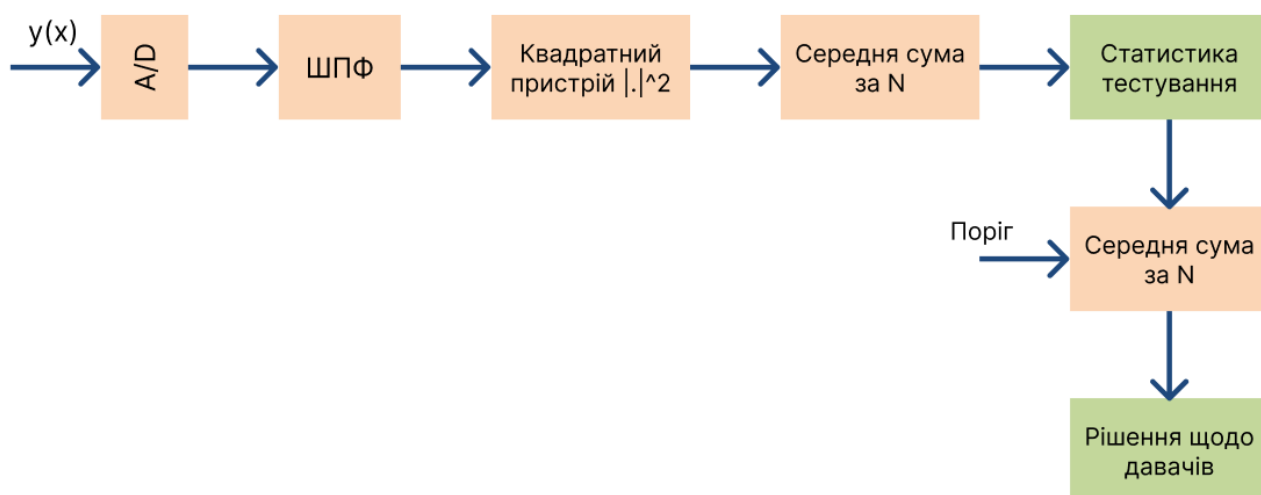


Рис. 2.4. – Схема принципу роботи системи виявлення енергії сигналів

Цей метод аналізу є найпростішим і найбільш поширеним для спектрального зондування, оскільки потребує низьких обчислювальних ресурсів. На відміну від узгодженого фільтра, аналіз виявлення енергії сигналу не вимагає попередньої інформації про сигнал. Він встановлює поріг на основі рівня шуму і порівнює його з енергією вхідного потоку. Цей метод потребує лише базових параметрів, таких як смуга пропускання і несуча частота сигналу. Цифрова реалізація базується на ШПФ, де абсолютні значення відліків підносяться до квадрату і інтегруються по спостережуваній смузі.

2.9.3. Виявлення статистичних властивостей

Більшість сигналів мають статистичні властивості, які періодично змінюються з часом, що називається циклостаціонарними характеристиками. Це

дозволяє досягти точнішого виявлення, використовуючи властиву сигналам періодичність АКФ. Модульовані сигнали мають специфічні характеристики СКФ, і, порівнюючи їх з базою даних типових властивостей, можна виявити сигнал. Обмеженням цього аналізу є висока обчислювальна складність і необхідність знання деяких параметрів сигналу, таких як несуча частота.

2.9.4. Виявлення власних значень

Основною характеристикою цього методу є співвідношення власних значень коваріаційної матриці отриманого сигналу. Виявлення за власними значеннями поділяється на два типи: метод максимально-мінімального власного значення, який порівнює співвідношення максимального і мінімального власних значень з порогом, і метод аналізу виявлення енергії сигналів з мінімальним власним значенням, який порівнює співвідношення середньої енергії і мінімального власного значення з порогом. Перший метод не потребує знання SNR, на відміну від другого, де SNR має бути відомий. Ідеально, метод максимально-мінімального співвідношення може подолати проблему шумової невизначеності і зберегти переваги методу аналізу виявлення енергії сигналів, дозволяючи виявляти сигнали з невідомим джерелом, каналом і рівнем шуму. Однак цей метод досить складний.

2.10. Порівняльний аналіз методів виявлення сигналів

У таблиці 2.1 наведено порівняння різних методів виявлення сигналів, що можуть застосовуватись для ідентифікації БПЛА [21]. Кожен із методів виявлення сигналів має свої переваги та недоліки:

- Час виконання – метод повинен функціонувати в реальному часі для мінімізації затримок.
- Стійкість до шуму – здатність методу ігнорувати білий шум.
- Виявлення піка сигналу – мінімальна кількість інформації, необхідної для виявлення.

- Кореляція сигналу – потужність, необхідна для виявлення сигналу.
- Стійкість до інтерференції – стійкість до різних перешкод, крім білого шуму.

Таблиця 2.1

Порівняння методів виявлення сигналів

Метод	Час виконання	Стійкість до шуму	Виявлення піка сигналу	Кореляція сигналу	Стійкість до інтерференції
Узгоджений фільтр	Добре	Середній	Високий	Низький	Високий
Виявлення енергії	Високий	Низький	Відсутній	Низький	Низький
Виявлення статистичних властивостей	Низький	Високий	Низький	Низький	Високий
Виявлення власних значень	Середній	Високий	Відсутній	Низький	Низький

У таблиці 2.1 оцінюються різні характеристики методів, такі як час виконання, стійкість до шуму, здатність до виявлення піка сигналу, кореляція сигналу та стійкість до інтерференції.

Узгоджений фільтр має найкращі показники у виявленні піка сигналу та стійкості до інтерференції, проте менш ефективний у кореляції. Виявлення енергії сигналу є швидким, але поступається у стійкості до шуму та інтерференції. Виявлення статистичних властивостей має високу стійкість до шуму та інтерференції, проте менш ефективне за часом виконання. Виявлення власних значень демонструє середні характеристики за часом виконання та стійкістю до шуму, але слабке виявлення піка сигналу.

2.11. Висновок до другого розділу

У другому розділі кваліфікаційної роботи детально розглянуто концепції, переваги та архітектуру SDR, а також обрано ефективний метод для виявлення сигналів. Аналіз показав, що SDR, завдяки своїй гнучкості, економічній доцільності та високій інтероперабельності, є перспективним рішенням для сучасних телекомунікаційних систем. Використання GRC як програмної платформи дозволяє розробляти радіосистеми без необхідності в спеціалізованому апаратному забезпеченні, що робить цю платформу оптимальним вибором для виконання поставлених завдань.

Розглянуто архітектурні особливості SDR, які складаються з РЧ-секції, секції ПЧ та базової смуги, де здійснюється ЦОС. Акцентовано увагу на можливостях GRC та HackRF One, які забезпечують ефективну реалізацію систем SDR і підтримують широкий спектр завдань.

Проаналізовано основні методи виявлення сигналів, такі як узгоджений фільтр, виявлення енергії сигналів, виявлення статистичних властивостей та метод виявлення власних значень. Проведено їх порівняльний аналіз за критеріями, включаючи час виконання, стійкість до шуму, виявлення піка сигналу, кореляцію сигналу та стійкість до інтерференції. Результати свідчать, що кожен метод має свої переваги й недоліки залежно від специфіки завдання. Обрано метод, який найкраще відповідає вимогам до виявлення сигналів у реальних умовах.

Отримані результати формують теоретичну та практичну основу для подальшого розроблення систем виявлення сигналів БПЛА, які використовують SDR як ключову технологію.

РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1. Виявлення сигналу БПЛА

Виявлення енергії сигналів БПЛА буде реалізовано та продемонстровано за допомогою SDR та GNU Radio. Для цього використовуватимуться два ПК з встановленим ПЗ GRC та два апаратні пристрої HackRF для передачі та прийому.

На рисунку 3.1 представлено потоковий граф виявлення енергії сигналів БПЛА, створений в середовищі GNU Radio.

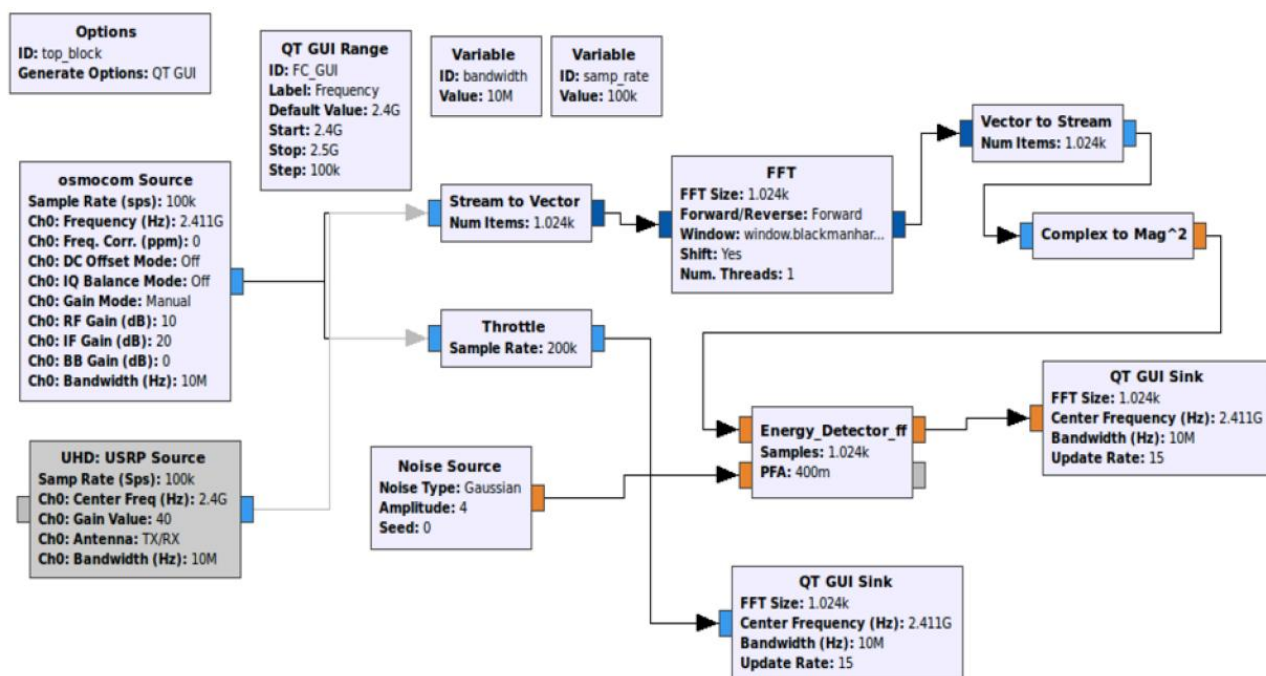


Рис. 3.1. – Потоковий граф виявлення енергії сигналів БПЛА у GNU Radio

Потоковий граф демонструє процес обробки сигналу та складається з наступних основних блоків:

1. Джерела сигналів (Sources):

– Osmocom Source: використовується для отримання сигналів на частоті 2.411 ГГц із заданими параметрами, такими як коефіцієнт підсилення та ширина смуги.

- UHD USRP Source: забезпечує прийом сигналу через SDR з центральною частотою 2.4 ГГц, підсиленням 40 дБ та шириною смуги 10 МГц.

- Noise Source: генерує шум Гаусса для імітації середовища з перешкодами.

2. Обробка сигналу:

- Throttle: контролює швидкість потоку даних, забезпечуючи відповідність частоті семплювання.

- Stream to Vector: формує вектор із потоку даних для подальшого спектрального аналізу.

- FFT (ШПФ): виконує спектральний аналіз сигналу, використовуючи вікно Блекмана.

- Complex to Mag²: обчислює енергетичну характеристику сигналу, піднісши його до квадрату.

3. Виявлення енергії:

- Energy Detector_ff: використовує вибірки сигналу для аналізу енергетичного рівня з порогом (PFA) 400 м.

4. Візуалізація (Sinks):

- QT GUI Sink: відображає оброблений сигнал на частоті 2.411 ГГц із шириною смуги 10 МГц.

- Додаткові GUI-блоки забезпечують візуалізацію різних етапів обробки сигналу.

Цей потоковий граф демонструє весь процес виявлення енергії сигналу, що використовується для ідентифікації БПЛА.

3.2. Опис потокового графу

На рисунку 2.4 зображено блок-схему Прм, де виконується виявлення енергії переданого сигналу. Джерелом сигналу є HackRF, де налаштовуються такі параметри, як швидкість вибірки, частота та ширина смуги пропускання. Отримані дані сигналу обробляються на ПК, на якому встановлено GNU Radio.

Блок Throttle використовується для контролю навантаження на процесор ПК. Прийнятий сигнал перетворюється у вектор із 1024 точок за допомогою блоку перетворення потоку у вектор (Stream to Vector). Водночас, для довідки, відображається графік QT GUI Sink, який включає відображення PSD, водоспаду, часової області та сузір'я. Після перетворення у 1024 точки йде блок FFT, який виконує ШПФ над потоком даних, а вихід надсилається в комплекс магнітуди квадрату. Також у цьому блоці виконується обробка вікна для мінімізації крайових ефектів та запобігання витоку спектра у спектрі ШПФ; для цього обрано вікно Блекмана-Харріса $(a + -jb \Rightarrow a^2 + b^2)^{[0.5]}$ за допомогою блоку комплекс магнітуди *Energy – detection – fft*^[0.5], у якому реалізовано алгоритм виявлення. Блок дозволяє користувачу вибрати кількість вибірок та ймовірність хибної тривоги для розрахунку. На основі вхідних даних блок обчислює середнє значення отриманого сигналу, його дисперсію та середнє квадратичне відхилення, що використовуються для розрахунку динамічного порогу виявлення. Обчислюються логарифмічні значення середнього сигналу та порогу. Середня енергія сигналу порівнюється з порогом для визначення наявності сигналу. Якщо енергія сигналу перевищує поріг, сигнал присутній, і енергія сигналу надсилається на вихід. Блок QT GUI Sink використовується для відображення потужності отриманих сигналів у частотній області для візуалізації. Формула 3.1 для усереднення в блоці виявлення наведена нижче [10]:

Загальна потужність у наборі з N вибірок:

$$Y = \sum_{n=1}^N \frac{1}{N} X(n)^2 \quad (3.1)$$

Щоб прийняти рішення про наявність або відсутність сигналу, потрібно визначити поріг застосувавши формулу 3.2:

$$T = \mu + Q^{-1}(pfa)\sigma, \quad (3.2)$$

де μ і σ – це середнє та стандартне відхилення середньозважених за часом точок ШПФ, $Q^{-1}()$ є оберненою Q -функцією, а Pfa – ймовірність того, що модуль виявлення обирає $H1$, коли правильним рішенням є $H0$.

Правило прийняття рішення визначається наступним чином:

Рішення про виявлення:

$Y > T \rightarrow H1$ (сигнал присутній) і $Y \leq T \rightarrow H0$ (сигнал відсутній).

3.3. OFDM

OFDM є основою для багатьох сучасних схем модуляції, таких як 802.11 WLAN, 802.16 WiMAX і 3GPP LTE. Це цифрова багатоканальна модуляційна схема, яка використовує кілька піднесучих в одному каналі. У цьому процесі використовується велика кількість близько розташованих ортогональних піднесучих, що передаються паралельно. Кожна з піднесучих може бути модульована за допомогою однієї зі звичайних цифрових схем модуляції (наприклад, QPSK, 16QAM) із низькою швидкістю символів, проте сукупність піднесучих забезпечує передачу даних на рівні, подібному до традиційних схем одночастотної модуляції в еквівалентній смузі пропускання.

Відмінність схеми OFDM від традиційного FDM полягає в наступному:

- Інформаційний потік передається кількома піднесучими.
- Піднесучі ортогональні одна одній.
- До кожного символу додається захисний інтервал, щоб зменшити розкид затримок каналу та міжсимвольні перешкоди.

На рисунку 3.2 наведені основні концепції сигналу OFDM та взаємозв'язок між частотною та часовою областями.

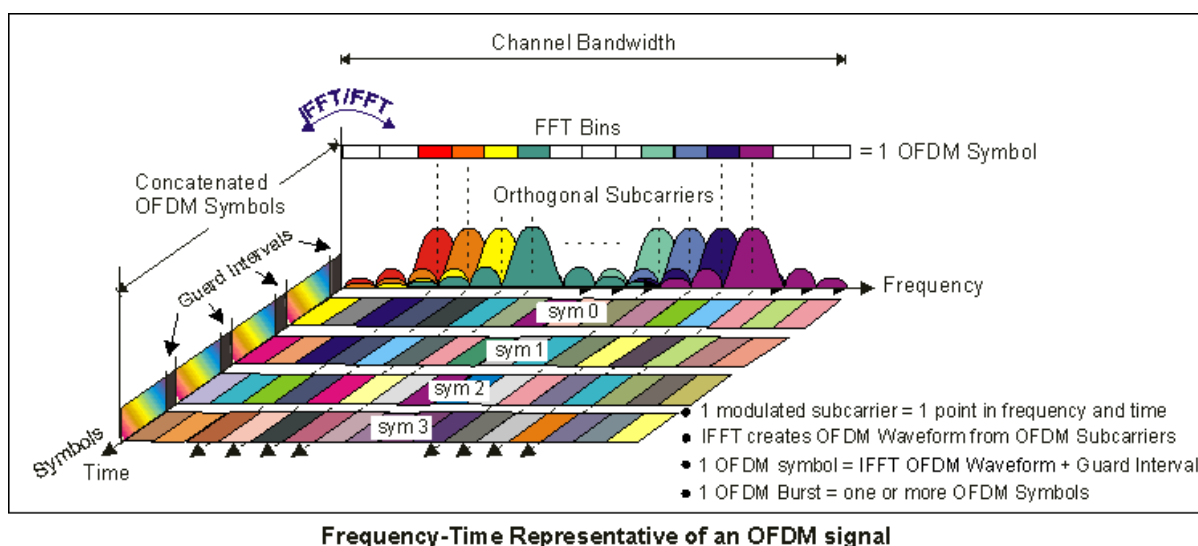


Рис. 3.2 – Представлення OFDM сигналу

У частотній області декілька сусідніх піднесучих незалежно модулюються складними даними. Далі над піднесучими в частотній області виконується зворотне перетворення ШПФ для отримання символу OFDM в часовій області. Після цього у часовій області між символами додаються захисні інтервали, щоб уникнути міжсимвольних перешкод на Прм, викликаних багатопроменевою затримкою в радіоканалі. Можливе об'єднання декількох символів для створення кінцевого OFDM-сигналу. На Прм виконується ШПФ над символами OFDM, що дозволяє відновити початкові біти даних.

