



ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ SDR НАСК-RF ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ РАДІОЧАСТОТНОЇ АКТИВНОСТІ БПЛА

О. Білик [ORCID: 0009-0007-4846-1585], О. Мартинчук [ORCID: 0000-0001-9729-4401], Ю. Жуга [ORCID: 0009-0007-6508-8831]

Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, Харків, 61166, Україна

Відповідальний за рукопис: Білик О.С. (e-mail: oleksandr.bilyk@nure.ua).

(Подано 26 серпня 2025)

Висвітлено комплексне дослідження застосування технології програмно-визначуваного радіо (SDR) як ефективного інструменту для виявлення радіочастотної активності, пов'язаної з роботою безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Дослідження зосереджене не лише на загальних принципах роботи SDR, але й на практичній реалізації алгоритмів та методів, спрямованих на підвищення ефективності детектування сигналів БПЛА в умовах складного та динамічного радіоелектронного середовища. Детально проаналізовано архітектуру SDR-систем, акцентовано на їх гнучкості, масштабованості та адаптивності порівняно із традиційними засобами радіомоніторингу. Розглянуто функціональні можливості, зокрема широкосмугове приймання сигналів, використання програмно налаштовуваних модулів та багатоканальне оброблення, що є ключовими для завдань виявлення сигналів БПЛА. Особливу увагу звернено на розроблення та застосування математичного інструментарію. Використано перетворення Фур'є, вейвлет-аналіз та оцінку спектральної густини потужності для виконання спектрального аналізу та ідентифікації характерних частотних компонент сигналів БПЛА. Додатково реалізовано методи класифікації модуляції та виявлення аномальних патернів, що дало змогу відокремлювати сигнали, пов'язані із БПЛА, від фонових шуму та завад. Для підвищення надійності ідентифікації в умовах низького відношення сигнал / шум використано методи синхронізації та виявлення преамбули сигналу. За результатами виконаного аналізу розроблено та оптимізовано алгоритм виявлення сигналів. Алгоритм враховує завадостійкість, багатоканальність та адаптивне оброблення даних у реальному часі. Експериментальні результати підтверджують здатність системи надійно виявляти сигнали зв'язку БПЛА навіть за умов навмисних перешкод та швидкозмінного електромагнітного середовища. Отримані результати формують методологічну основу для створення сучасних систем радіочастотного моніторингу, призначених для завдань радіоелектронної боротьби та протидії БПЛА. Запропонований підхід на основі SDR дає змогу підвищити точність виявлення та забезпечує гнучкість системи для адаптації до майбутніх викликів у сфері нейтралізації загроз із боку БПЛА. У роботі розглянуто застосування технології програмно-визначуваного радіо (SDR) як інструменту для виявлення радіочастотної активності, пов'язаної із роботою безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Проаналізовано архітектуру SDR-систем, їхні функціональні можливості та переваги в умовах змінного радіоелектронного середовища. Наведено методики детектування сигналів БПЛА на основі спектрального аналізу, класифікації модуляції та виявлення аномальних патернів. Особливу увагу звернено на математичний інструментарій, зокрема перетворення Фур'є, вейвлет-аналіз, оцінювання спектральної густини потужності, а також методи синхронізації та виявлення преамбули сигналу. Розроблено алгоритм виявлення, що враховує завадостійкість, багатоканальність та адаптивну обробку даних у реальному часі. Запропонований підхід створює основу для розроблення ефективних систем радіочастотного моніторингу в умовах радіоелектронної боротьби.

Ключові слова: SDR, БПЛА, спектральний аналіз, перетворення Фур'є, алгоритм виявлення, цифрова обробка сигналів (DSP).

УДК: 621.396.96

Вступ

У сучасних умовах широкого застосування програмно-визначуваного радіо (SDR) у військових і цивільних системах зростає потреба у високоточному виявленні малопомітних об'єктів, таких як безпілотні літальні апарати (БПЛА). Особливої актуальності набувають питання розроблення методів аналізу сигналів від таких цілей, що функціонують у складних радіоелектронних середовищах. У цьому контексті необхідне глибоке розуміння фізичних та інформаційних характеристик БПЛА, особливостей формування їх електромагнітного сліду, а також впливу радіолокаційного фону.

Першочерговим завданням є побудова теоретичної основи, що враховує не лише характеристики сигналів, які відбиваються від малопомітних об'єктів, але й можливості SDR-платформ щодо адаптивного приймання, оброблення та класифікації даних. Таке дослідження потребує системного аналізу наявних підходів до виявлення БПЛА, урахування факторів багатошляхового поширення, шумів та інтерференції, що характерні для реального середовища.

