

ДОДАТОК А

Графічний матеріал кваліфікаційної роботи

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Модель виявлення та класифікації радіочастотних сигналів

ВИКОНАВ:
Студент гр СПм-23-5 Северін І С

КЕРІВНИК:
доц. Мартовицький В.О.

ХАРКІВ
2025р.

Актуальність дослідження

- 📡 Радіочастотний спектр — обмежений ресурс, що активно використовується в телекомунікаціях, безпеці, БПЛА, IoT тощо.
- ⚠️ Зростання кількості джерел сигналів ускладнює їх ідентифікацію та моніторинг.
- 🗂️ Класичні методи виявлення сигналів малоефективні в умовах шуму та перекриття спектра.
- 🧠 Необхідні інтелектуальні моделі для:
 - автоматичного виявлення сигналів при низькому SNR;
 - класифікації типу сигналу та джерела;
 - оперативного реагування на загрози (спуфінг, завади, несанкціоновані передачі).
- 🛡️ Актуально для безпеки, спектрального моніторингу, оборони, 5G/6G, IoT.

Мета та завдання

🎯 Мета дослідження

Розробити та дослідити **модель виявлення і класифікації радіочастотних сигналів**, здатну працювати в реальному часі в умовах зашумленого спектра та великої кількості джерел сигналів.

☑️ Завдання дослідження

1. **Аналіз** особливостей поширених радіочастотних сигналів (типи модуляції, частоти, спектральні характеристики).
2. **Побудова алгоритмів** виявлення сигналів з урахуванням шуму та низького рівня SNR.
3. **Розробка методів класифікації** сигналів за типом, джерелом або стандартом.
4. **Моделювання та реалізація** системи виявлення у середовищі MATLAB/Python/GNU Radio.
5. **Експериментальне тестування** моделі з використанням дронів DJI (Phantom, Mavic) як джерел сигналів.
6. **Оцінка ефективності** моделі за критеріями точності, швидкодії та завадостійкості.

Методи виявлення безпілотників

🔍 1. Радіочастотний моніторинг (RF)

- Аналіз сигналів управління та телеметрії
- Виявлення на основі енергетичних характеристик
- SDR (Software-Defined Radio) + машинне навчання

📹 2. Відеоспостереження (optical/IR)

- Виявлення через камери та тепловізори
- Алгоритми обробки зображень / відео

🔊 3. Акустичні методи

- Аналіз шуму від пропелерів
- Застосування мікрофонних матриць і спектрального аналізу

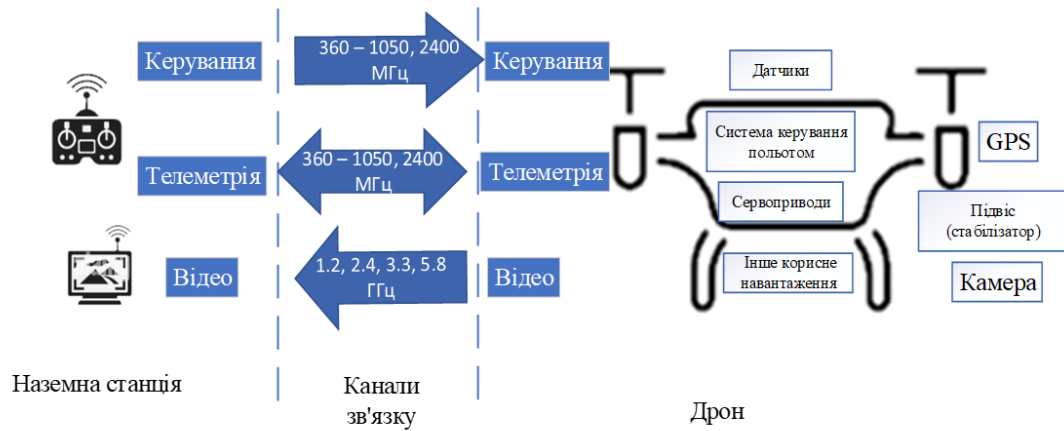
📡 4. Радіолокаційні системи

- Активне виявлення об'єктів у повітрі
- Можливість роботи в складних погодних умовах

🤖 5. Мультисенсорні системи

- Комбінування кількох методів (RF + відео + звук)
- Використання гібридних моделей глибокого навчання

Загальні принципи функціонування дрона



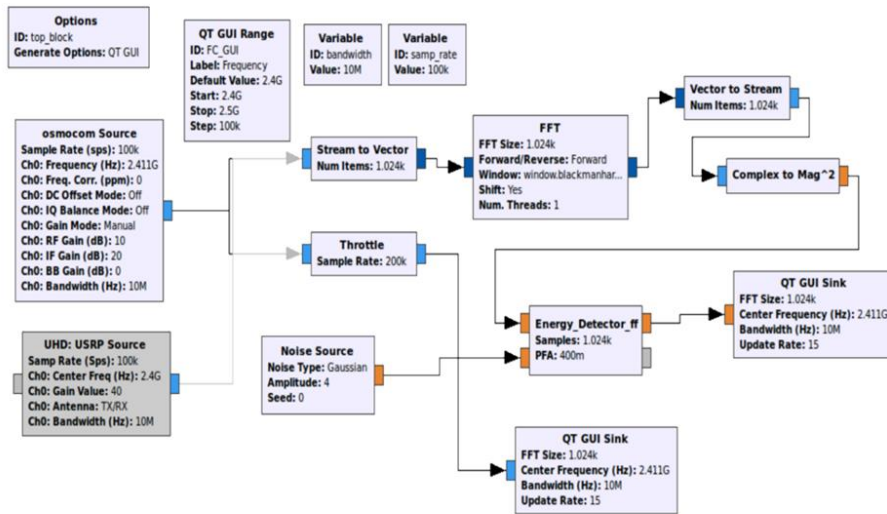
5

Популярні системи керування дронами, частоти їх роботи, а також використовувані методи модуляції та технології