3.3.1. Концепція ортогональності

У частотній області кожна піднесуча сигналу зазвичай формує синусоїдальний спектр із бічними пелюстками, що перекриваються з іншими піднесучими, спричиняючи інтерференцію. Проте в випадку ортогональних частот такі перекриття не заважають, оскільки піки одних піднесучих збігаються з нульовими точками інших. Це дозволяє системі точно відновлювати початковий сигнал. Прм на кінцевому етапі корелює вхідний сигнал із відомим набором синусоїд, відтворюючи початкові біти. Завдяки ортогональним піднесучим OFDM-системи ефективно використовують смугу пропускання, збільшуючи спектральну ефективність. В ідеальних умовах ортогональність

запобігає взаємній інтерференції піднесучих; однак частотний зсув може порушити вирівнювання спектральних нулів, що викликає інтерференцію.

На рисунку 3.3 зображено розподіл частотного спектра OFDM-сигналу.

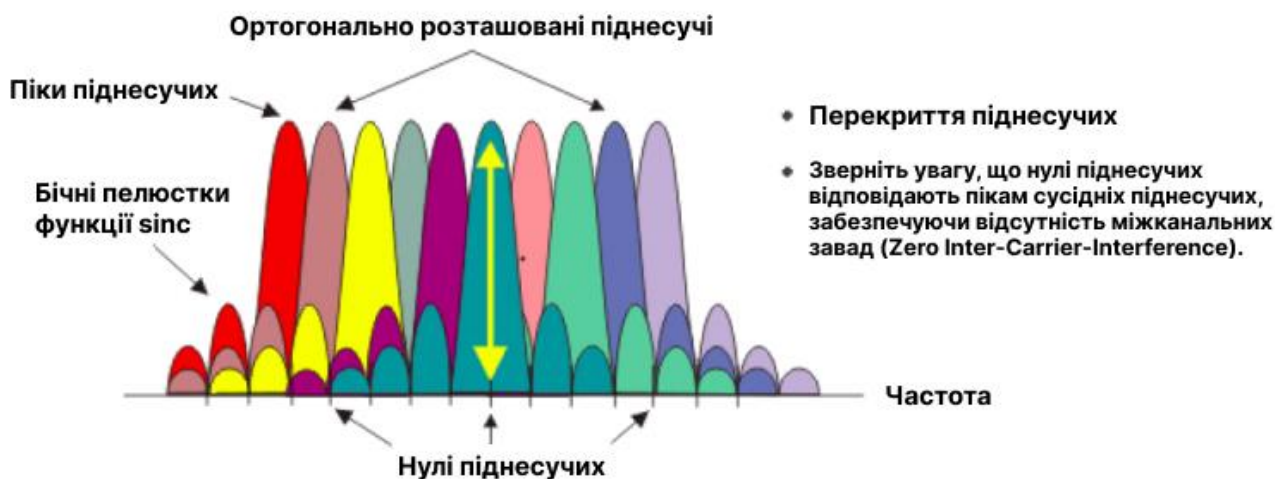


Рис. 3.3. – Частотні спектри OFDM-сигналу

Діаграма ілюструє ключові особливості структури сигналу:

- Ортогонально розташовані піднесучі. Піднесучі сигнали розташовані з перекриттям, проте завдяки їх ортогональності забезпечується відсутність міжканальних завад.
- Піки піднесучих. Кожна піднесуча має свою максимальну амплітуду, яка є піком частотного спектра.
- Бічні пелюстки функції sinc. Кожна піднесуча супроводжується бічними пелюстками, що виникають внаслідок форми функції sinc.
- Нулі піднесучих. Нулі однієї піднесучої співпадають із піками сусідніх піднесучих, що мінімізує взаємні завади.
- Перекриття піднесучих. Частотні компоненти піднесучих перекриваються для ефективного використання спектра.

Рисунок 3.3 демонструє, як забезпечується ефективне використання спектра та відсутність міжканальних завад завдяки ортогональності піднесучих в OFDM-сигналі.

3.3.2. Ключові параметри та класифікація модуляції OFDM

Класифікація OFDM-сигналів базується на аналізі таких параметрів, як центральна частота, тривалість символу OFDM, довжина CP і кількість піднесучих [2]. Підхід класифікації на основі циклостационарних ознак [3] включає циклостационарні ознаки преамбули кадру та пілотних піднесучих. У роботі [4] автори стандарту IEEE 802.11 зазначають ключові параметри фізичного рівня для класифікації: кількість несучих, тривалість символу, смугу пропускання і швидкість передачі даних.

Серед параметрів OFDM, важливих для класифікації (MIMO OFDM) [15]: несуча частота, загальна смуга пропускання, кількість піднесучих, відстань між піднесучими, довжина CP, період дискретизації та тривалість кадру OFDM (включно з CP). Додаткові параметри для класифікації [16]: швидкість передачі даних 390 Мбіт/с, тривалість вихідного символу $TD = 15,385$ нс, передавальна тривалість символу $TS = 12,5$ нс, загальна тривалість символу OFDM $TS = 3,60$ мс, захисний інтервал $TG = 0,4$ мс, інтервал піднесучих $FS = 0,3125$ МГц, ширина смуги Найквіста $BN = 76,5625$ МГц.

OFDM-спектр має виразні характеристики, що можуть бути корисними для оцінки таких параметрів, як кількість піднесучих та довжина CP [17]. Ці параметри сигналу OFDM використовують для автоматичної ідентифікації та класифікації різних типів OFDM-сигналів, що є важливим для когнітивних радіосистем, гетерогенних мереж та сигнал-розвідки. Для подальшої обробки виокремлюються важливі параметри, такі як кількість піднесучих, тривалість OFDM-символу і CP [18]. Тест на циклостационарність застосовується для визначення тривалості символу T_s . Амплітудно-частотна характеристика OFDM-сигналу демонструє піки при $\alpha = c/T$ та $\tau = Tu$, де $Tu = T - Tg$ – це час даних, нормований на період дискретизації T_s [19]. Ці піки зумовлені вбудованою періодичністю OFDM-сигналів завдяки синусоїдальним несучим, CP та пілотним патернам. В АБГШ-сигналі, що не є циклостационарним, CAF не

показує жодних піків для $\alpha \neq 0$. АБГШ має піки лише для $\alpha = 0$ та $\tau = 0$, що дозволяє розрізнити присутність або відсутність сигналів.

3.3.3. Приклад деяких ключових параметрів OFDM

У літературі описані різні параметри, які дослідники використовують як ознаки для класифікації OFDM-сигналів і не-OFDM сигналів. У додатку Б у таблиці Б.5 наведено приклади основних таких параметрів.

У даному експерименті використано чотири параметри. Блок GR-Inspector для оцінки OFDM-параметрів був включений до розробленого блоку виявлення енергії сигналів, і їхні результати об'єднані в єдиний блок оцінки сигналів. Нижче наведено короткий опис параметрів:

- Визначення довжини СР: Корисна довжина символу (T_u) – це величина, обернена до інтервалу між піднесучими. Довжина СР визначається як $T_g = G * T_u$, де G – це співвідношення T_g/T_u . Загальна довжина символу OFDM дорівнює $T_{OFDM} = T_g + T_u$ [20].
- Кількість піднесучих: включає контрольні та піднесучі дані.
- Розмір ШПФ: може змінюватися на значення 64, 128, 256, 512 тощо.
- Тривалість OFDM-символу: обернена величина до інтервалу між піднесучими.
- Відстань між піднесучими: $sprc = 1/T_s$, де T_s – це час символу.

3.3.4. Реалізація оцінювання параметрів OFDM

У блоці оцінювання параметрів OFDM у GNU Radio використано кілька алгоритмів для оцінки параметрів OFDM. Нижче наведено основні кроки, виконані для реалізації цих алгоритмів:

Алгоритм оцінки параметрів OFDM складається з наступних кроків:

1. Обчислення АКФ для вхідного вектора, щоб оцінити довжину піднесучих (ШПФ) за допомогою дискретної АКФ.
2. Обчислення АКФ (циклічної АКФ), яка є коефіцієнтом у розкладі автокореляції циклостаціонарного випадкового процесу у ряд Фур'є.

Проводиться обчислення часової змінної циклічної АКФ для визначення довжини СР.

3. Визначення інтервалу між піднесучими: $spacing = subspc = (samplerate/FFTlength)$ та $symboltime = symtime = (1/subspc)$.

3.3.5. Реалізація оцінювача параметрів OFDM у GNU Radio

Для експерименту обрано один із доступних блоків із модуля Gr-inspector, розробленого в межах програми Google Summer of Code (GSoC) 2016. У модулі Gr-inspector створено блок для оцінки параметрів у GRC, спеціально розроблений для виконання аналізу сигналів у стандартній блоковій структурі.

На рисунку 3.4 зображено структуру процесу оцінювання параметрів OFDM. Блок-схема демонструє послідовність етапів, які виконуються для аналізу вхідного сигналу:

- Прм: приймає вхідний сигнал та подає його на подальшу обробку.
- Дискретна автокореляція: виконує обчислення автокореляції вхідного сигналу для визначення періодичності та інших характеристик.
- Циклічна АКФ: обчислює циклічну автокореляцію для визначення довжини СР.
- Відстань між піднесучими: виконується оцінювання відстані між піднесучими сигналами, враховуючи довжину ШПФ.
- Час символу: визначається тривалість символу на основі отриманих параметрів.

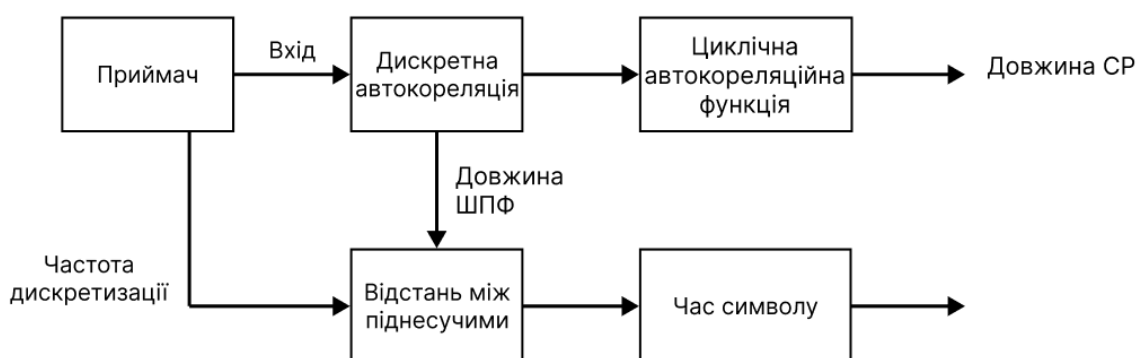


Рис. 3.4. – Процес оцінювання параметрів OFDM

Модуль Gr-inspector має такі функції:

- Виявлення енергії неперервних сигналів.
- Фільтрація виявлених сигналів.
- Оцінка параметрів OFDM (інтервал між несучими, тривалість символу).
- Сліпа синхронізація OFDM.
- Передискретизація сигналів до постійної частоти.
- 3D-візуалізація даних FAM із використанням gr-specest.
- Застосування моделей TensorFlow для АМС.

Для завдання найбільший інтерес становить блок оцінки параметрів OFDM, що виконує оцінку чотирьох параметрів OFDM та надає їх у вигляді блоку повідомлень (інтервал між несучими, тривалість символу, розмір ШПФ, час символу). Об'єднуємо цей блок із блоком виявленням енергії сигналу, щоб отримати параметри виявлення та оцінювання в одному блоці.

3.4. Класифікація за допомогою ML

ML – це напрямок у штучному інтелекті, який фокусується на створенні алгоритмів, що дозволяють машинам покращувати свої дії на основі емпіричних даних. Основна ідея полягає в тому, що машини можуть вчитися і прогнозувати, не потребуючи жорсткого програмування. Оскільки інтелект потребує знань, машини повинні вміти отримувати ці знання.

На рисунку 3.5 зображено блок оцінювача параметрів OFDM (ofdm_param_estimator) у середовищі GNU Radio.

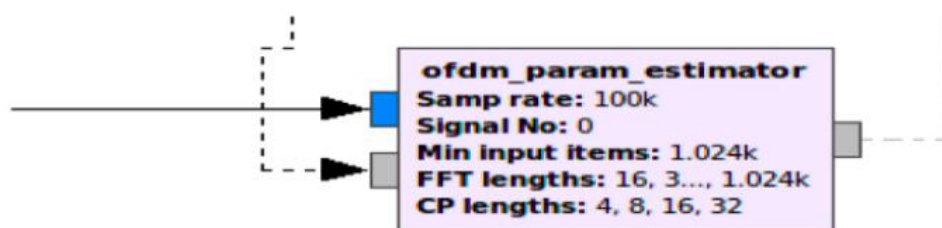


Рис. 3.5. – Блок оцінювача параметрів OFDM у GNU Radio

Цей блок використовується для оцінювання ключових параметрів модуляції OFDM. Основні параметри блоку:

- Samp rate (Частота дискретизації): встановлено на 100k, що визначає швидкість семплювання вхідного сигналу.
- Signal No (Номер сигналу): номер сигналу для обробки, встановлений на 0.
- Min input items (Мінімальна кількість вхідних елементів): вказано 1.024k, що визначає мінімальну кількість даних для обробки.
- FFT lengths (Довжина ШПФ): містить можливі значення довжини ШПФ: 16, 32, ..., 1.024k.
- CP lengths (Довжина CP): Набір довжин CP: 4, 8, 16, 32.

Цей блок є ключовим елементом у процесі оцінювання параметрів OFDM і дозволяє автоматично визначати довжини ШПФ, CP та інші характеристики сигналу.

У дане дослідження інтегровано блок ML, розроблено спеціальний блок тестування ML у GNU Radio.

На рисунку 3.6 наведено структуру модуля ML.

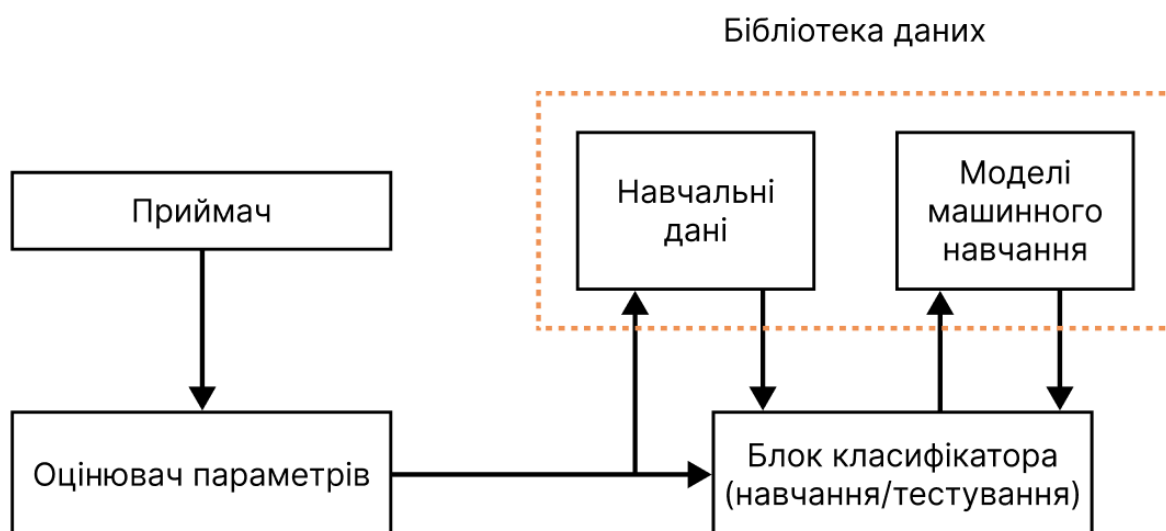


Рис. 3.6. – Структура модуля ML

Спочатку оцінені параметри використовуються для формування навчальних даних, які зберігаються в бібліотеці даних для подальшого аналізу. Під час навчання класифікатор будує моделі на основі обраного алгоритму класифікації. Далі відбувається тестування нового сигналу з використанням моделі, вибраної з бібліотеки даних. Нижче описано класифікатори ML.

3.4.1. Класифікатор ML

Загалом, алгоритми ML поділяються на різні категорії, залежно від кінцевої мети. Ось основні типи алгоритмів:

- Некероване навчання: алгоритм створює модель на основі вхідних даних без маркування.
- Кероване навчання: будується модель, що пов'язує вхідні дані з певним виходом. Даний експеримент базується на цьому типі.
- Напівконтрольоване навчання: комбінує елементи керованого та некерованого підходів.
- Навчання з підкріпленням: алгоритм адаптується, приймаючи рішення на основі спостережень.
- Навчання на основі попереднього досвіду: алгоритм вдосконалюється з огляду на накопичений досвід.