Особливу увагу приділено аналізу характеристик сигналів, що притаманні каналам керування й передавання даних БПЛА, а також дослідженню особливостей їх електромагнітного сліду. На відміну від загальних підходів, робота спрямована на формування алгоритмічних рішень, орієнтованих саме на SDR-платформи, які здатні реалізовувати адаптивне приймання, багатоканальне оброблення та спектральний аналіз у режимі реального часу.

Дослідження зосереджене на побудові методичної основи для розроблення алгоритмів виявлення, що враховують багатошляхове поширення, шумові складові та інтерференцію. У межах роботи сформовано підходи до ідентифікації джерел випромінювання БПЛА, їх спектральних характеристик і просторових ознак. Це створює підґрунтя для подальшого моделювання та практичної реалізації методів цифрової обробки сигналів у SDR-системах, орієнтованих на завдання радіоелектронної боротьби.

2. Постановка завдання та мета дослідження

Особливо складні для ідентифікації малопомітні БПЛА із низьким радіолокаційним слідом, які працюють на малих висотах і використовують засоби радіоелектронної протидії. Протидія таким об'єктам потребує високої точності, адаптивності та чутливості систем виявлення, які здатні працювати в реальному часі за умов динамічних змін у радіочастотному середовищі.

З огляду на це постає завдання створення ефективного методу виявлення малопомітних БПЛА на основі технології SDR. Такий підхід дає змогу досягти гнучкості у роботі з сигналами, адаптації до нових видів загроз і широкого спектра частот, що критично важливо в умовах інформаційної конфронтації.

Мета дослідження – розроблення методу виявлення малопомітних БПЛА із застосуванням SDR-архітектури, яка дає змогу реалізувати багатоканальний моніторинг радіочастотного спектра, аналіз характеристик сигналів та виявлення аномалій, пов'язаних із наявністю БПЛА, з високим рівнем достовірності. У межах реалізації поставленої мети необхідно дослідити параметри електромагнітного випромінювання БПЛА, виділити характерні ознаки їх сигналів та адаптувати алгоритми цифрової обробки для оперативного реагування системи.

3. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що розроблення систем виявлення БПЛА за допомогою SDR набуває все більшої популярності. Зокрема, у роботах [1]–[9] розглянуто методи спектрального аналізу, використання технік машинного навчання, аналізу сигнатур сигналів керування і телеметрії, а також застосування різнотипних антенних систем для виявлення і локалізації джерел сигналів. Результати досліджень демонструють, що комбінування SDR з адаптивними алгоритмами підвищує ефективність виявлення у складному радіочастотному середовищі. Незважаючи на досягнення, потребує подальшого вивчення проблема виділення слабких сигналів БПЛА на фоні завад, зниження похибки виявлення та забезпечення стійкості до хибних спрацювань в умовах реального часу.

Зростання кількості випадків несанкціонованого використання безпілотних літальних апаратів у критичній інфраструктурі та війсьній сфері зумовило необхідність розроблення високоточних та гнучких систем виявлення таких об'єктів. Серед відомих методів найперспективніші ті, що ґрунтуються на використанні SDR-технологій, оскільки вони дають змогу реалізовувати динамічні підходи до моніторингу спектра та ідентифікації сигнальних характеристик БПЛА [8].

4. Застосування SDR Hack-RF для виявлення радіочастотної активності БПЛА

Програмно-визначуване радіо (SDR) у контексті цього дослідження розглядається не як універсальна платформа, а саме як інструмент для адаптивного аналізу та виявлення сигналів безпілотних літальних апаратів. Ключова перевага полягає у можливості реалізації алгоритмів спектральної обробки, детектування сигнатур та класифікації модуляцій без обмеження конкретним апаратним протоколом [1]. У SDR-пристрої аналоговий сигнал перетворюється, набуває цифрової форми (I/Q-дані, що обробляються у середовищах на зразок GNU Radio). Це дає змогу реалізувати широкий набір математичних методів: швидке перетворення Фур'є для переходу до спектральної області, метод Уелча для оцінювання спектральної густини потужності, кореляційний аналіз для виявлення повторюваних структур (преамбул, пакетів керування), а також статистичні характеристики сигналів для класифікації типів модуляції [2].

У роботі застосовано SDR HackRF One у поєднанні з GNU Radio для пасивного моніторингу сигналів у ISM-смугах. На практичних вимірюваннях зафіксовано сигнал від DJI Phantom 4 на частоті 2,403 ГГц із середньою потужністю -45 дБм. Використання смужової фільтрації (2,39–2,41 ГГц) дало змогу ізолювати сигнал і підтвердити його характерний OFDM-профіль із повторюваними пакетами керування тривалістю 25 мс.