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	2.4 ГГц	OFDM	Wi-Fi
Кастомні FPV	360 – 1050 МГц, 1.2 ГГц, 2.4 ГГц, 3.3 ГГц, 5.8 ГГц	FHSS	Lora

6

Блок-схема детектора енергії на GNU Radio



7

DJI Phantom та DJI Mavic



8

–Параметри, які дослідники використовують як ознаки для класифікації OFDM сигналу

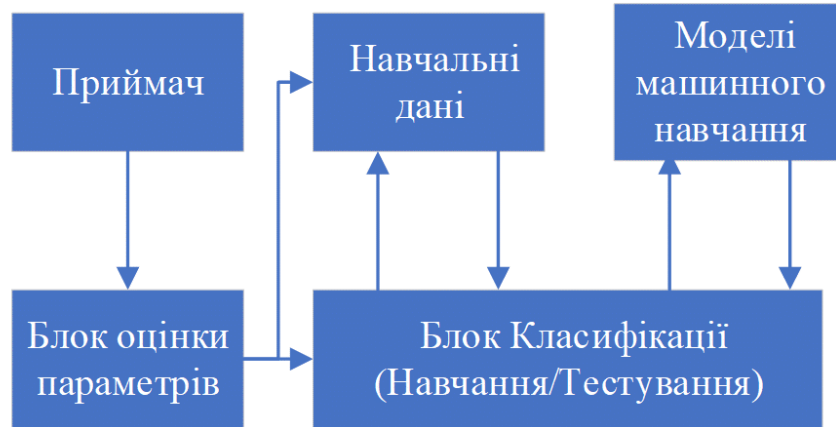
Параметр	Значення
Кількість піднесучих даних	48
Кількість пілотних піднесучих	4
Інтервал між піднесучими	156.2 кГц
Займана смуга частот	8.28125 МГц
Тривалість короткої тренувальної послідовності	16 мкс
Тривалість довгої тренувальної послідовності	16 мкс
Захисний інтервал тренувальної послідовності	3.2 мкс
Тривалість преамбули PLCP	32 мкс
Тривалість захисного інтервалу	1.6 мкс
Тривалість символу POFDМ	8 мкс

Етапи оцінки

1. Обчислення автокореляційної функції вхідного вектора для оцінки довжини піднесучих (FFT) за допомогою дискретної автокореляційної функції.

2. Обчислення ЦАФ (циклічної автокореляційної функції). Найпростіший спосіб обчислити ЦАФ полягає в тому, що вона є коефіцієнтом у розкладенні в ряд Фур'є автокореляції, що змінюється в часі, циклостационарного випадкового процесу (циклостационарного сигналу). Обчислення функції циклічної кореляції, що змінюється в часі, для знаходження довжини циклічного префікса.

3. Визначення інтервалу між піднесучими обчислюється наступним чином: $\text{sub-spc} = (\text{samplerate}/\text{FFTlength})$ та символний час $\text{symtime} = (1/\text{subspc})$.

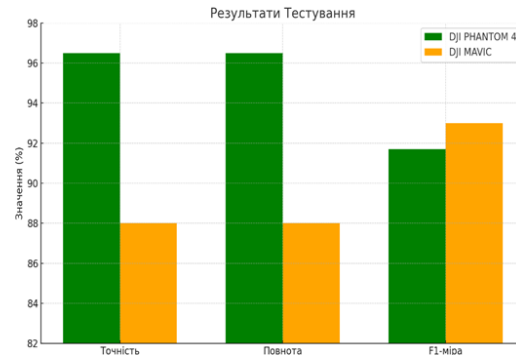


11

Subcarrier-Spacing	Symbol-time	fft-length	cp-length	Signal-Power	Detection	class
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

13

Результати роботи класифікатора



14

Висновки

На основі проведеного експерименту та отриманих результатів можна зробити висновок про ефективність застосування методів машинного навчання для класифікації сигналів, що передаються з дронів DJI Phantom та Mavic. Ретельний аналіз параметрів сигналу, таких як Subcarrier-Spacing, Symbol-time, fft-length, cp-length та Signal-Power, дозволив сформувати інформативний набір ознак, які були використані для побудови моделей класифікації.

Серед протестованих алгоритмів машинного навчання, найкращі результати продемонстрував метод K-найближчих сусідів (KNN), який забезпечив найвищі показники точності, повноти та F1-міри для обох класів дронів. Це свідчить про те, що KNN добре справляється з розпізнаванням навіть при мінімальних відмінностях у параметрах сигналів, що є характерним для пристроїв одного виробника.

Однак, попри високу якість класифікації, залишається простір для вдосконалення. Подальші дослідження будуть спрямовані на підвищення точності моделі, зокрема шляхом виявлення нових інформативних ознак на основі тестової статистики та аналізу вхідних сигналів. Це дозволить створити більш надійну систему розпізнавання, що може бути використана в реальних умовах, зокрема в системах безпеки, моніторингу повітряного простору або при виявленні несанкціонованих БПЛА.

Загалом, проведена робота демонструє потенціал інтеграції сучасних підходів машинного навчання в задачі класифікації сигналів від дронів, що відкриває нові перспективи у сфері радіомоніторингу та безпілотних технологій.