Нижче подано стислий огляд класифікаторів.

Дерево рішень. Схоже на блок-схему, де кожен внутрішній вузол представляє тест атрибуту, гілки – результат тесту, а листові вузли – класи. Містить три типи вузлів: вузли рішень (квадрати), вузли шансів (кола) та кінцеві вузли (трикутники).

Машина опорних векторів. Класифікує дані, визначаючи гіперплощину, яка відокремлює різні класи, з використанням навчальних даних для побудови моделі [26].

Класифікатор випадкових лісів. Складається з декількох дерев рішень, кожне з яких будується на випадкових підмножинах даних. Результат визначається голосуванням окремих дерев [13, 255].

Класифікатор Нейва-Бейса. Працює на основі моделі ймовірностей, наприклад, мультиноменальної моделі, яка показує частоти подій для класифікації.

KNN. Прогнозує мітку нового екземпляра, враховуючи мітки k -найближчих сусідів у навчальній множині. Вибір значення k визначає кількість сусідів, що враховуються.

Логістична регресія. Використовує логістичну функцію, яка переводить значення на інтервал від 0 до 1, інтерпретуючи це як ймовірність для прийняття рішення.

3.4.2. ML у GNU Radio

На даний момент у GNU Radio відсутні готові блоки для реалізації класифікації за допомогою ML. Однак, оскільки Python добре підходить для впровадження алгоритмів ML, а GNU Radio підтримує програмування на Python, створено власний блок OOT у GNU Radio. Цей блок використовується для тестування вхідного сигналу, який надходить до модуля класифікації, в режимі реального часу. Навчання в рамках експерименту наразі здійснюється поза межами GNU Radio, хоча тестування проводиться безпосередньо на цій платформі.

На рисунку 3.7 представлено користувацький блок тестування ML в середовищі GNU Radio.

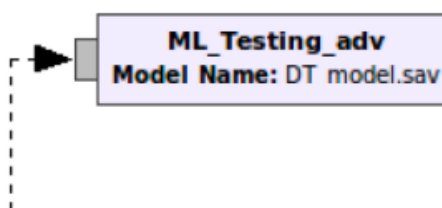


Рис. 3.7. – Користувацький блок для тестування ML в GNU Radio

Цей блок, позначений як `ML_Testing_adv`, призначений для використання заздалегідь навченої моделі ML для класифікації або тестування даних. У даному

випадку зазначена модель ML, яка використовується для тестування – це файл моделі під назвою DT model.sav, що представляє модель дерева рішень.

Даний блок є інтеграцією алгоритмів ML у GNU Radio, забезпечуючи можливість застосування попередньо навчених моделей до вхідних сигналів для аналізу, класифікації або виявлення.

3.4.3. Інструменти, використані для ML

Для виконання навчання і тестування в задачах ML використовуються певні додаткові бібліотеки, важливі для реалізації поставлених завдань. Усі вони є безкоштовними і відкритими, що обумовлює їх вибір. Нижче наведено список деяких інструментів і короткий опис кожного з них:

1. Python 3.13.
2. NumPy 2.1.3.
3. Matplotlib 3.9.3.
4. Pandas 2.2.3.
5. SciPy 1.14.1 та Scikit-learn 1.5.2.

Python – високорівнева мова програмування загального призначення, широко використовувана в програмуванні, веб-розробці, аналізі даних, ML тощо [2]. Обрано Python для проєкту завдяки її гнучкості, простоті використання, доступній документації і великій спільноті підтримки онлайн.

NumPy – потужний пакет для наукових обчислень [23], який забезпечує виконання операцій з N-вимірними масивами, алгебраїчні обчислення та перетворення Фур'є, корисні, наприклад, для обробки сигналів. NumPy також широко використовується для обробки зображень і аналізу даних, і є базою для багатьох інших бібліотек.

Pandas – ПЗ з відкритим кодом для аналізу даних, написане для Python і ліцензоване за BSD [24]. Воно дозволяє виконувати операції з фреймами даних, зчитувати файли csv та excel, а також проводити операції з часовими рядами, що особливо важливо для виконання цього проєкту.

SciPy – набір математичних функцій, побудований на базі NumPy, тоді як Scikit-learn – це популярна бібліотека для ML, яка забезпечує всі необхідні інструменти для класифікації, кластеризації, регресії, зменшення розмірності та попередньої обробки даних [25]. Обрано Scikit-learn через його інтеграцію з Python та NumPy, а також через його зручність у використанні.

3.5. Опис використаних параметрів

Для реалізації РЧ-виявлення у GNU Radio всі блоки були об'єднані в єдиний сегмент даних, який використовується для виявлення та класифікації сигналів БПЛА. Нижче подано стислий опис параметрів, задіяних у проведеному експерименті.

3.5.1. Параметри виявлення енергії сигналів БПЛА

У блоці виявлення виділено два ключові параметри:

1. Потужність сигналу: Середнє значення амплітуди вхідного сигналу після його перетворення у частотну область за допомогою блоку ШПФ. Це значення є важливим для визначення активності у спостережуваному спектрі, а також вказує на відстань до БПЛА. Наприклад, якщо під час експерименту потужність сигналу становить $8 \text{ дБ} \pm 4 \text{ дБ}$, а в іншому випадку $-2 \text{ дБ} \pm 4 \text{ дБ}$, це свідчить, що БПЛА знаходиться на різній відстані у кожному з тестів.

2. Поріг/рішення: Поріг використовується для визначення присутності сигналу. Якщо сигнал перевищує поріг, він вважається наявним (рішення 1); якщо менший – відсутнім (рішення 0). Коли БПЛА активний і передає сигнал, очікується рішення 1, оскільки середній сигнал перевищує порогове значення, що свідчить про активність у спектрі. Якщо рішення дорівнює 0, це означає, що БПЛА не передає сигнал у межах визначеного порогу або знаходиться на більшій відстані.

3.5.2. Оцінювач параметрів OFDM

У блоці оцінки параметрів було виділено чотири ключові параметри OFDM, що використовуються як характеристики:

1. Довжина CP. Як зазначалося раніше, CP – це циклічне розширення в сигналі OFDM, яке допомагає усувати міжнесучі і міжсимвольні завади. Зазвичай система OFDM має фіксовану та значну довжину CP для забезпечення стабільної роботи в умовах несприятливого каналу. Передбачається, що зв'язок БПЛА оптимізований для ефективної роботи, тому оцінка довжини CP є необхідною.

2. Розмір ШПФ. ШПФ є алгоритмом для перетворення сигналу з часової області в частотну, тому широко використовується в ЦОС. Перетворення реалізується з розмірами бінів 64, 128, 256, 1024, і розмір ШПФ буде наданий як один з параметрів.

3. Тривалість OFDM-символу. OFDM-символ включає період ШПФ і CP. Час символу є зворотним значенням до піднесучої та відповідає тривалості кожного символу.

4. Відстань між піднесучими. Система OFDM ділить смугу на піднесучі для передачі даних паралельними потоками. Відстань між піднесучими дорівнює $1/T_s$, де T_s – це тривалість символу.

3.6. Налаштування та тестування

У цьому розділі розглянуто модуль виявлення та класифікації сигналів БПЛА на основі використання ПЗ GRC. Для експерименту розроблено спеціальний блок тестування ML, блок виявлення енергії сигналів та блок оцінки параметрів, що використовуються для виявлення та класифікації сигналів БПЛА за допомогою ПЗ GRC та обладнання HackRF One. Зібрані дані радіосигналів будуть проаналізовані після реалізації та підключення всіх блоків. Щоб успішно провести експеримент та зібрати дані з модуля виявлення, потрібно знати та налаштувати точну частоту передавання БПЛА, що дозволяє відслідковувати спектр, збирати навчальні дані і далі тестувати класифікацію в спеціальному

блоці ML. Дані були зібрані для різних випадків, які стануть базою для класифікації: перший – коли ввімкнений БПЛА Phantom, який є єдиним джерелом передавання сигналу; другий – коли ввімкнений БПЛА Mavic і також єдиний, що передає сигнал. В налаштуваннях режим передавання DJI Phantom та Mavic змінено з “Авто” на “Користувацький”, що дозволяє вибрати конкретну частоту передачі сигналу. Це значно спрощує моніторинг частотного спектра у GRC під час тестів. Щоб зібрати дані з блоку виявлення, потрібна можливість передавати на визначеній частоті, відслідковувати та збирати навчальні дані і потім перевіряти класифікацію у спеціальному блоці тестування ML. У даному експерименті БПЛА передає сигнал на 13-му каналі, а приймальний модуль GNU Radio налаштований на частоту 2,411 ГГц для виявлення активності на цьому каналі. У таблиці 3.1 наведено апаратне та ПЗ, яке використовувалось для експерименту.

Таблиця 3.1

Апаратне та ПЗ для експерименту

№	Апаратне забезпечення	ПЗ
1	DJI Phantom 4	GRC
2	DJI Mavic	
3	HackRF One	
4	Ноутбук ASUS	

3.7. Принцип роботи

Дані для двох БПЛА збиралися протягом 10 хвилин у різних умовах для створення різноманітних випадків для кожного БПЛА. Ці зібрані дані були використані для навчання моделі ML з метою побудови класу БПЛА.

Тестовий блок ML використовує дані, оброблені моделлю опорних векторів, щоб робити прогнози. Характеристики, що використовуються для класифікації, включають потужність сигналу, поріг/рішення для виявлення

енергії сигналів і параметри OFDM (відстань між піднесучими, тривалість символу, довжина ШПФ, довжина СР).

Використовуючи різні моделі ML для навчання характеристик, очікується, що модель прийняття рішень визначатиме БПЛА Mavic, коли сигнал передається від Mavic, і Phantom, коли сигнал надходить від БПЛА Phantom в реальному часі.

На рисунку 3.8 зображено потоковий граф в GNU Radio, призначений для виявлення та класифікації сигналів БПЛА.

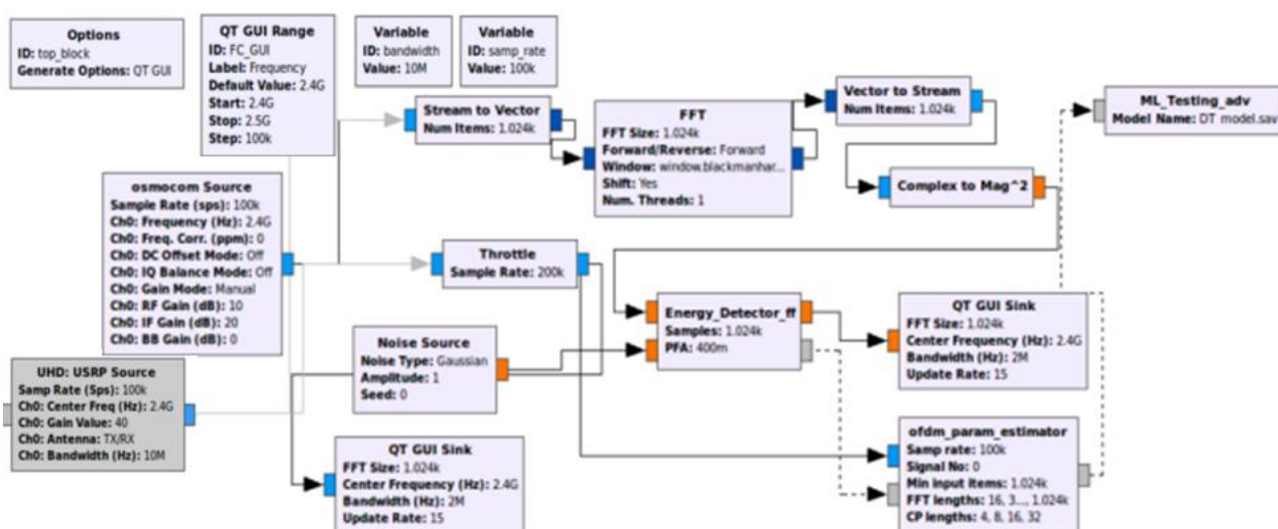


Рис. 3.8. – Потоковий граф для виявлення та класифікації сигналів БПЛА

Потоковий граф демонструє використання різних блоків, таких як джерела сигналу, блоки перетворення та обробки сигналів, блок виявлення енергії сигналу, оцінювач параметрів OFDM, блок тестування моделей ML для класифікації, тощо.

3.8. Навчання та тестування даних ML

У даному експерименті використовується метод керованої класифікації ML для навчання моделей, призначених для виявлення і класифікації сигналів БПЛА. Дані для класифікації будуть відповідно позначені. Навчальні дані

включають параметри, необхідні для класифікації, а для кожного об'єкта зібрано однакову кількість вибірок.

На рисунку 3.9 наведено вибірку зібраних навчальних даних.

Відстань між піднесучими	Час символу	Довжина ШПФ	Довжина СР	Потужність сигналу	Виявлення	Клас
97,65625	0,01024	1024	32	463,655823	1	Mavic
390,625	0,00256	256	32	466,324219	1	Mavic
97,65625	0,01024	1024	32	462,016113	1	Mavic
195,3125	0,00512	512	32	470,765259	1	Mavic
97,65625	0,01024	1024	32	470,765259	1	Mavic
1562,5	0,00064	64	32	452,020081	1	Phantom
195,3125	0,00512	512	32	452,105621	1	Phantom
1562,5	0,00064	64	16	450,157654	1	Phantom
390,625	0,00256	256	16	450,232574	1	Phantom
390,625	0,00256	256	32	265,731476	1	Phantom

Рис. 3.9. – Вибірка зібраних даних для навчання

Для першого тесту зібрано 200 вибірок увімкненого БПЛА Phantom та 200 вибірок з увімкненим Mavic, які були позначені для класифікації. Загальна кількість навчальних вибірок – 400. Починали з менших навчальних вибірок і поступово збільшували їх кількість.

Для другого тесту використано 3000 вибірок: 1500 для БПЛА Mavic та 1500 для БПЛА Phantom.

3.8.1. Тестування та результати

На основі зібраних навчальних і тестових даних наведено метрику ефективності класифікації в Python після розподілу даних на навчальні і тестові для перевірки.

Рисунок 3.10 демонструє діаграму з метрикою ефективності, згенерованою в Python за допомогою класифікатора KNN.

Обрано KNN після аналізу точності інших класифікаторів, таких як дерево рішень, лінійна регресія та машина опорних векторів.

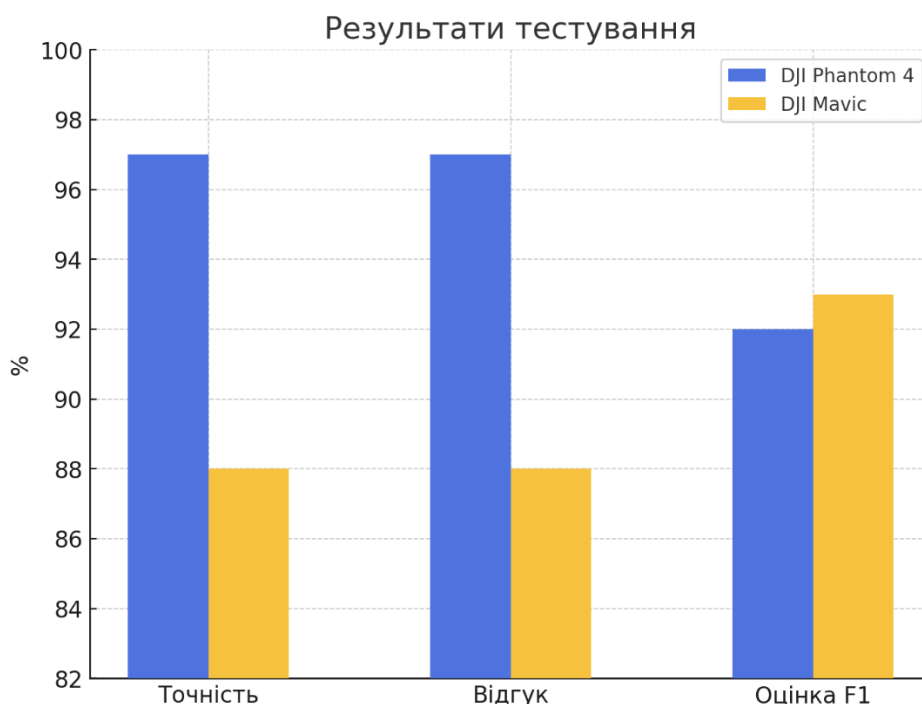


Рис. 3.10. – Діаграма ефективності класифікації сигналів БПЛА

Згідно з діаграмою наведеною на рисунку 3.10:

1. Точність:

- DJI Phantom 4 має вищу точність (97%), що свідчить про те, що модель краще справляється із загальною класифікацією.
- DJI Mavic має нижчу точність (88%), що свідчить про більшу кількість помилкових класифікацій.

2. Відгук:

- DJI Phantom 4 демонструє кращий відгук (97%), що означає більшу здатність коректно виявляти всі сигнали відповідного класу.
- DJI Mavic має нижчий відгук (88%), що вказує на втрату певних істинних позитивів.

3. Оцінка F1:

- DJI Mavic має перевагу у F1-Score (93%), що свідчить про кращий баланс між точністю і відгуком у порівнянні з DJI Phantom 4 (92%).
- Це може означати, що DJI Mavic ефективніше працює в умовах, де важливі як мінімізація хибних спрацьовувань, так і хибних пропусків.

Отже, можна підсумувати, що DJI Phantom 4 демонструє перевагу у точності та відгуку, але DJI Mavic досягає кращого балансу між цими показниками завдяки вищій F1-Score. Вибір між ними залежить від того, що є важливішим у завданні: загальна точність чи баланс між точністю та відгуком.