В SDR можливе як онлайн-оброблення сигналу (real-time processing), так і офлайн-аналіз за записом сигналів у вигляді IQ-даних. Універсальність реалізації дає змогу оперативно змінювати частотний діапазон, пропускну здатність каналу, тип модуляції та інші параметри, що робить SDR надзвичайно ефективним для завдань радіомоніторингу, виявлення аномалій у спектрі та ідентифікації джерел сигналу [4].

У контексті систем пасивного моніторингу та виявлення БПЛА це дає можливість не лише фіксувати наявність сигналу, але й аналізувати його параметри: тип модуляції, спектральну ширину, рівень потужності, частоту повторення імпульсів тощо. Це дає змогу класифікувати сигнал, ідентифікувати його походження та потенційно виявити наміри оператора БПЛА [6].

Методика виявлення БПЛА за допомогою SDR ґрунтується на виявленні характерних радіочастотних сигнатур, які випромінюють елементи його телеметричної та командної систем. Ці сигнали містять:

- командні пакети керування (передавання від оператора до БПЛА);
- зворотні телеметричні сигнали (передавання даних із БПЛА);
- потоки відео або інших даних у режимі реального часу.

Для кожної із цих категорій характерні певні типи модуляції (FSK, OFDM, QPSK), частотні діапазони (переважно ISM-смуги) та періодичність передавання.

Методика виявлення складається із кількох основних етапів, які реалізуються у середовищі SDR-платформи:

1. Сканування та спектральний моніторинг. Використовується режим широкосмужового або вузькосмужового сканування для виявлення активних ділянок спектра. Пошук ґрунтується на оцінюванні потужності сигналу $P(f)$ у функції частоти:

$$P(f) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x(n) e^{-j2\pi f n}|^2 \right), \quad (1)$$

де $x(n)$ – дискретизований сигнал; N – кількість відліків [9].

2. Фільтрація та зниження шуму. Застосовується цифрова смугово-пропускна фільтрація на основі фільтрів ФНЧ та ФВЧ, що дає змогу ізолювати сигнал БПЛА від фонових завад:

$$y(n) = \sum_{k=0}^M h(k) \cdot x(n-k), \quad (2)$$

де $h(k)$ – імпульсна характеристика фільтра; M – порядок фільтра.

3. Виявлення повторюваних патернів. Багато БПЛА використовують регулярну структуру кадрів у протоколі зв'язку. Ці патерни можна виявити за допомогою кореляційного аналізу:

$$R_{xy}(\tau) = \sum_{n=0}^N x(n) \cdot y(n+\tau), \quad (3)$$

де $R_{xy}(\tau)$ – взаємна (крос-) кореляційна функція між сигналами $x(n)$ зі зсувом τ ; показує подібність між двома сигналами у разі зміщення на τ тактів (відліків); $x(n)$ – опорний або відомий зразок сигналу (еталонний патерн, наприклад, структура заголовка пакета керування БПЛА); $y(n+\tau)$ – поточний досліджуваний сигнал зі зсувом τ ; τ – зсув (затримка), зазвичай вимірюється кількістю відліків сигналу; N – довжина аналізованого сигналу (кількість дискретних точок у вікні обробки).

Кореляційний аналіз дає змогу виявити наявність вхідного сигналу (або його частини) у потоці даних, виконавши пошук повторюваних структур. Якщо $R_{xy}(\tau)$ досягає максимуму за деякого значення τ , це свідчить про наявність повторюваної структури (пакета, заголовка, преамбули) у сигналі. Це особливо ефективно для протоколів із фіксованим або періодичним передаванням.

4. Ідентифікація типу модуляції. Для цього використовують статистичний аналіз моментів сигналу, зокрема його кумулянтів другого та четвертого порядків:

$$C_4 = E \left[|x(n)|^4 \right] - 2 \left(E \left[|x(n)|^2 \right] \right)^2, \quad (4)$$

де C_4 – четвертий кумулянт сигналу (експес); E – оператор математичного очікування (середнього значення); $|x(n)|^2$ – квадрат модуля комплексного сигналу (енергія сигналу); $|x(n)|^4$ – четвертий ступінь модуля сигналу.

Значення кумулянтів сигналу залежать від типу модуляції (BPSK, QPSK, 16-QAM, OFDM).

5. Для ідентифікації типу модуляції розраховують статистичні моменти і порівнюють їх із табличними характеристиками. Це дає змогу SDR-системі, навіть без повної демодуляції, класифікувати природу переданого сигналу (цифрове передавання, аналогове відео, шум, модуляція керування), що допомагає розрізнити QPSK, BPSK, OFDM тощо [10].