3.8.2. Очікувані результати тестування в реальному часі

Після створення навчальної моделі і тестового файлу необхідно перевірити її точність у реальному часі. У разі відсутності сигналу БПЛА очікуємо, що результат моделі буде Mavic, як це подано на рисунку 3.11.

```
Прогнозований клас - 'Mavic']
Прогнозований клас - 'Mavic']
```

Рис. 3.11. – Вихідні дані прогнозу для БПЛА Mavic

Коли присутній сигнал БПЛА, очікуваний результат буде Phantom, як це наведено на рисунку 3.12.

```
Прогнозований клас - 'Phantom']
Прогнозований клас - 'Phantom']
Прогнозований клас - 'Phantom']
Прогнозований клас - 'Phantom']
```

Рис. 3.12. – Вихідні дані прогнозу для БПЛА Phantom

Позначення класів було налаштовано так, щоб позначати “Phantom”, коли виявлено відповідний сигнал БПЛА, і “Mavic” для сигналу БПЛА Mavic. Це дозволяє чітко інтерпретувати результати тестування спостерігачам.

3.8.3. Тестування в реальному часі

Здійснивши виявлення та класифікацію сигналів БПЛА у режимі реального часу за допомогою GNU Radio було спостережено за роботою РЧ-модуля класифікації. На рисунку 3.13 представлено результати передбачення класу сигналу для двох БПЛА.

Таблиця 3.3

Метрики тестування ML: оцінка продуктивності

Метрики	Значення
Відгук	0.740294914
Точність для негативного класу	0.863157895
Частота істинно позитивних результатів	0.740294914
Частота хибно позитивних результатів	0.152462862

3.9. Тестування SNR для виявлення БПЛА

Для оцінки здатності виявлення РЧ-модуля проведено тест із варіюванням відстані, щоб визначити, на якій відстані БПЛА стає невидимим для РЧ-модуля виявлення навіть при передачі сигналу. Змінюючи відстань між БПЛА і РЧ-модулем, зібрано дані для подальшого аналізу.

На рисунку 3.14 зображено налаштування БПЛА для проведення тестування SNR з метою аналізу виявлення БПЛА.



Рис. 3.14. – Налаштування БПЛА для проведення тестування SNR

Тестування проводиться на відкритій місцевості, що дозволяє забезпечити оптимальні умови для вимірювання SNR.

3.9.1. Результати тестування SNR для виявлення БПЛА

У таблиці 3.4 подано результати залежності рівня виявлення БПЛА від відстані.

Таблиця 3.4

Результати аналізу рівня виявлення БПЛА залежно від відстані

Відстань	Рівень виявлення	Кількість негативних прогнозів	Кількість позитивних прогнозів
Менше 5 м	0,9818	91	4909
5 м	0,888	560	4440
10 м	0,8462	769	4231
20 м	0,8134	933	4067
50 м	0,7162	1419	581
Більше 50 м	0,5604	2198	2802

Результати тесту SNR показують, що ймовірність рівня виявлення БПЛА знижується зі збільшенням відстані між БПЛА і РЧ-модулем. На відстані 60-100 метрів сигнал суттєво слабшає, що ускладнює виявлення БПЛА. На основі отриманих даних можна зробити висновок, що ефективне виявлення БПЛА можливе лише при високих значеннях SNR. При низькому SNR ефективність виявлення БПЛА суттєво знижується.

На рисунку 3.15 зображено діаграму рівня виявлення БПЛА залежно від відстані, що демонструє співвідношення позитивних та негативних прогнозів разом із рівнем виявлення (%) для різних відстаней.

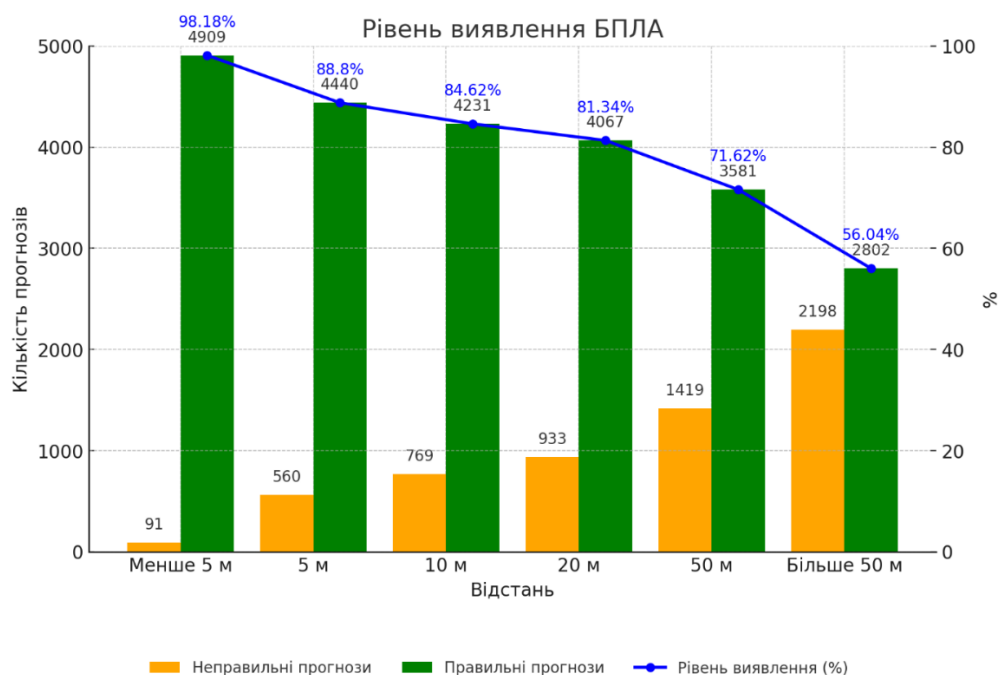


Рис. 3.15. – Діаграма рівня виявлення БПЛА

На рисунку 3.16 наведено графік середнього значення отриманої енергії сигналів БПЛА в дБ залежно від відстані для двох різних БПЛА – Phantom та Mavic, що дозволяє порівняти їхні енергетичні характеристики.

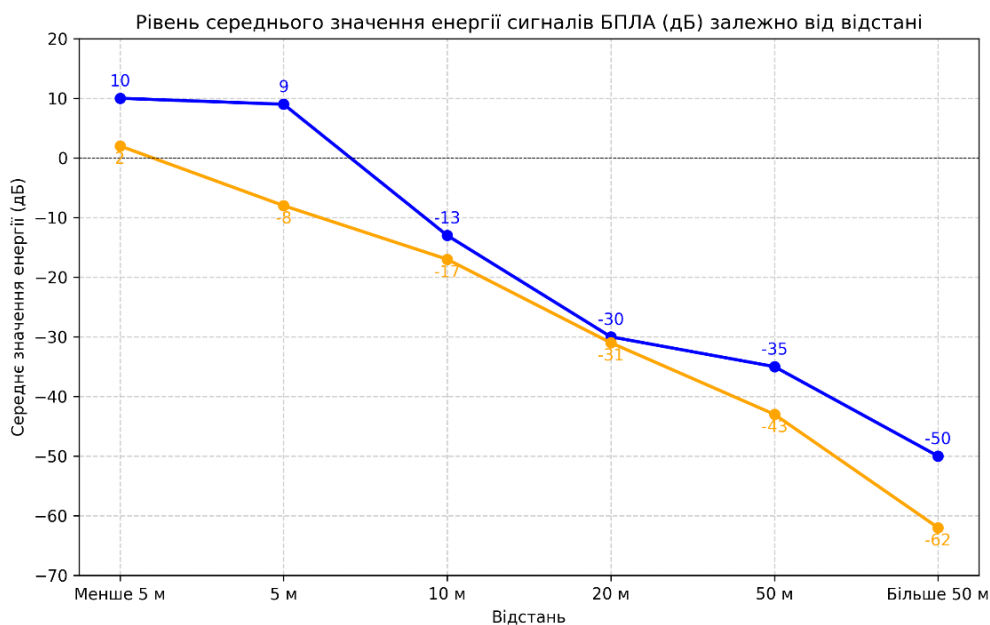


Рис. 3.16. – Графік середнього значення отриманої енергії сигналів БПЛА

На рисунку 3.17 зображено результати виявлення енергії сигналу БПЛА. На підрисунку (а) показано спектр сигналу при вимкненому БПЛА, де переважає рівень шуму. На підрисунку (б) показано спектр сигналу при ввімкненому БПЛА, де спостерігається підвищення енергетичного рівня через наявність сигналу БПЛА.

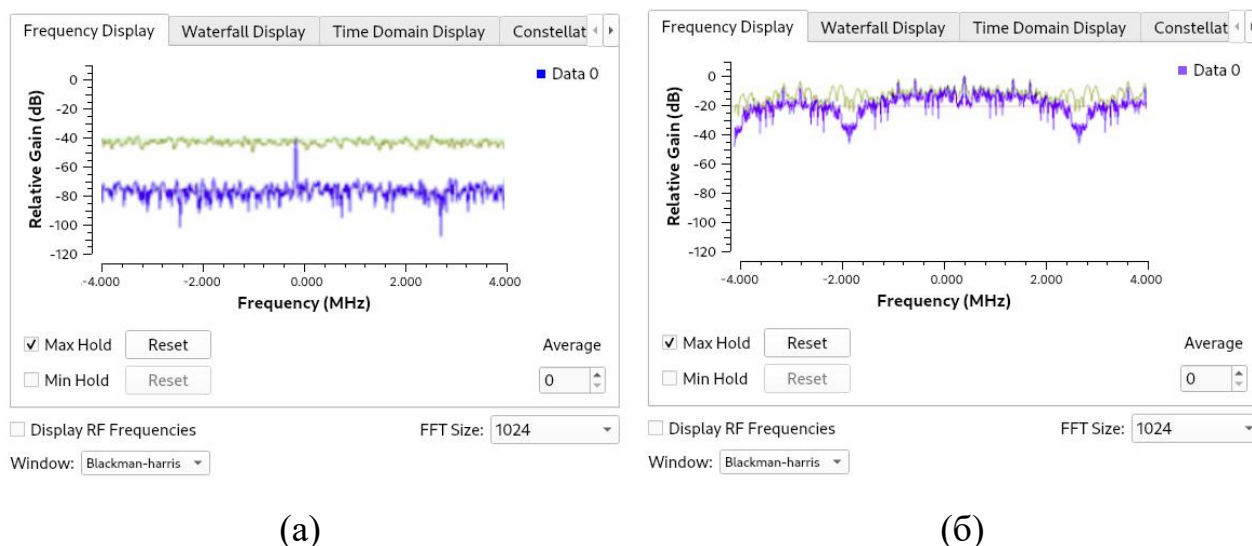


Рис. 3.17. – Результат виявлення енергії сигналу БПЛА:
(а) – при вимкненому БПЛА, (б) – при ввімкненому БПЛА

На рисунку 3.18 представлено гістограми розподілу параметрів, які характеризують роботу системи. Зокрема, показано такі параметри:

- Detection: відображає частоту правильного виявлення сигналу.
- Signal-Power: розподіл потужності сигналу.
- cp-length: розподіл довжини CP.
- fft-length: розподіл розмірів FFT.
- subcarrier-spacing: розподіл міжчастотного інтервалу.
- symbol-time: розподіл тривалості символу.

Кожна гістограма демонструє характерні значення для відповідного параметра, що дає змогу аналізувати їх вплив на роботу системи.

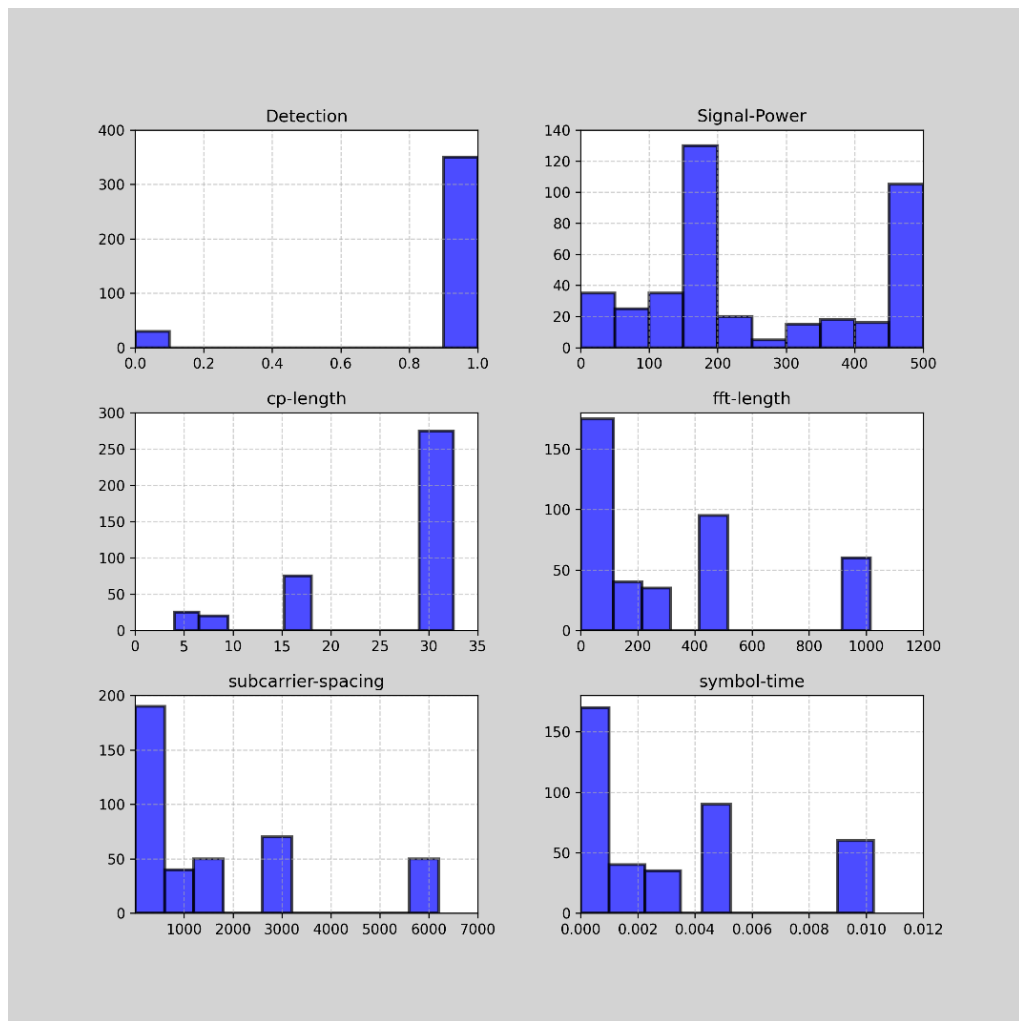


Рис. 3.18. – Гістограма розподілу параметрів

На рисунку 3.19 представлено графіки розподілу щільності різних параметрів, що характеризують аналіз сигналу в системі:

- subcar-spacing: графік розподілу міжчастотного інтервалу, який показує частотну густину сигналів.
- sym-time: графік розподілу тривалості символів, що ілюструє щільність залежно від часу символів.
- fft-length: графік розподілу розмірів FFT із кількома піковими значеннями, що вказують на основні використовувані довжини.
- cp-length: розподіл довжини CP, що демонструє густину для різних значень.
- Sig-Power: графік розподілу потужності сигналу, із явними піками на ключових значеннях.

– Detection: графік розподілу щільності виявлення сигналів, із концентрацією біля основних порогових значень.

Графіки дають змогу візуально оцінити характеристики параметрів, що впливають на якість та ефективність обробки сигналу.

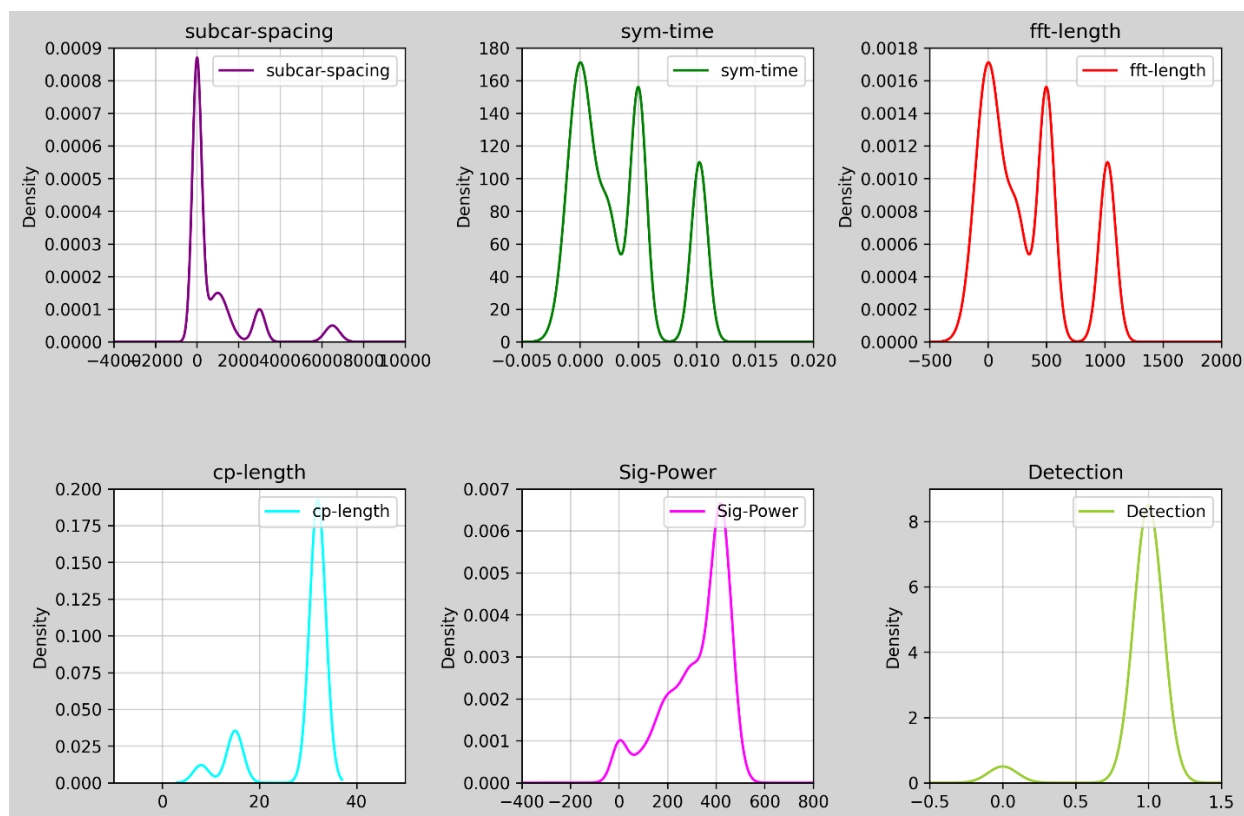


Рис. 3.19. – Розподіл щільності параметрів

3.10. Результати дослідження

На основі отриманих експериментальних даних та результатів встановлено, що сигнал БПЛА різних класів або джерел можна виявити та класифікувати за РЧ-параметрами за допомогою алгоритмів ML. Даний проект знаходиться на початковій стадії, і очікується, що з подальшими експериментами та тестуваннями точність класифікації БПЛА покращиться. Для реалізації виявлення та класифікації БПЛА було успішно використано GRC. Деякі результати і спостереження перевірялись за допомогою симуляцій у Python.

На рисунку 3.20 зображено графік залежності ймовірності виявлення сигналу БПЛА від SNR для виявлення енергії сигналу БПЛА.

Нижче наведено основні отримані результати.

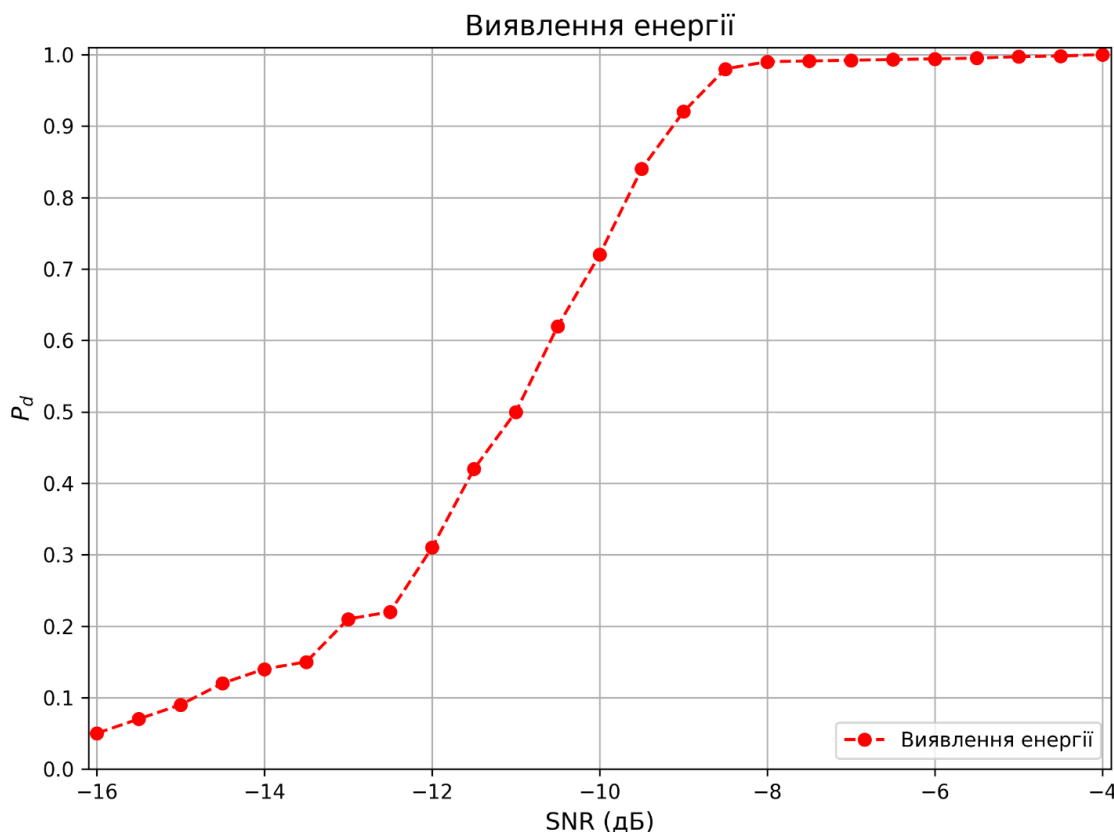


Рис. 3.20. – Залежність між ймовірністю виявлення та SNR

Існує пряма залежність між SNR і ймовірністю виявлення БПЛА: ймовірність виявлення БПЛА зменшується при зниженні SNR. Якщо БПЛА знаходиться близько до Прм, SNR буде високим, що відповідає результатам, які показують, що зі збільшенням відстані ймовірність виявлення БПЛА знижується.

3.11. Моделі поширення радіосигналів

На передачу радіосигналів від джерела до Прм впливає низка факторів. Як правило, сигнал передається від антени Прд до антени Прм, і для його успішного прийому певні фактори є визначальними. Головним фактором є втрата сигналу –

зменшення потужності електромагнітних хвиль при їх розповсюдженні. Нижче наведено результати моделювання різних моделей втрат з використанням Python.

3.11.1. Модель поширення сигналу у вільному просторі

Ця модель передбачає, що Прд і Прм знаходяться у вільному середовищі, тому вплив перешкод не враховується при оцінці втрат:

$$PL = 20 * \log_{10}(d) + 20 * \log_{10}(f) + 20 * \log_{10}((4 * \pi)/c); \quad (3.3)$$

де d – відстань (1-100 м), $f = 2,4$ ГГц – частота, c – швидкість світла. Модель переважно використовується на великих відстанях, але для даного експерименту відстань не перевищує 100 метрів.

3.11.2. Двопроменева модель поширення сигналу

Двопроменева модель враховує один прямий шлях та одну відбиту хвилю для оцінки втрат:

$$PL = 40 * \log_{10}(d) - (10 * \log_{10}(gt) + 10 * \log_{10}(gr) + 20 * \log_{10}(ht) + 20 * \log_{10}(hr)), \quad (3.4)$$

де d – відстань (1-100 м), gt і gr – коефіцієнти підсилення антени, ht і hr – висоти передавальної і приймальної антен.

3.11.3. Емпірична модель поширення сигналу

У літературі наведено емпіричні формули для моделей загасання сигналу БПЛА, стільникового зв'язку та Wi-Fi [26]. Модель заснована на відстані d та висоті θ БПЛА:

$$PL_{drone}(d, \theta) = L_0 + 10n \log_{10} \frac{d}{d_{ref}} + A(\theta - \theta_0) \exp \frac{(-\theta - \theta_0)}{B} + N(\mu, \sigma), \quad (3.5)$$

де L_0 – початкове загасання, n – коефіцієнт загасання на шляху, d – відстань (0-70 м), d_{ref} – опорна відстань (5 м), A – коефіцієнт загасання, θ_0 – кутове зміщення, B – висотний кут, N – нормальний розподіл ймовірностей.

На рисунку 3.21 наведено графік загасання сигналу БПЛА для 3 розглянутих моделей розповсюдження.

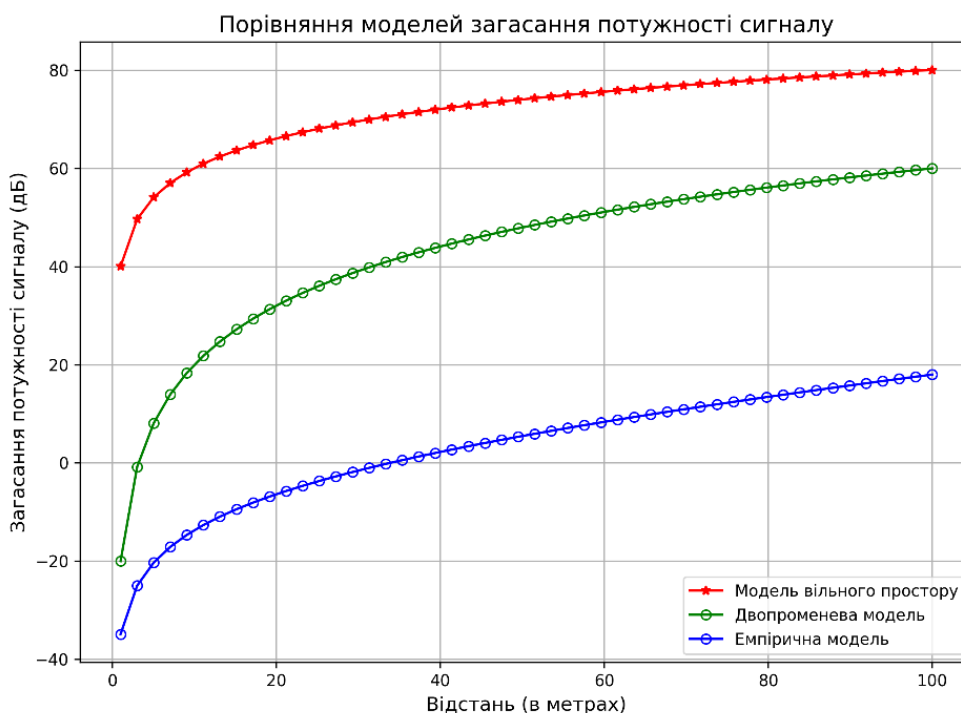


Рис. 3.21. – Порівняння моделей загасання сигналу БПЛА

Збільшення відстані призводить до ослаблення сигналу БПЛА через ефект загасання.

3.12. Висновок до третього розділу

У третьому розділі кваліфікаційної роботи реалізовано науково-дослідну частину, що присвячена виявленню сигналів БПЛА за допомогою виявлення енергії сигналів та класифікації сигналів БПЛА методами ML. Основні результати роботи включають:

1. Виявлення енергії сигналу: На базі GRC створено блок виявлення енергії сигналу БПЛА з використанням SDR (HackRF One), що дозволяє виконувати аналіз PSD сигналів і приймати рішення про їхню наявність. Для мінімізації похибок застосовано вікно Блекмана-Харріса, дроселювання та автоматичний розрахунок власних значень на основі заданої ймовірності хибної тривоги.

2. Оцінка параметрів OFDM: У рамках експериментів виконано детальну оцінку параметрів сигналів OFDM, включаючи довжину CP, інтервал між піднесучими, розмір ШПФ і тривалість символу. Ці параметри стали основою для створення моделі класифікації сигналів.

3. Інтеграція методів ML: Розроблено спеціальний блок для тестування алгоритмів ML у GNU Radio. Використано KNN, SVM та інші класифікатори для визначення джерела сигналу. Для навчання моделі зібрано навчальні та тестові вибірки на основі сигналів БПЛА DJI Phantom і DJI Mavic.

4. Експериментальне дослідження: Проведено серію тестів із використанням реальних БПЛА, що продемонстрували високу ефективність запропонованих методів на відстані до 50 метрів за умов високого SNR. Зі збільшенням відстані точність виявлення сигналів поступово знижується.

5. Аналіз обмежень: Виявлено, що основними факторами, які впливають на ефективність системи, є рівень SNR та моделі загасання сигналу. Змодельовано кілька сценаріїв розповсюдження сигналів, що підтвердили необхідність оптимізації параметрів системи для підвищення точності виявлення.

Результати дослідження свідчать про доцільність використання методів виявлення енергії сигналів БПЛА та ML для класифікації сигналів БПЛА. Подальші дослідження спрямовані на покращення точності моделей класифікації та розширення діапазону виявлення сигналів БПЛА.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Вимоги забезпечення охорони праці та техніки безпеки при виконанні робіт по застосуванню БПЛА

До роботи з комплексами дистанційного моніторингу на базі БПЛА допускаються особи не молодше 18 років, придатні до роботи по п.п. 1, 3, 7, 13 «Переліку робіт, при виконанні яких проводяться попередні і періодичні медичні огляди (обстеження), наказ Міністерства охорони здоров'я і соціального розвитку ЗУ № 5459-VI від 16.10.2012», які пройшли навчання за затвердженими програмами по експлуатації БПЛА даного типу, які засвоїли навички практичної роботи з комплексом і допущені до самостійної роботи наказом по організації.

Обслуговуючий персонал повинен стежити за технічним станом комплексу і БПЛА, своєчасно проводити його технічне обслуговування згідно з Інструкцією по експлуатації, знати і дотримуватися правила безпеки відповідно до вимог нормативних документів по експлуатації:

Небезпечними і шкідливими виробничими факторами при експлуатації комплексів дистанційного моніторингу на базі БПЛА є:

- обертів частини конструкції БПЛА;
- електричний струм;
- небезпека хімічного опіку при порушенні правил;
- експлуатації літєво-іонних акумуляторів;
- висока швидкість приземлення при значному вазі БПЛА;
- посадка БПЛА в важкодоступних місцях.

Фахівці, які беруть участь в роботах забезпечується спецодягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту згідно із затвердженими нормами.

При роботі в гірській, лісовій, пересіченій, болотистій місцевості, в умовах крайньої півночі, над водною поверхнею, працівник повинен бути забезпечений

необхідним обладнанням та устаткуванням для безпечної роботи і забезпечення схоронності комплексу при його експлуатації.

Працівник зобов'язаний знати і дотримуватися правил пожежної безпеки.

Курити тільки у встановлених місцях. Не допускати експлуатацію і зарядку акумуляторних батарей при температурі навколишнього середовища вище + 40С.

Працівник зобов'язаний повідомляти безпосереднього керівника:

- про нещасний випадок – негайно;
- про несправності устаткування і пристроїв – до початку або під час роботи після виявлення несправності;

Працівник повинен вміти користуватися захисними засобами і надавати першу допомогу при ураженні електричним струмом, хімічних опіках, механічних травмах.

Кожен працівник повинен знати і строго виконувати всі вимоги, викладені в цій інструкції. За порушення вимог даної інструкції, працівник несе відповідальність відповідно до правил внутрішнього трудового розпорядку.

Вимоги охорони праці перед початком роботи.

Робота на стартовому майданчику проводиться розрахунком в складі не менше двох осіб.

При підготовці до роботи необхідно перевірити надійність кріплень всіх елементів конструкції комплексу і БПЛА.

При підключенні акумуляторної батареї дотримуватись полярності. Чи не допускати закорочення контактів акумуляторної батареї.

Перед запуском БПЛА необхідно переконатися у відсутності людей і перешкод в напрямку старту, а також збоку і ззаду пускового пристрою в радіусі не менше 50 м.

При розгортанні пускового пристрою (гумовий джгут) необхідно переконатися в надійному кріпленні фіксуючого пристрою в ґрунті і відсутності механічних пошкоджень на джгуті і в місцях його кріплення.

Вимоги охорони праці під час роботи.

При роботі з БПЛА дотримуватися вимог Інструкції по експлуатації.

Зарядку акумуляторних батарей проводити тільки в спеціально відведених місцях, дотримуючись вимог техніки безпеки при експлуатації акумуляторних батарей даного класу і переконавшись в відсутності людей, не пов'язаних з проведенням даних робіт, на відстані не менше 5 метрів.

Забороняється експлуатувати акумуляторні батареї при виявленні механічних пошкоджень захисної плівки, здутті пластин, появи характерного запаху хімічної реакції.

Під час польоту БПЛА чітко виконувати вимоги Інструкції оператора управління комплексу, вказівки служби управління повітряним рухом.

При виборі майданчика і під час посадки БПЛА максимально виключити можливість нанесення шкоди людям і матеріальним цінностям.

Вимоги охорони праці в аварійних ситуаціях.

При виявленні несправності комплексу або його окремих складових негайно припинити експлуатацію і провести комплекс заходів відповідно до експлуатаційних документів. Про подію і вжиті заходи і доповісти безпосередньому начальнику.

При виникненні аварійної ситуації під час польоту БПЛА (відмова системи управління, небезпека зіткнення з перешкодою, різке погіршення погодних умов, пожежа на борту), негайно доповісти в службу управління повітряним рухом, припинити політ і забезпечити безпечну посадку БПЛА.

При виникненні ситуацій неконтрольованих реакцій акумуляторних батарей в процесі зарядки (підвищення температури, здуття, відкрита хімічна реакція), негайно перекрити процес і ізолювати акумуляторну батарею, помістивши її в контейнер. Гасіння пожежі виробляти вуглекислотним вогнегасником, землею або накриваючи брезентом.

При приземленні БПЛА в важкодоступному місці необхідно доповісти безпосередньому керівнику польотів для прийняття рішень про спосіб його евакуації.

При отриманні травми надати першу долікарську допомогу потерпілому, викликати лікаря. До приходу лікаря надавати допомогу, виходячи зі стану потерпілого.

Вимоги охорони праці після закінчення.

По закінченні роботи згорнути комплект згідно інструкції по експлуатації, зняти акумуляторну батарею з БПЛА, провести зарядку батареї і прибрати її в контейнер. Зберігання акумуляторної батареї в вільному доступі забороняється.