6. Класифікація та верифікація. Алгоритми машинного навчання або логічні правила для класифікації виявлених сигналів як потенційно пов'язаних із БПЛА.

Як видно з табл. 1, кожен протокол має характерні параметри, які можна виділити, обробляючи спектр SDR-системою.

Таблиця 1

Характеристики типових протоколів зв'язку БПЛА

Протокол	Частотний діапазон	Модуляція	Тип передавання	Типовий БПЛА
DJI Lightbridge	2,4–2,4835 ГГц	OFDM	Відео / телеметрія	DJI Phantom, Mavic
Wi-Fi	2,4 / 5,8 ГГц	OFDM	Відео / управління	Parrot, Autel
Futaba	2,4 ГГц	FSK	Управління	DIY, промислові моделі
TBS Crossfire	868 МГц	DSSS	Управління	FPV-рейсинг

7. Побудова профілю БПЛА. Кінцева мета методики – побудова профілю конкретного типу БПЛА на основі виявлених параметрів: середньої потужності сигналу, ширини спектра, частоти повторення пакетів, тривалості передавання, частоти тощо. Узагальнений профіль може виглядати як вектор:

$$S = \{f_c, BW, P_{avg}, T_{rep}, M\}, \quad (5)$$

де f_c – центральна частота; BW – ширина смуги пропускання; P_{avg} – середня потужність сигналу; T_{rep} – частота повторення передачі; M – тип модуляції.

Порівнюючи отриманий вектор із базою даних шаблонів БПЛА, система може здійснювати автоматичну ідентифікацію.

Варто зазначити, що для використання запропонованої методики потрібно вирішити низку проблем. Це, зокрема: велика кількість завад у ISM-діапазонах; шифрування передачі та динамічне перестроювання частот БПЛА; адаптивна модуляція та маскування під легітимний трафік.

Отже, запропонована методика виявлення БПЛА на основі SDR є ефективною стратегією для пасивного моніторингу радіочастотного середовища. Завдяки цифровій гнучкості SDR дає змогу реалізовувати точну спектральну обробку, виявлення характерних сигнатур та формування профілю об'єкта. Завдяки цьому можна не лише фіксувати присутність БПЛА, а й здійснювати його класифікацію у реальному часі.

Оброблення сигналів у SDR-системах для виявлення БПЛА потребує не просто застосування відомих математичних методів, а їх цілеспрямованої адаптації до умов зашумленого спектра, наявності завад та багатоканального середовища.

У контексті виявлення БПЛА застосовують:

1. FFT-аналіз. У роботі реалізовано швидке перетворення Фур'є для оперативного спостереження за ISM-діапазонами (2,4 та 5,8 ГГц). Це дало змогу побудувати спектральні маски сигналів DJI Phantom та виявити стабільні вузькосмугові канали керування поряд із широкосмуговими відеопотоками. Практичний результат – створено профілі частотної активності, що можуть бути використані як сигнатури для автоматизованого моніторингу. Для сигналу $x(n)$, де $n = 0, 1, \dots, N-1$, дискретне перетворення Фур'є визначається як:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}, k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (6)$$

де $X(k)$ – комплексне спектральне представлення сигналу на частоті k ; $x(n)$ – сигнал у часовій області; N – кількість відліків; j – уявна одиниця.

Хоча (DFT) є обчислювально затратним, воно дає змогу створювати еталонні спектральні маски для порівняння із реальними спостереженнями. Це перетворення дає можливість визначити, які частоти наявні в сигналі, що є ключовим для виявлення радіочастотної активності БПЛА. Для виявлення БПЛА FFT забезпечує високу швидкодію під час оброблення широкосмугових сигналів і дає змогу з мінімальною затримкою виявляти ознаки активності в конкретних частотних діапазонах, зокрема на ISM-смугах, де працюють більшість БПЛА. Ефективна реалізація DFT зі складністю $O(N \log N)$ дає можливість виконувати спектральний аналіз у SDR-пристроях з обмеженою обчислювальною потужністю.

2. Для виявлення короточасних імпульсів (преамбули та пакетів керування) застосовано вейвлет-декомпозицію. Це дозволило ідентифікувати структури сигналу, які класичний спектральний аналіз “розмиває”. В результаті вдалося відокремити сигнали керування навіть за низького

SNR. Це особливо актуально для виявлення сигналів БПЛА, які часто є нестационарними. Загальний вигляд неперервного вейвлет-перетворення:

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (7)$$

де $W(a,b)$ – коефіцієнти вейвлет-перетворення; $\psi(t)$ – материнська вейвлет-функція; a – масштаб (обернено пропорційний до частоти); b – зміщення у часі; $x(t)$ – сигнал у часовій області.