Про всі помічені недоліки під час роботи з комплексом доповісти своєму безпосередньому начальнику.

4.2. Інструкція з охорони праці для оператора наземних засобів керування БПЛА

До самостійної роботи з безпілотним повітряним судном, далі БПС, допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли теоретичне та практичне навчання, пройшли медичний огляд і не мають протипоказань за станом здоров'я, пройшли вступний та первинний інструктаж на робочому місці з охорони праці, та прийомів роботи, які пройшли стажування на робочому місці та перевірку знань вимог охорони праці, а також навчання правил пожежної безпеки та електробезпеки з подальшою перевіркою знань правил пожежної безпеки та електробезпеки в обсязі посадових обов'язків із присвоєнням I групи [27].

Працюючи з БПС працівник зобов'язаний:

- знати та дотримуватись правила та норми охорони праці та виробничої санітарії, правила та норми з охорони навколишнього середовища, правила внутрішнього трудового розпорядку;
- дбати про особисту безпеку та особисте здоров'я;
- виконувати вимоги пожежо-безпеки і вибухо-безпеки, знати сигнали оповіщення про пожежу, порядок дій при ньому, місця розташування засобів пожежогасіння та вміти користуватися ними;

- знати розташування аптечки і вміти надавати першу допомогу потерпілому;
- знати порядок дій у разі виникнення надзвичайних подій;
- знати пристрій, принцип роботи, правила експлуатації та обслуговування БПС, що застосовується [27].

Під час роботи з БПС працівник повинен проходити:

- повторний інструктаж з охорони праці на робочому місці не рідше 1 разу на 3 місяці;
- періодичний медичний огляд 1 раз на рік;
- чергову перевірку знань вимог охорони праці не рідше ніж 1 раз на рік [27].

Працівник зобов'язаний виконувати лише ту роботу, яка доручена безпосереднім керівником робіт. Не допускається доручати свою роботу іншим працівникам та допускати на робоче місце сторонніх осіб [27].

Присутність сторонніх осіб на робочому просторі обладнання під час роботи не допускається [27].

Робота з БПС здійснюється відповідно до технічної документації організації-розробника [27].

При роботі з БПС на працівника можлива дія наступних небезпечних та шкідливих виробничих факторів:

- рухомі транспортні засоби;
- гострі кромки, задирки, шорсткості поверхні БПС;
- несприятливі погодні умови (дощ, сніг, вітер, мороз, спека тощо);
- можливість падіння (підсковзування, спотикання, попадання ноги в технічну колію та ями, що тягне за собою вивих суглобів);
- електричний струм, шлях якого у разі замикання, може пройти через тіло людини;
- фізичні навантаження (при тривалій роботі на ногах, складання, розкладання та транспортування БПС);

– недостатня освітленість робочої зони (при роботі в темний час доби або в несприятливих погодних умовах) [27].

За необхідності працівник повинен бути забезпечений засобами індивідуального захисту відповідно до чинних норм видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) [27].

Спеціальний одяг, спеціальне взуття та інші ЗІЗ, що видаються, повинні відповідати характеру та умовам роботи, забезпечувати безпеку праці, мати сертифікат відповідності або декларацію [27].

Засоби індивідуального захисту, на які немає технічної документації, а також з терміном придатності до застосування, що минув – не допускаються [27].

Використовувати спецодяг та інші ЗІЗ для інших цілей, ніж основна робота – забороняється [27].

Працюючи разом із іншими працівниками необхідно узгоджувати свої взаємні дії [27].

Під час роботи не відволікатися на сторонні справи та розмови та не відволікати інших працівників [27].

Працівник повинен знати та дотримуватися правил особистої гігієни. Приймати їжу, курити та відпочивати лише у спеціально відведених для цього приміщеннях [27].

Забороняється вживання спиртних напоїв та поява на роботі у нетверезому стані, у стані наркотичного або токсичного сп'яніння [27].

Працівник зобов'язаний негайно повідомляти свого керівника про будь-яку ситуацію, що загрожує життю та здоров'ю людей, про кожен нещасний випадок, що стався на виробництві, або про погіршення свого здоров'я, у тому числі про появу гострого професійного захворювання (отруєння), а також про всі помічені несправності обладнання і пристроїв [27].

Вимоги цієї інструкції з охорони праці є обов'язковими під час роботи з БПС. Невиконання цих вимог розглядається як порушення трудової дисципліни та тягне за собою відповідальність відповідно до чинного законодавства України [27].

4.3. Інструкція з безпеки польотів

Перед тим, як приступити до експлуатації, пройдіть курси з керування безпілотним повітряним судном та отримайте відповідний сертифікат оператора. Користувачам, які не пройшли навчання, не дозволяється експлуатація даного продукту.

Переконайтеся, що всі польоти виконуються на відкритій та знайомій території, уникайте перешкод, скупчень людей та вивчіть усі можливі ризики.

Не керуйте безпілотним повітряним судном у втомленому чи нетверезому стані.

Остерігайтеся джерел тепла, щоб уникнути пошкодження електронного обладнання або інших компонентів.

Не експлуатуйте безпілотне повітряне судно самотужки на попередніх етапах навчання. Перед початком роботи рекомендується звернутися по допомогу до досвідченого оператора.

Проведіть передполітну перевірку, щоб переконатися у справності пристрою та відсутності частотних перешкод.

Тримайтесь щонайменше за 15 метрів від безпілотного повітряного судна в робочому стані і не торкайтеся при цьому пропелерів частинами тіла або будь-якими предметами.

Рекомендація: з міркувань безпеки, не рекомендується підходити на відстань менше 10 метрів під час передполітної перевірки безпілотного повітряного судна, двигуни якого працюють в режимі перевірки.

Строго забороняється проводити випробування ефективності опції подолання перешкод на людях, тварин та інших об'єктах. Строго заборонено створювати перешкоди при польоті, заважати роботі або торкатися безпілотного повітряного судна, що працює, частинами тіла або предметами.

Негайно зупиніть роботу та здійсніть політ на базу у разі значного погіршення погодних умов, таких як дощ, сніг, град тощо.

Строго дотримуйтесь законів, нормативів та правил експлуатації до безпілотного повітряного судна, а також експлуатуйте тільки в межах допустимої висоти польоту та діапазоні допустимих законом.

Літайте в місцях далеко від будівель та інших перешкод. Не літайте над або поряд з великими скупченнями людей.

Переконайтеся, що ваша діяльність не порушує будь-які прийняті закони або постанову, і що ви отримали всі відповідні попередні дозволи. Перед польотом.

Обов'язково перевірте всі наступні вимоги щодо відповідності:

- акумулятори пульта дистанційного керування та безпілотного повітряного судна повністю заряджені;
- шасі та навісне обладнання надійно закріплені.
- компас відкалібрований після того, як у додатку буде запропоновано зробити це.

Постійно підтримуйте візуальний політ у межах прямої видимості (VLOS) безпілотного повітряного судна.

Не відповідайте на вхідні дзвінки під час польоту. Не запускайте пристрій у стані наркотичного сп'яніння.

Якщо з'являється попередження про низький заряд акумулятора, посадіть безпілотне повітряне судно в безпечному місці.

Якщо модуль радара не може правильно працювати в робочому середовищі безпілотного повітряного судна, не зможе уникнути перешкод під час повернення додому (RTH). Все, що можна відрегулювати, – це швидкість польоту та висоту у бік збільшення, поки пульт дистанційного керування все ще підключений.

Не використовуйте старі, тріснуті або зламані пропелери.

4.4. Функції, завдання та способи застосування БПЛА в умовах надзвичайних ситуацій

Функції. Основними функціями БПЛА в умовах надзвичайних ситуацій (далі – НС) слід вважати: ведення повітряного спостереження (повітряної розвідки); цілевказівка; ретрансляція зв'язку; радіаційна, хімічна та біологічна розвідка; виявлення мін; пошук і рятування; гасіння пожеж; транспортування вантажів.

Завдання. У зв'язку з наведеною сукупністю функцій спектр завдань, що вирішуються із застосуванням БПЛА, є досить широким. Під час ведення повітряного спостереження (повітряної розвідки) БПЛА вирішують такі завдання: збір інформації в інтересах попередження, прогнозування і виявлення НС; інформаційна підтримка під час ліквідації НС; контроль результатів ліквідації НС; збір інформації для оцінки збитків від НС тощо.

Для виконання завдань повітряного спостереження (повітряної розвідки) використовуються різноманітні технічні засоби: видова апаратура видимого діапазону (RGB-камери); видова апаратура інфрачервоного діапазону; радіолокаційні станції із синтезованою апертурою; багатоспектральна апаратура; газодатчики, радіаційна апаратура тощо, а також їх комбінації.

Реалізація функції цілевказівки здійснюється шляхом вирішення завдань передавання з борта БПЛА даних у масштабі реального часу про об'єкти, на яких необхідно ліквідувати НС (на яких ліквідується НС), а також шляхом локального підсвічування вночі місця, де відбувається НС. Вирішення зазначених завдань здійснюється за допомогою видової та світлотехнічної апаратури.

Функція ретрансляції зв'язку виконується шляхом вирішення завдань збільшення дальності дії управління БПЛА в умовах відсутності прямого зв'язку та ретрансляції даних з борта БПЛА в умовах відсутності прямого зв'язку з використанням спеціальної апаратури зв'язку, що встановлюється на БПЛА.

Можливість хімічного та біологічного зараження місцевості під час НС визначає необхідність ведення хімічної та біологічної розвідки. Для виконання

завдань моніторингу потенційно небезпечних зон, виявлення хімічної небезпеки чи загрози, ідентифікації отруйних речовин, виявлення біологічної небезпеки чи загрози, ідентифікації біологічних засобів, попередження та визначення місця розташування небезпек і загроз на БПЛА встановлюється апаратура хімічної та біологічної розвідки або використовуються одноразові БПЛА.

В умовах можливого радіаційного зараження використовуються спеціальні датчики для ведення радіаційної розвідки.

Проведення протимінних заходів спрямовано на збереження особового складу, неомбатантів і техніки. При цьому на БПЛА покладаються такі завдання: виявлення й установлення місця розташування мінних полів і окремих мін з повітря; виявлення й установлення місця розташування вибухонебезпечних об'єктів.

Ще одним важливим моментом у використанні БПЛА є їхнє залучення як для авіаційного, так і загального процесу пошуку і рятування з метою виявлення місць розташування людей (тварин), які підлягають рятуванню в умовах НС, інформація про які передається на встановлені пункти її приймання, а також оперативної доставки засобів рятування до осіб, які підлягають рятуванню.

Безпілотники активно застосовуються при гасінні пожеж. За їх допомогою здійснюється виявлення людей у приміщеннях будівлі під час ліквідації пожеж; вони застосовуються для гасіння локальної пожежі у важко доступних місцях, а також для гасіння пожеж в умовах висотних будівель. Також за їх допомогою забезпечується доставка необхідних засобів (канати, захисні речі тощо) для рятування людей під час пожеж.

Важливою функцією БПЛА вважається транспортування вантажів у зону НС: доставка медичних препаратів у важкодоступні місця для надання оперативної медичної допомоги; доставка продуктів харчування у важкодоступні місця під час НС тощо.

Наведені класифікація і завдання безпілотної авіації дозволяють осмислити місце кожного БПЛА в сучасних умовах прогнозування, виявлення та ліквідації НС.

В Україні перший експериментальний досвід застосування БПЛА з інфрачервоною (тепловою) апаратурою для виявлення джерел торф'яних пожеж був отриманий в 2016 році.

Разом з тим треба враховувати умови та фактори, що впливають на спосіб застосування БПЛА і видових технічних засобів спостереження (далі – ВТЗС).

Управляє польотом БПЛА зовнішній пілот. Якість управління залежить від кваліфікації зовнішнього пілота, його фізіологічного стану, рівня практичної навченості управляти БПЛА в різноманітних умовах (прості метеоумови, складні метеоумови, ранок, день, сутінки, ніч), володіння способами застосування БПЛА із встановлених на ньому ВТЗС для вирішення завдань в умовах НС.

Місцевість, на якій відбувається НС і застосовується БПЛА, характеризується своїм рельєфом (рівнинна, горбиста, гориста тощо), рослинним покривом (трава, дерева, кущі тощо), ґрунтом. Саме місцевість впливає на можливість управління польотом БПЛА та отримання відеоінформації з борта БПЛА, що пов'язане із забезпеченням стійкого зв'язку в умовах можливої появи радіонепрозорих зон.

Метеорологічні умови безпосередньо впливають на застосування як БПЛА, так і функціонування ВТЗС. Це пов'язано з безпекою польотів БПЛА та управлінням його польотом у різних погодних умовах і під час виникнення різних атмосферних явищ (наприклад, турбулентність атмосфери). Від кваліфікації зовнішнього пілота щодо управління безпілотником у простих і складних метеоумовах залежить результат виконання ним поставлених завдань.

Турбулентність атмосфери здійснює безпосередній вплив на якість отримання результатів аерознімання із застосуванням ВТЗС, встановлених на БПЛА.

Окремим питанням вважається чутливість БПЛА до поривів вітру, що може призвести до аварії безпілотника та його повного руйнування під час падіння на місцевість. У разі сильного вітру управління БПЛА значно ускладнюється. Небезпечними вважаються пориви вітру від 15-20 м/с.

Пора року (зима, весна, літо, осінь) обумовлює стан метеоумов і особливості виникнення турбулентності атмосфери, що, зі свого боку, впливає на безпеку польоту БПЛА і якість виконання аерознімання для виявлення наземних мін. Температурний режим безпосередньо впливає на експлуатаційні можливості БПЛА (сильний мороз, велика спека тощо). Час доби (ранок, день, сутінки, ніч) впливає на зміну освітленості місцевості, що важливо як для управління БПЛА, так і для якості проведення аерознімання. Зовнішній пілот має бути підготовлений для управління БПЛА в умовах дня і ночі.

Застосування ВТЗС, встановлених на БПЛА, залежить від кваліфікації зовнішнього пілота, його фізіологічного стану (стан здоров'я, особливості зору, тренованість стосовно різноманітних навантажень тощо), практичної навченості управляти ВТЗС під час ведення спостереження (розвідки) з використанням БПЛА.

Атмосфера є середовищем, через яке проходить випромінювання, що несе інформацію про об'єкти на місцевості. Вона здатна ослабити як пряме сонячне випромінювання, так і відбите об'єктом або місцевістю, де вона встановлена, через його розсіювання. Турбулентність атмосфери призводить до погіршення тонового контрасту зображення об'єкта на екрані дисплея зовнішнього пілота БПЛА, що, зі свого боку, знижує якість спостереження. Важливим фактором є освітленість місцевості, де знаходиться об'єкт спостереження (розвідки), яка залежить від висоти сонця над горизонтом. У разі зміни висоти сонця від 10° до 90° освітленість змінюється приблизно в п'ять разів, а у разі переходу від денних умов до нічних – у десять разів.

Пора року, унаслідок траєкторії руху нашої планети навколо сонця, призводить до зміни висоти сонця, що слід враховувати під час планування повітряного спостереження (розвідки) наземних об'єктів.

Застосуванню БПЛА передують низка етапів: постановка завдання на політ; підготовка БПЛА і зовнішнього пілота до застосування БПЛА; старт БПЛА; політ у район виконання поставленого завдання; виконання завдання визначеним

способом; повернення до місця посадки; післяпольотна підготовка (або підготовка до повторного польоту).

До способів застосування БПЛА коптерного типу (Mavic-3) в умовах НС слід віднести: збирання інформації; інформаційна підтримка; цілевказівка; спостереження за заданим об'єктом (сектором); пошук об'єктів у визначеному районі (секторі); обліт заданого об'єкта; контроль результатів.

Під час застосування БПЛА коптерного типу з урахуванням можливостей ВТЗС є декілька варіантів траєкторій в ручному і автоматичному режимі. В автоматичному режимі польоту, за умов його наявності у БПЛА, є можливість задати траєкторію руху: по сітці та визначенням шляхових точок.

У ручному режимі управління польотом БПЛА може здійснюватися з використанням декількох варіантів траєкторій польоту, що залежить від поставленого завдання.

За наявності в майбутньому на оснащені ДСНС спеціалізованих БПЛА з'являться нові можливості щодо застосування безпілотників, що має місце в провідних країнах світу при виконанні низки завдань із застосуванням БПЛА: хімічний аналіз ґрунту; боротьба з пандемією; гасіння пожеж у багатоповерхових будинках; пошук і рятування людей; виявлення мін у ході розмінування території; надання медичної допомоги тощо.

4.5. Розробка вимог безпеки праці при настанні НС

Наведемо вимоги безпеки праці при настанні надзвичайної ситуації.

Вимоги безпеки праці перед початком роботи з БПЛА DJI Mavic Air 2.

БПЛА відноситься до безпечних приладів за умови дотримання інструкції з експлуатації.

Забороняється виконувати роботи БПЛА поблизу високовольтних ліній електропередач, над відкритими водоймами. У випадку необхідності виконання робіт над водою, він повинен знаходитись не нижче 3 м від її поверхні.

Слід уникати зон польотів з високим електромагнітним випромінюванням – це може перешкодити комунікації з дроном і він може впасти.

Оператор БПЛА повинен дотримуватись правил саморегулюючих організацій, таких як Міжнародна організація громадянської авіації, Федеральне управління громадянської авіації (США) та Державна авіаційна служба України.

Отже, перед початком роботи з БПЛА DJI Mavic Air 2 необхідно виконати такі кроки.

1. Не допускати до роботи осіб, які не вивчили будову та принцип роботи БПЛА DJI Mavic Air 2 та/або не пройшли курс навчання управління і методами роботи.

2. Не допускати до роботи в полі осіб, що не пройшли інструктаж з охорони праці, про що повинен бути зроблений відповідний запис у реєстраційному журналі.

3. Перевірити комплектність та справність БПЛА DJI Mavic Air 2

4. Перед початком роботи на полі, необхідно впевнитися в безпечних умовах на полі.

5. Повідомити осіб, зайнятих на польових роботах і які працюють на полі, що буде здійснюватися робота БПЛА.

Вимоги безпеки праці під час проведення робіт.

1. Під час проведення контрольно-вимірювальних робіт у полі, необхідно контролювати навколишній стан (як власний, так і БПЛА), тримати у полі зору агрегати, які працюють на даному полі.

2. За сонячної погоди оператору забороняється працювати без головного убору та без термоса з водою.

3. Комплектування, підготовку до роботи слід виконувати у спеціально відведеному і позначеному місці на полі.

4. Якщо оператор переміщується самостійно на транспортному засобі, то останній треба розміщати на видному, доступному місці.

Вимоги безпеки праці в аварійних ситуаціях

У випадку падіння БПЛА на полі поблизу технологічних машин, необхідно терміново повідомити механізаторів про подію. Рухатись до місця падіння таким чином, щоб бути в полі зору інших людей, що працюють на техніці.

У разі виникнення пожежі (що можливо при вимірюваннях на полі з агрофоном – стерня зернових колосових культур), необхідно викликати пожежну охорону, сповістити керівництво підприємства або відповідального та взяти участь у ліквідації осередку загорання.

Не підходити на небезпечну відстань до осередку загорання, якщо це може загрожувати здоров'ю чи життю. Якщо є технічна можливість – перевірити за допомогою БПЛА наявність інших джерел займання чи іншої загрози.

У випадку травмування працівника слід надати йому невідкладну допомогу та викликати лікаря. Якщо це неможливо, необхідно терміново доставити керівника до медичного закладу.

Вимоги безпеки праці після виконання робіт

1. Упевнитися в безпечному поверненні БПЛА, зупинити його двигуни.
2. Вимкнути живлення на пульту управління та БПЛА.
3. Пересвідчитися у відсутності пошкоджень приладу.
4. Скласти БПЛА згідно з інструкцією в кейс.

4.6. Висновок до четвертого розділу

В четвертому розділі кваліфікаційної роботи наведено комплекс заходів щодо забезпечення охорони праці та безпеки під час роботи з БПЛА, зокрема в умовах НС. Основні положення включають:

1. Вимоги до персоналу: допуск до роботи мають лише особи, які пройшли спеціальне навчання, медичний огляд, інструктаж з охорони праці та перевірку знань. Працівники зобов'язані дотримуватися встановлених правил безпеки, використовувати засоби індивідуального захисту та знати порядок дій у разі надзвичайних подій.

2. Техніка безпеки: акцент зроблено на заходах, пов'язаних із експлуатацією БПЛА, включаючи передполітну перевірку, забезпечення справності обладнання, контроль за умовами роботи та дотриманням безпечних відстаней. Заборонено експлуатацію несправного обладнання або в умовах, що перевищують встановлені норми.

3. Робота в умовах НС: визначено функції та завдання БПЛА, такі як повітряне спостереження, рятувальні операції, перевезення вантажів, гасіння пожеж тощо. Підкреслено важливість підготовки персоналу до роботи в складних метеоумовах і небезпечних середовищах.

4. Запобігання аваріям: детально розглянуто заходи безпеки в аварійних ситуаціях, включаючи контроль стану обладнання, дії у випадку падіння чи займання БПЛА, а також надання першої допомоги потерпілим.

5. Рекомендації: для ефективного використання БПЛА в умовах НС необхідно враховувати вплив метеоумов, характеристик місцевості та технічних особливостей обладнання. Підготовка пілотів і відповідність законодавчим вимогам є ключовими факторами успіху.

Даний розділ підкреслює важливість системного підходу до охорони праці та дотримання правил безпеки для запобігання ризикам і забезпечення ефективної роботи з БПЛА в умовах НС.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На основі проведених експериментів і отриманих результатів вдалося успішно класифікувати сигнали, що надходять від БПЛА DJI Phantom та Mavic. Застосовуючи ML та тестування, визначено, що серед різних алгоритмів класифікації найвищу точність забезпечує метод KNN. Подальшою метою є покращення цієї точності шляхом додавання нових параметрів на основі статистики тестування до моделі класифікації. Наразі були випробувані стандартне відхилення та медіана сигналу як додаткові ознаки, що дало незначне підвищення точності, але переконаний, що в цьому напрямку можливий ще більший прогрес. Перевірка в реальному часі виявлення та класифікації БПЛА на основі аналізу радіочастотних сигналів за допомогою навченої моделі наразі демонструє не найвищу точність прогнозування. Як зазначалося раніше, прагнеться змінити це і планується продовжувати навчання, тестування та аналіз, щоб підвищити точність прогнозування. Будуть застосовані альтернативні підходи до збору та тестування даних.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 Nguyen, P., Ravindranathan, M., Nguyen, A., Han, R., & Vu, T. Investigating cost-effective RF-based drone detection.
- 2 Liu, H., Wei, Z., Chen, Y., Pan, J., Lin, L., & Ren, Y. Drone detection based on an audio-assisted camera array.
- 3 Yang, X., Huo, K., Jiang, W., Zhao, J., & Qiu, Z. A passive radar system for detecting UAV based on the OFDM communication signal.
- 4 Andradi, P., Radisic, T., Mustra, M., & Ivosevic, J. Night-time detection of UAVs using thermal infrared camera.
- 5 Kunze, S., Weinberger, A., & Poeschl, R. Concept for a software-defined radio-based system for detection, classification, and analysis of radio signals from civilian unmanned aerial systems.
- 6 De Goeij, G., Van Dijken, E. H., & Brouwer, F. Research into the radio interference risks of drones.
- 7 Scheller, W. D. Detecting drones using machine learning.
- 8 SDR Forum. [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL: <http://www.sdrforum.org/>. – Дата доступу: 30.11.2024.
- 9 Rwodzi, M. J. Energy-detection-based spectrum sensing for cognitive radio on a real-time SDR platform.
- 10 Jagannath, J., Saarinen, H. M., & Drozd, A. L. Framework for automatic signal classification techniques (FACT) for software-defined radios.
- 11 Wang, Y., Nair, S., Young, A., Chen, Q., & Bostian, C. W. OFDM signal classification and synchronization.
- 12 Schnur, B. Calhoun thesis. [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL: <https://calhoun.nps.edu/bitstream/handle/10945/4620/09SepSchnur.pdf?sequence=1&isAllowed=y> – Дата доступу: 30.11.2024.
- 13 Haq, K. N., Mansour, A., & Nordholm, S. Recognition of digital modulated signals based on statistical parameters.

- 14 Liu, Y., Haimovich, A. M., Su, W., Dabin, J., & Kanterakis, E. Modulation classification of MIMO-OFDM signals by independent component analysis and support vector machines.
- 15 Universität der Bundeswehr München. WiFi experiments: веб-сайт. URL: <http://www.etti.unibw.de/labalive/experiment/wifi/> (дата звернення: 30.11.2024).
- 16 Jäntti, J., Chaudhari, S., & Koivunen, V. Detection and classification of OFDM waveforms using cepstral analysis.
- 17 Li, H., Bar-Ness, Y., Abdi, A., Somekh, O. S., & Su, W. OFDM modulation classification and parameters extraction.
- 18 Vizziello, A., Akyildiz, I. F., Agustí, R., Favalli, L., & Savazzi, P. OFDM signal type recognition and adaptability effects in cognitive radio networks.
- 19 Al-Jzari, A., & Kostanic, I. Cyclic prefix length determination for orthogonal frequency division multiplexing system over different wireless channel models based on the maximum excess delay spread.
- 20 Buccardo, A. A signal detector for cognitive radio system.
- 21 Python Documentation. [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL: <https://www.python.org/about/>. – Дата доступу: 01.12.2024.
- 22 NumPy Documentation. [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL: <http://www.numpy.org/>. – Дата доступу: 01.12.2024.
- 23 Pandas Documentation. [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL: <http://pandas.pydata.org/>. – Дата доступу: 01.12.2024.
- 24 Pedregosa, F. Scikit-learn: Machine learning in Python. [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL: <http://jmlr.csail.mit.edu/> – Дата доступу: 02.12.2024.
- 25 Acharya, A. Machine learning final thesis.
- 26 Jeong, W., Choi, H., & Kun, K. Empirical pathloss modeling and RF detection scheme for various drones.
- 27 Інструкція з охорони праці оператора наземних засобів керування безпілотних літальних апаратів [Електронний ресурс]. URL:

<https://ohoronapraci.com.ua/instructions/656370-instruktsiya-z-okhorony-pratsi-operatora-nazemnykh-zasobiv-keruvannya> (дата звернення: 11.12.2024).

28 Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dunets V., Dediv I. Matematychnе, alhorytmichne ta prohramne zabezpechennia synfaznoho vyivlennia radiosyhnaliv v elektronnykh komunikatsiinykh merezhakh iz zavadamy [Mathematical, algorithmic and software support of synphase detection of radio signals in electronic communication networks with noises]. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol. 111, no 3, pp. 48-57 [in Ukrainian].

29 Iryna Dediv Liliya Khvostivska, Mykola Khvostivskyi, Vasyl Dunetc. The 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP-2022). Ternopil, Ukraine.

30 Дунець В., Башняк В. Досягнення та виклики виявлення та класифікації безпілотників. Збірник тез доповідей XIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль 11-12 грудня 2024 року). Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2024. с. 421-423.

ДОДАТКИ

Додаток А
Теза конференції

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна)
Університет імені П'єра і Марії Кюрі (Франція)
Маріборський університет (Словенія)
Технічний університет у Кошице (Словаччина)
Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса (Литва)
Наукове товариство ім. Т.Шевченка

**АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ
СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Збірник
тез доповідей

**ХІІ Міжнародної науково-практичної
конференції молодих учених та студентів**
11-12 грудня 2024 року



**УКРАЇНА
ТЕРНОПІЛЬ – 2024**

УДК 629.735.33.

Башняк В.Т., Дунець В.Л., к.т.н., доц.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

ДОСЯГНЕННЯ ТА ВИКЛИКИ ВИЯВЛЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИКІВ

Bashniak V.T., Dunetc V.L., Ph.D., Assoc. Prof.

ACHIEVEMENTS AND CHALLENGES OF DRONE DETECTION AND CLASSIFICATION

Швидкий розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА), широко відомих як дрони, приніс унікальний набір можливостей і викликів як для цивільного, так і для військового секторів. Хоча дрони довели свою корисність у таких сферах, як доставка, сільське господарство і спостереження, їхній потенціал для зловживань у вигляді незаконних вторгнень у повітряний простір, порушень права на приватність і ризиків для безпеки підвищив попит на вдосконалені системи виявлення і класифікації [1-2]. Актуальним є детальний огляд поточних удосконалень методів виявлення і класифікації безпілотників: висвітлено нові стратегії, що використовуються для вирішення проблем, пов'язаних з діяльністю БПЛА, що постійно зростають [3]. Науковцям варто досліджувати загрози і виклики, з якими стикаються безпілотники через їхню динамічну поведінку, різноманітність розмірів і швидкостей, час автономної роботи тощо. Крім того, класифікувати ключові способи виявлення, включаючи радар, радіочастотні (РЧ), акустичні та візуальні підходи, а також їхні переваги та обмеження [4]. Важливими є методи об'єднання сенсорів та інших підходів до виявлення, в тому числі бездротового зв'язку (Wi-Fi), стільникового зв'язку і мереж Інтернету речей (IoT), для підвищення точності та ефективності виявлення та ідентифікації БПЛА [5].

В останні роки в результаті постійного розвитку технологій мікро-безпілотні літальні апарати (БПЛА), які частіше називають дронами, вдосконалюють свої технічні можливості і розширюють сферу застосування. Завдяки здатності літати на великі відстані, компактності, мобільності та можливостям корисного навантаження, потенційне застосування дронів розширилося від особистого до військового використання [1]. Дрони відіграють значну роль у сучасному житті завдяки своїй низькій вартості і простоті використання в багатьох сферах повсякденного життя, від офіційної державної роботи, такої як охорона кордонів і спостереження за лісовими пожежами, до роботи в цивільному приватному секторі, такої як надання першої допомоги, ліквідація наслідків стихійних лих, моніторинг місць масового скупчення людей, сільське господарство, служби доставки, інтернет-зв'язок і загальна кінозйомка [2]. Таким чином, демократизація технології безпілотних літальних апаратів призвела до широкого визнання, зробивши небо більш доступним, ніж будь-коли раніше. Поряд з перевагами, зростаюче використання безпілотників створило суттєві проблеми у забезпеченні безпеки, конфіденційності та захисту як повітряних, так і наземних організацій [3]. Ефективні системи виявлення і класифікації безпілотників стали ключовим питанням для регуляторних органів, служб безпеки і авіаційних властей у всьому світі. Основна мета - дослідити досягнення в алгоритмах виявлення і класифікації безпілотників, які з'явилися в результаті вирішення цих питань. Зокрема представити всебічний огляд найсучасніших технологій, які зараз

використовуються або знаходяться на стадії розробки. Це включає дослідження декількох способів виявлення, таких як радар, радіочастотний (РЧ) аналіз, акустичні датчики і датчики камер, а також об'єднання цих систем у комплексні мережі виявлення. Крім того, важливими є методи об'єднання сенсорів та інших підходів до виявлення, в тому числі дактилоскопії Wi-Fi, мереж 5G і IoT, для підвищення надійності систем виявлення та ідентифікації БПЛА [4]. Основними цілями даних досліджень є:

- описати останні інциденти, пов'язані з безпілотниками, та категорії загроз;
- визначити та описати основні підходи, що використовуються для виявлення та класифікації безпілотників;
- проаналізувати переваги та обмеження різних методів;
- підкреслити фактори перешкод у реальних сценаріях для окремих сенсорних модальностей і запропонувати додаткові інтегровані підходи.

Для того, щоб забезпечити дотримання послідовного набору правил, правила використання безпілотників зараз є пріоритетними в усіх країнах. Але з розвитком технологій з'явилася можливість створювати незареєстровані дрони на замовлення, які можуть літати в заборонених зонах. За останні роки в ЗМІ було зафіксовано численні інциденти та події, пов'язані з використанням дронів, що літають поблизу життєво важливих об'єктів інфраструктури, над місцями з обмеженим доступом або під час важливих публічних зібрань. Щоб продемонструвати необхідність системи виявлення безпілотників, нижче ми коротко обговоримо кілька категорій загроз у контексті конкретних інцидентів.

Останнім часом горизонт використання дронів стрімко розширився від військової сфери до «розумного» сільського господарства. Оскільки використання дронів поширюється в різних галузях, здатність ефективно виявляти та ідентифікувати їх стає все більш важливою для того, щоб уникнути незаконної або шкідливої діяльності дронів. Мотивація для цього дослідження випливає зі зростаючого використання дронів і небезпек, які вони несуть для приватності, безпеки і захисту. Дослідження в цьому напрямку мають важливе значення, оскільки надає сучасний і актуальний огляд технологій виявлення безпілотників, які є життєво важливими для національної безпеки, приватності та захисту. Дрони слугують засобом доставки різного корисного вантажу, такого як GPS-пристрої, інфрачервоні камери, батареї та датчики. Дрони, здатні здійснювати польоти на великі відстані, мати велику вантажопідйомність, а також бути стійкими до вітру і погодних умов, можуть слугувати засобом для транспортування небезпечних вантажів.

Огляд сучасних методів виявлення і класифікації безпілотників вказує на те, що ця сфера швидко розвивається і характеризується значним технологічним прогресом і новими підходами. Швидкий розвиток використання БПЛА викликав серйозні питання щодо конфіденційності, безпеки та захисту. Як наслідок, розробка ефективних алгоритмів виявлення БПЛА стала критично важливою. Важливо досліджувати підходи до виявлення БПЛА, таких як радіолокаційні, акустичні, радіолокаційні та візуальні підходи. Проте існують також проблеми, такі як: різноманітність розмірів і швидкостей дронів, їхня динамічна поведінка і схожість з іншими літаючими об'єктами, а також обмежений час автономної роботи роблять завдання виявлення ще складнішим. Крім того, різні фактори перешкод у реальних умовах, включаючи несприятливі погодні умови і освітлення, міські локації з великою кількістю перешкод, таких як будівлі і дерева, навколишній і фоновий шум, вітер, наявність сигналів бездротового зв'язку від джерел Wi-Fi і Bluetooth, відлуння птахів тощо, створюють унікальні виклики для кожного способу виявлення.

Література

1. Taha, B., & Shoufan, A. (2019). Machine learning-based drone detection and classification: State-of-the-art in research. *IEEE Access*, 7, 138626-138646.
2. Seidaliyeva, U., Ilipbayeva, L., Taissariyeva, K., & Smailov, N. (2023). Advances and challenges in drone detection and classification techniques: A state-of-the-art review. *Sensors*, 24(1), 125.
3. Rajendran, S., & Pollin, S. (2021). Combined RF-based drone detection and classification. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(2), 1575-1583.
4. Coluccia, A., Parisi, G., & Fascista, A. (2020). Detection and classification of multirotor drones in radar sensor networks: A review. *Sensors*, 20(15), 4172.
5. Mathematical and Algorithmic Support of Detection Useful Radiosignals in Telecommunication Networks. L. Khvostivska, M. Khvostivsky, V. Dunetc, I. Dediv. *CEUR Workshop Proceedings. 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, ITTAP 2022 Ternopil 22- 24 November 2022. Том 3309, с. 314-318.*
6. Дедів І.Ю., Атаманчук А.В. Метод виявлення та ідентифікації БПЛА з застосуванням нейронної мережі. Зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», (Тернопіль, 7-8 грудня 2022) – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2022. – с. 160-162.