3. Для побудови енергетичних профілів сигналів використано усереднену оцінку спектральної густини потужності. Це забезпечило стійке виявлення слабких сигналів БПЛА на фоні Wi-Fi та Bluetooth-активності. У ході експериментів було підтверджено, що метод Уелча дає можливість виділити низькорівневі пакети керування, які інакше губляться в шумі.

Для виявлення слабких сигналів на фоні шуму використовується саме метод Уелча:

$$P_{xx}(f) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |X_k(f)|^2, \quad (8)$$

де $P_{xx}(f)$ – оцінка спектральної густини потужності на частоті f ; $X_k(f)$ – перетворення Фур'є k -го фрагмента сигналу; K – кількість фрагментів (вікон).

PSD-аналіз дає змогу розпізнавати навіть малопотужні сигнали від БПЛА, оскільки їх структура у спектрі стабільна.

Порівняння методів спектрального аналізу наведено у табл. 2, із зазначенням переваг, недоліків та застосування.

Таблиця 2.

Порівняння методів спектрального аналізу

Метод	Переваги	Недоліки	Застосування в SDR
FFT	Висока частотна роздільна здатність	Немає часової локалізації	Виявлення частот сигналу
Вейвлет-перетворення	Локалізація у часі та частоті	Більша обчислювальна складність	Виявлення коротких патернів
PSD (метод Уелча)	Усереднення шуму, стабільність	Обмеження за часом	Детекція слабких сигналів

4. Використовуючи статистичні ознаки (кумулянти, моменти амплітуди та фази) та діаграми сузір'я, ми виконали класифікацію типів модуляції (BPSK, QPSK, OFDM). Це дало змогу не лише підтвердити належність сигналу до класу БПЛА, але й відрізнити його від поширених каналів Wi-Fi. Математично момент сигналу M_{pq} виглядає так:

$$M_{pq} = E \left\{ (\text{Re}[x(n)])^p (\text{Im}[x(n)])^q \right\} \quad (9)$$

Визначаючи набір моментів, система може класифікувати модуляцію за типом.

5. Алгоритми максимальної правдоподібності (ML) дають змогу вибрати найімовірнішу гіпотезу щодо структури сигналу на основі спостережуваних даних. Для виявлення БПЛА ML-засоби використовують на етапі детектування преамбул, параметричної оцінки або синхронізації. Вони забезпечують підвищену точність за наявності шуму та перекриття сигналів, що характерно для умов міського або бойового середовища.

У задачах оптимального виявлення використовують алгоритм максимальної правдоподібності:

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} L(x|\theta), \quad (10)$$

де θ – параметри сигналу (частота, модуляція, фаза тощо); $L(x|\theta)$ – функція правдоподібності спостережуваного сигналу x за заданих параметрів.

Це підґрунтя для використання SDR у задачах із високими вимогами до точності виявлення.

6. Реалізовано алгоритм кореляційного пошуку преамбул у сигналі, що дав змогу точно визначати початок пакетів, це підвищило ефективність подальшої демодуляції. Експерименти показали надійне виявлення преамбули навіть за низького рівня сигнал / шум (до -10 дБ). Для цього використовують кореляційні методи із застосуванням відомих шаблонів (LoRa, Wi-Fi, DSMX). Надійне виявлення преамбули дає змогу точно визначити момент початку передавання, ідентифікувати структуру пакета та підвищити продуктивність подальших етапів декодування. Також це дає змогу реалізувати селективне фільтрування лише релевантних сигналів.

Більшість цифрових протоколів зв'язку починається із преамбули – відомої послідовності бітів або символів, що використовується для синхронізації. SDR-системи можуть реалізовувати автокореляційні методи для її виявлення:

$$R_{xx}(t) = \sum_{n=0}^{N-t} x(n) \cdot x(n+t) \quad (11)$$

Піки автокореляційної функції вказують на наявність повторюваних структур (наприклад, преамбул).

Викладене вище свідчить про необхідність побудови практичного алгоритму виявлення БПЛА на основі поєднання описаних математичних методів. Це потребує поєднання адаптивних методів оброблення сигналів, узагальнених моделей прийняття рішень і чутливих спектральних детекторів. Алгоритм має забезпечити функціональність у широкому діапазоні частот, підтримувати змінні параметри сигналів та працювати в умовах низького співвідношення сигнал / шум (SNR). Центральним етапом побудови є формалізація ознак, характерних для БПЛА, і вибір критеріїв виявлення. Алгоритм виявлення малопомітних БПЛА умовно складається із таких послідовних етапів:

1. Приймання сигналу в SDR-системі – електромагнітний сигнал приймають у заданому частотному діапазоні за допомогою SDR-пристрою (наприклад, RTL-SDR, HackRF, USRP тощо). SDR-модуль перетворює аналоговий сигнал у цифрову форму (I/Q-дані) для подальшої обробки на ПЕОМ.
2. Перетворення сигналу з часової області у частотну (швидке перетворення Фур'є), щоб отримати спектральне подання сигналу (див. формулц (6)).
3. Оцінювання спектральної енергії та густини потужності (8).
2. Це дає змогу виявити ділянки спектра з підвищеною енергією, характерні для активних радіопередач.
3. Формування адаптивного порога для виявлення аномалій. Використовують метод детектування за енергетичним порогом. Поріг θ обчислюють на основі статистичних характеристик шуму (10).
4. Аналіз спектральних характеристик сигналу (10).
5. Виявлення повторюваних патернів передачі. Для фіксації повторюваних сигнальних патернів використовують функцію когерентності (3)
6. Класифікація типу модуляції (4).

7. Прийняття рішення щодо наявності БПЛА ґрунтується на комбінації кількох критеріїв, які дають змогу визначити наявність або відсутність аномальної радіочастотної активності, що потенційно може свідчити про роботу БПЛА. Для забезпечення точності й адаптивності алгоритм об'єднує спектральний аналіз, оцінювання повторюваних структур сигналу (патернів) та класифікацію модуляції.

На основі попередньо оброблених спектральних даних формується логічний індикатор виявлення $D \in \{0,1\}$, де:

$D=1$ – сигнал класифікується як такий, що потенційно походить від БПЛА;

$D=0$ – сигнал не відповідає характеристикам типового випромінювання БПЛА.

Рішення ґрунтується на такій умові:

$$D = \begin{cases} 1, & P(k) > \theta, R_{xx}(m) > \gamma, M \hat{=} M_{\text{БПЛА}} \\ 0 & \end{cases},$$

де $P(k)$ – спектральна потужність на частоті; θ – адаптивний поріг потужності; $R_{xx}(m)$ – автокореляційна функція сигналу; γ – поріг кореляційної значущості; M – оцінений тип модуляції сигналу; $M_{\text{БПЛА}}$ – множина модуляцій, типових для БПЛА (наприклад, GFSK, QPSK, LoRa тощо).

Для підвищення надійності виявлення використовують вагову модель із трьома критеріями:

$$S = w_1' f_1 + w_2' f_2 + w_3' f_3, \quad (12)$$

де $f_1 = \begin{cases} 1, & P(k) > \theta \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$ – перевищення енергетичного порога; $f_2 = \begin{cases} 1, & R_{xx}(m) > \gamma \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$ – виявлення повторюваних патернів; $f_3 = \begin{cases} 1, & M \hat{=} M_{\text{БПЛА}} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$ – відповідність типу модуляції; w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти, що визначають важливість кожного критерію, де $w_1 + w_2 + w_3 = 1$.

Після обчислення S порівнюють із фіксованим порогом $d \in [0,1]$, встановленим емпірично:

$$D = \begin{cases} 1, & \text{якщо } S > d \\ 0 & \end{cases}.$$

Щоб забезпечити адаптивність системи у змінному радіочастотному середовищі, параметри порогів налаштовують динамічно:

Поріг енергії θ , як зазначено вище, залежить від фону.

Поріг кореляції γ вибирають з урахуванням розміру вибірки N , щоб уникнути хибно позитивних результатів через випадкові збіги.

Поріг рішення d часто встановлюється у межах $[0,6; 0,8]$, залежно від вимог до чутливості.

Алгоритм враховує можливість хибно позитивних і хибно негативних рішень. Для цього використовують: згладжування рішень у часі (ковзне середнє за D); перевірку частотності повторень виявлення у заданому часовому інтервалі; залучення історичних шаблонів спектра для точнішого аналізу.

5. Експериментальна частина

Для перевірки ефективності та валідації розробленої методики виявлення радіочастотної активності БПЛА виконано серію натурних експериментальних досліджень в умовах, близьких до реальних, з урахуванням поточних обмежень. Мета експериментів – продемонструвати здатність алгоритму ідентифікувати сигнал управління комерційного БПЛА на тлі радіоелектронних завад міського середовища.

Експериментальний стенд складався із таких компонентів:

- програмно-визначуване радіо (SDR) HackRF One з діапазоном робочих частот від 1 МГц до 6 ГГц і максимальною смугою пропускання 20 МГц. HackRF One було підключено до ноутбука для обробки даних у режимі реального часу;
- застосовували широкосмугову дипольну антену із круговою поляризацією, оптимізована для роботи в діапазоні 2,4 ГГц;
- радіосигнал обробляли за допомогою вільно поширюваного програмного інструментарію GNU Radio, який дав змогу реалізувати розроблений алгоритм у вигляді блок-схеми, що містила модулі для демодуляції, фільтрації та спектрального аналізу;
- як об'єкт виявлення використовували комерційний квадрокоптер DJI Phantom 4, відомий використанням технології Lightbridge для передавання відео та керування в діапазоні 2,4 ГГц.