11. **Nadiia SKLIAROVA, Tymophii LANEVYCH** **408**
 DEVELOPMENT AND MANAGEMENT STRATEGIES FOR THE ADMIN WEBSITE
12. **А. В. Островський, Р. І. Королюк** **409**
 ДОСЛІДЖЕННЯ ДАВАЧІВ ДЛЯ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ РОСОВОГО СТАНУ
 БДЖОЛОСІМ'І
13. **А. Луцків, А. Люлька** **410**
 ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ БЕЗПЕРЕРВНОГО ХЕШУВАННЯ У ПЛАНУВАННІ
 ВИКОНАННЯ ПОСЛІДОВНИХ ПРОЦЕСІВ
14. **А.В. Зінченко** **411**
 ТЕЛЕРАДІОЛОГІЯ ЯК НЕВІДЄМНА СКЛАДОВА ТЕЛЕМЕДИЦИНИ
15. **А.Є. Олексяк; В.М. Семисюк, В.В. Левицький** **413**
 ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ
16. **А.М. Ковтко; В.Б. Савків, І.Р. Козбур** **415**
 АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМИ ГЕНЕРАЦІЇ МОДУЛЬНИХ ТЕСТІВ НА ОСНОВІ
 ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА МУТАЦІЙНОГО ТЕСТУВАННЯ
17. **А.М. Паламар, І.І. Куляс, Ю.О. Тимошенко** **417**
 РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ ІОТ-СИСТЕМИ ДЛЯ ПІДТРИМКИ БЕЗПЕКИ
 ЛЮДЕЙ ПОХИЛОГО ВІКУ
18. **А.М. Паламар, О.Р. Вергун, М.Р. Франків** **418**
 КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА ІОТ-СИСТЕМА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ІОНІЗУЮЧОГО
 ВИПРОМІНЮВАННЯ
19. **О.В. Палка** **419**
 ІНФОРМАЦІЙНІ ПАНЕЛІ ЯК ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТРУМЕНТ
 ДЛЯ ВІДСТЕЖЕННЯ КРІ У РОЗУМНОМУ МІСТІ
20. **А.С. Луговий, Є.В. Тиш** **420**
 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ РОБОТИ ETL-ПРОЦЕСІВ В УМОВАХ ВИСОКИХ
 НАВАНТАЖЕНЬ
21. **Башняк В.Т., Дунець В.Л** **421**
 ДОСЯГНЕННЯ ТА ВИКЛИКИ ВИЯВЛЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИКІВ
22. **В.А. Готович, Д.В. Граб** **424**
 АКТУАЛЬНІСТЬ ЗАДАЧІ РОЗРОБКИ МОДУЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ
 УПРАВЛІННЯ ІТ-ПРОЄКТАМИ
23. **В.А. Готович, В.С. Бондаренко** **426**
 АКТУАЛЬНІСТЬ ЗАДАЧІ РОЗРОБКИ ДОДАТКУ ВІДЕОТРАНСЛЯЦІЇ ПІД
 МОБІЛЬНІ ПРИБОРИ НА БАЗІ ОПЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ANDROID
24. **В.А. Лабчук** **428**
 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКРАЩЕННЯ ШВИДКОСТІ ОБРОБКИ ДАНИХ У PLINQ В
 ПОРІВНЯННІ З LINQ ДЛЯ РІЗНИХ РОЗМІРІВ ВХІДНИХ ДАНИХ
25. **В.Г. Хомишин** **430**
 ЗАХИСТ ASP.NET CORE ВЕБ-ДОДАТКІВ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ SQL-КОДУ
26. **В.З. Шеремета, Р.О. Жаровський** **432**
 МЕТОДИ І ІНСТРУМЕНТИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ВЕБ-ДОДАТКІВ З
 ВИКОРИСТАННЯМ SPRING BOOT
27. **В.З. Шеремета, Р.О. Жаровський** **434**
 ВИКОРИСТАННЯ SPRING BOOT ТА ІНТЕГРАЦІЯ ДРУГОРЯДНИХ
 ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ СУЧАСНИХ ВЕБ-ДОДАТКІВ

Додаток Б

Таблиці з характеристиками систем керування, передачі даних та параметрами класифікації БПЛА

Таблиця Б.1. – Системи керування для БПЛА, частоти їх роботи та модуляції

Бренд	Частота	Модуляція	Технологія
DJI Phantom	2.4 ГГц /5.8 ГГц	FHSS/DSSS	FASST/Lightbridge
Futaba	2.4 ГГц	FHSS/DSSS	FASST
Spektrum	2.4 ГГц	FHSS/DSSS	DSMX
JR	2.4 ГГц	FHSS/DSSS	DMSS
Hitec	2.4 ГГц	FHSS/DSSS	AFHSS
Graupner	2.4 ГГц	FHSS/DSSS	HOTT
Yuneec	2.4 ГГц	DSSS	ZigBee
Parrot AR2		OFDM	Wi-Fi

Таблиця Б.2. – Поширені способи передачі відео для БПЛА, частоти та технології модуляції

Бренд	Частота	Модуляція	Технологія
DJI Phantom	2.4 ГГц	OFDM	Lightbridge/Wi-Fi
Immersion	2.4 ГГц	FM	
Yuneec	5.8 ГГц	OFDM	Wi-Fi
Connex	5.8 ГГц	OFDM	
Immersion	5.8 ГГц	FM	
Boscam	5.8 ГГц	FM	

Таблиця Б.3. – Поширені методи телеметрії, що використовуються БПЛА, їх частоти, а також техніки й технології модуляції

Частота	433 МГц	868 МГц	2,4 ГГц	5 ГГц
Керування	Hi	Hi	DSSS+FHSS/DSSS/OFDM	OFDM
Відео	Hi	Hi	OFDM	OFDM, FM
Телеметрія	Divers	OFDM	OFDM, DSSS	OFDM

Таблиця Б.4. – Опис структури модуля GNU Radio

Підкаталоги	Опис
apps	Містить повноцінні додатки, встановлені в системі, а також GRC-блоки
Cmake	Інструкції для автоінструментів, команда cmake для пошуку бібліотек GNU Radio
docs	Інструкції для вилучення документів з файлів на C++ та Python
lib	Сховище для вихідних файлів (.cc та .h), окрім Python
Swig	Інструкції для SWIG для створення інтерфейсів Python для класів C++
Python	Використовується для зберігання всіх файлів Python
Include	Містить заголовні файли C++ для експорту

Таблиця Б.5. – Основні параметри для класифікації OFDM-сигналів

Кількість піднесучих для даних	48
Кількість контрольних піднесучих	4
Частотний інтервал між піднесучими	156,2 кГц
Зайнята смуга	8,28125 МГц
Тривалість короткої тренувальної послідовності	16 мкс
Тривалість довгої тренувальної послідовності	16 мкс
Інтервал захисту для тренувальної послідовності	3,2 мкс
Тривалість преамбули PLCP	32 мкс
Тривалість інтервалу захисту	1,6 мкс
Тривалість символу POOFDM	8 мкс

Додаток В

Коди для оцінки і класифікації параметрів

```
/* -*- c++ -*- */

#ifdef HAVE_CONFIG_H
#include "config.h"
#endif
#include <gnuradio/io_signature.h>
#include "ofdm_param_estimation_c_impl.h"
#include <complex>
#include <volk/volk.h>

namespace gr {
namespace ofdm_param_estim {

ofdm_param_estimation_c::sptr
ofdm_param_estimation_c::make(double samp_rate, int signal, int
min_items,
                                const std::vector<int>& typ_len, const
std::vector<int>& typ_cp) {
    return gnuradio::get_initial_sptr(
        new ofdm_param_estimation_c_impl(samp_rate, signal,
min_items, typ_len, typ_cp));
}

/*
 * Приватний конструктор
 */
ofdm_param_estimation_c_impl::ofdm_param_estimation_c_impl(
    double samp_rate, int signal, int min_items, const
std::vector<int>& typ_len,
    const std::vector<int>& typ_cp)
    : gr::sync_block("ofdm_param_estimation_c",
        gr::io_signature::make(1, 1,
sizeof(gr_complex)),
        gr::io_signature::make(0, 0, 0)) // без
потoku виводу
{
    // Ініціалізація змінних
    d_samp_rate = samp_rate;
    d_signal = signal;
    d_min_items = min_items;
    d_typ_len = typ_len;
    d_typ_cp = typ_cp;
    d_fft = new fft::fft_complex(1024, true);

    // Визначення єдиного порту для передачі повідомлень
    message_port_register_out(pmt::string_to_symbol("ofdm_out"));
    // передача повідомлень на вихід
```

```

        // Налаштування портів для отримання повідомлень
        message_port_register_in(pmt::mp("in_ED")); // отримання
повідомлень від детектора енергії
        set_msg_handler(pmt::mp("in_ED"),

boost::bind(&ofdm_param_estimation_c_impl::message_handler_ED,
this, _1));
}

/*
* Віртуальний деструктор
*/
ofdm_param_estimation_c_impl::~ofdm_param_estimation_c_impl() {
    delete d_fft;
}

// Обробник вхідних повідомлень
void ofdm_param_estimation_c_impl::message_handler_ED(pmt::pmt_t
ed_msg) {
    if (pmt::is_tuple(ed_msg)) {
        if (pmt::length(ed_msg) != 2) {
            GR_LOG_ALERT(d_logger, boost::format("Помилка під час
розпакування PMT-команди: %s") % ed_msg);
            return;
        }
        d_signalAvg = pmt::to_double(pmt::tuple_ref(ed_msg, 0));
        d_Threshold = pmt::to_double(pmt::tuple_ref(ed_msg, 1));
    }
}

// Нормалізована функція автокореляції для заданого вектора
std::vector<float> ofdm_param_estimation_c_impl::autocorr(const
gr_complex* in, int len) {
    std::vector<float> acf;
    if (len == 0) {
        return acf;
    }

    GR_VLA(gr_complex, Rxx, len); // Масив змінної довжини для
проміжних розрахунків
    gr_complex acf_temp;
    for (unsigned int k = 0; k < d_typ_len.back(); k++) {
        acf_temp = 0;
        volk_32fc_x2_multiply_conjugate_32fc(Rxx, in, &in[k], len
- k); // Збереження (x * conj(x)) в Rxx

        // Сума всіх елементів масиву Rxx
        for (unsigned int i = 0; i < len - k; i++) {
            acf_temp += Rxx[i];
        }
        acf.push_back(std::abs(acf_temp / gr_complex((len - k),
0))); // Додавання нормалізованого результату до acf
    }
}

```

```

        return acf;
    }

    // Функція для встановлення частоти дискретизації
    void ofdm_param_estimation_c_impl::set_samp_rate(double samp_rate)
    {
        d_samp_rate = samp_rate;
    }

    // Функція для обчислення часової варіативної автокореляції з
    фіксованим зсувом
    gr_complex* ofdm_param_estimation_c_impl::tv_autocorr(const
    gr_complex* in, int len, int shift) {
        GR_VLA(gr_complex, corr_temp, len); // Масив змінної довжини
        для проміжних результатів
        gr_complex* Rxx = (gr_complex*)volk_malloc(len *
        sizeof(gr_complex), volk_get_alignment());
        gr_complex R = gr_complex(0, 0);

        volk_32fc_x2_multiply_conjugate_32fc(corr_temp, in,
        &in[shift], len);
        int k = 0;

        // Починаємо з кінця і сумуємо до початку
        for (int i = len - 1; i >= 0; i--) {
            R *= k;
            R += corr_temp[i];
            R *= 1.0 / (k + 1.0);
            Rxx[k] = R;
            k++;
        }

        return Rxx;
    }

    // Функція округлення значення до найближчого елементу зі списку
    int ofdm_param_estimation_c_impl::round_to_list(int val,
    std::vector<int>* list) {
        int result = -1;
        int diff = 99999; // "високе значення"

        for (unsigned int i = 0; i < list->size(); i++) {
            if (std::abs(list->at(i) - val) < diff) {
                diff = std::abs(list->at(i) - val);
                result = list->at(i);
            }
        }
        return result;
    }

    // Зміна розміру FFT
    void ofdm_param_estimation_c_impl::resize_fft(int size) {
        delete d_fft;
    }

```

```

    d_fft = new fft::fft_complex(size, true);
}

// Створення повідомлення GUI
pmt::pmt_t ofdm_param_estimation_c_impl::pack_message(float subc,
float time, int fft, int cp, double sig_avg, double threshold) {
    pmt::pmt_t subcarr =
pmt::make_tuple(pmt::string_to_symbol("Subc.space"),
pmt::from_float(subc));
    pmt::pmt_t symtime =
pmt::make_tuple(pmt::string_to_symbol("Sym.time"),
pmt::from_float(time));
    pmt::pmt_t fftsize =
pmt::make_tuple(pmt::string_to_symbol("Subcarriers"),
pmt::from_float(fft));
    pmt::pmt_t cyclpre =
pmt::make_tuple(pmt::string_to_symbol("CP.len"),
pmt::from_float(cp));
    pmt::pmt_t sigAvg =
pmt::make_tuple(pmt::string_to_symbol("Signal.Average"),
pmt::from_double(sig_avg));
    pmt::pmt_t thresh =
pmt::make_tuple(pmt::string_to_symbol("Threshold"),
pmt::from_double(threshold));

    pmt::pmt_t msg = pmt::make_tuple(subcarr, symtime, fftsize,
cyclpre, sigAvg, thresh);
    return msg;
}

// Основна робоча функція блоку
int ofdm_param_estimation_c_impl::work(int noutput_items,
gr_vector_const_void_star& input_items, gr_vector_void_star&
output_items) {
    const gr_complex* in = (const gr_complex*)input_items[0];

    if (noutput_items <= d_min_items) {
        return 0;
    }

    // Оцінка довжини FFT
    std::vector<float> acf = autocorr(in, noutput_items);
    int fft_len = std::distance(acf.begin(),
std::max_element(acf.begin() + d_typ_len.front(), acf.end()));
    fft_len = round_to_list(fft_len, &d_typ_len);

    // Обчислення часової варіативної автокореляції та циклічної
кореляції
    int shifted_fft_len = noutput_items - fft_len;
    resize_fft(shifted_fft_len);
    gr_complex* Rxx = tv_autocorr(in, shifted_fft_len, fft_len);

```

```

        memcpy(d_fft->get_inbuf(), Rxx, sizeof(gr_complex) *
shifted_fft_len);
        d_fft->execute();
        volk_free(Rxx);

        GR_VLA(float, result, shifted_fft_len); // Модуль CCF
        volk_32fc_magnitude_32f(result, d_fft->get_outbuf(),
shifted_fft_len);

        // Використання лише позитивних частот
        std::vector<float> Cxx(result + (shifted_fft_len / 2), result
+ shifted_fft_len);

        // Пошук піка
        long cp_len = std::distance(Cxx.begin(),
            std::max_element(Cxx.begin() + (int)(shifted_fft_len /
(fft_len + d_typ_cp.back()))),
                Cxx.begin() + (int)(shifted_fft_len /
(fft_len + d_typ_cp.front()))));

        cp_len = shifted_fft_len / cp_len;
        cp_len = cp_len - fft_len;
        cp_len = round_to_list(cp_len, &d_typ_cp);

        // Обчислення простору підканалів і часу символу та публікація
повідомлення
        float subspc = d_samp_rate / fft_len;
        float symtime = 1 / subspc;

        pmt::pmt_t msg = pack_message(subspc, symtime, fft_len,
cp_len, d_signalAvg, d_Threshold);
        message_port_pub(pmt::intern("ofdm_out"), msg);

        return noutput_items;
    }

} /* namespace ofdm_param_estim */
} /* namespace gr */

```

Додаток Г

Коди для оцінки виявлення енергії

```
#!/usr/bin/env python

import scipy
import scipy.special as scs
import numpy
from gnuradio import gr
import pmt

class EnergyDetector_ff(gr.decim_block):
    """Клас блоку Energy Detector ff"""
    def __init__(self, samples, Pfa):
        self.samples = samples
        gr.decim_block.__init__(
            self,
            name="EnergyDetector_ff",
            in_sig=[numpy.float32, numpy.float32],
            out_sig=[numpy.float32],
            decim=self.samples,
        )
        self.Pfa = Pfa
        self.message_port_register_out(pmt.intern("ED out"))
    def work(self, input_items, output_items):
        in0 = input_items[0]
        in1 = input_items[1]
        out = output_items[0]
        # <Обробка сигналу>
        Avg = scipy.mean(in0)
        signalAvg = round(Avg, 8)
        NoisePower = in1**2
        NoiseAvg = scipy.mean(NoisePower)
        var = scipy.var(NoisePower)
        stdev = scipy.sqrt(var)
        Qinv = scipy.sqrt(2) * scs.erfinv(1 - 2 * self.Pfa)
        Threshold = round((NoiseAvg + Qinv * stdev), 8)
        if signalAvg > Threshold:
            out[:] = signalAvg
            # print("Сигнал присутній", signalAvg)
            detection = 1
        else:
            out[:] = Threshold
            detection = 0
            # print("Сигнал відсутній", signalAvg)
        msg = pmt.make_tuple(pmt.from_double(signalAvg),
pmt.from_double(detection))
        self.message_port_pub(pmt.intern("ED out"), msg)
        return len(output_items[0])
```