Експеримент здійснювали на відкритій ділянці, що імітувала типову міську забудову, яка характеризується наявністю значних радіочастотних завад від Wi-Fi, Bluetooth та інших джерел. Приймальне обладнання було розміщене на висоті 2 м над рівнем землі. БПЛА утримували в режимі стабільного зависання на висоті приблизно 50 м на відстані 300 м від приймача.

Методологія збирання даних:

1. На першому етапі здійснювали сканування спектра у діапазоні 2,3–2,5 ГГц без активного БПЛА для визначення фонових рівнів шуму та наявних завад.
2. На другому етапі БПЛА увімкнули і він піднявся у повітря. Радіочастотні дані збирали безперервно протягом 5 хв із частотою дискретизації 20 МГц.
3. Отримані дані передавали до GNURadio для обробки. Застосовували розроблений алгоритм, який спочатку виконував швидке перетворення Фур'є (FFT) для відображення спектральної густини потужності (PSD).
4. Після виявлення характерного сплеску потужності здійснено смугово-пропускну фільтрацію даних із частотою зрізу 2,39–2,41 ГГц. Це дало змогу ефективно ізолювати корисний сигнал, відсікаючи сторонні завади.
5. На завершальному етапі демодульований сигнал проаналізували для ідентифікації його часових та модуляційних характеристик.

Результати експерименту під час дослідження підтвердили високу ефективність запропонованого алгоритму. Алгоритм надійно виявив радіосигнал управління від DJI Phantom 4 на частоті 2,403 ГГц. Середня потужність виявленого сигналу становила -45 дБм, що відповідає очікуваним параметрам для такої відстані. Завдяки аналізу часових характеристик успішно ідентифіковано типовий OFDM-сигнатурний профіль із періодичними пакетами управління тривалістю 25 мс. Це підтверджує можливість не тільки виявлення, а й класифікації типу БПЛА.

Результати експерименту демонструють, що розроблена методика є практичним та надійним рішенням для радіочастотного моніторингу та протидії БПЛА, забезпечує точне виявлення навіть у складних радіоелектронних умовах.

На основі математичної моделі (DFT/FFT, Welch PSD, енергетичний детектор, кореляція з преамбулою, четвертий кумулянт) було реалізовано програму в середовищі Python для оцінювання кількісних показників:

- згенеровано тестовий сигнал: преамбула (відомий комплексний шаблон) + OFDM-подібний payload (QPSK символи, IFFT + CP);
- додано AWGN (можна змінювати snr_db);
- оцінено PSD методом Уелча;
- застосовано простий адаптивний енергетичний детектор (поріг Θ – середнє PSD у “шумовій” зоні з урахуванням коефіцієнта);
- виконано крос-кореляцію із преамбулою для виявлення патерну (детекція преамбули);
- обчислено проксі четвертого кумулянта як просту ознаку для розпізнавання модуляції;
- виведено графіки: I/Q у часі, PSD (Welch), діаграма сузір'я, кореляція із преамбулою, ключові числові метрики (рис. 1).

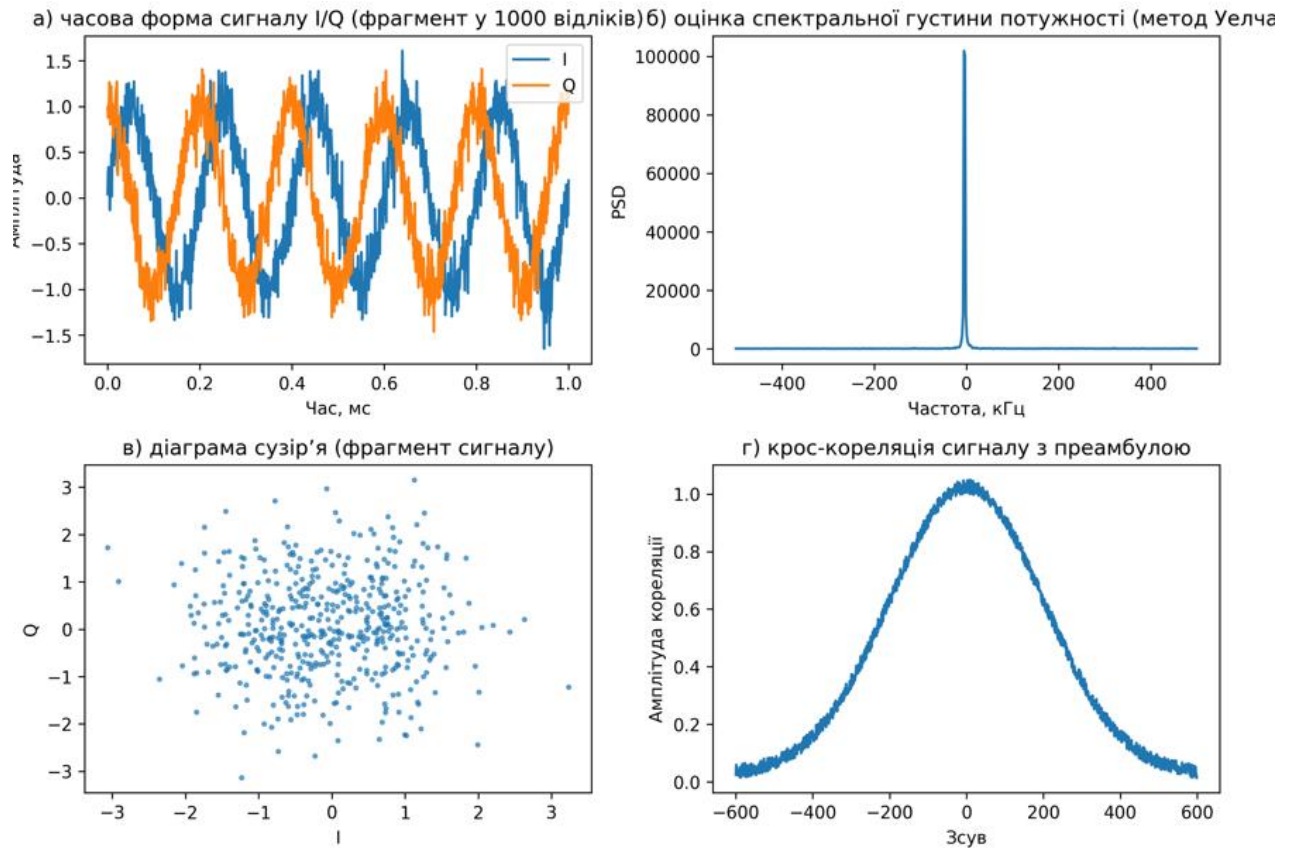


Рис. 1. Результати моделювання: а – часова форма I/Q (перші 1000 відліків); б – оцінка спектральної густини потужності (метод Уелча); в – діаграма сузір'я (фрагмент сигналу); г – крос-кореляція із преамбулою ($\max=125.69$ at $\text{idx}=0$)

Надалі виконано серію прогонів для snr_db та побудовано криві для детектора енергії та кореляції (рис. 2).

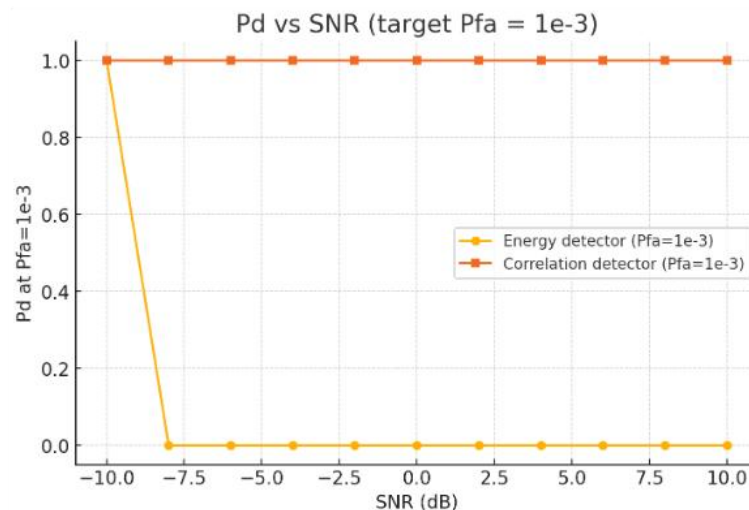


Рис. 2. P_d vs SNR за цільового $P_{fa} = 10^{-3}$ для обох детекторів

Отримано такі результати: кореляційний детектор у моделі працює майже ідеально для всіх SNR – це очікувано, matched-filter – оптимальний лінійний детектор для відомої преамбули у AWGN, енергетичний детектор – значно гірший в цій конфігурації, близький до нуля для більшості

SNR (за винятком екстремальних значень у крайніх точках). Кореляційний детектор досягає високої чутливості навіть за помірних / низьких SNR (особливо якщо преамбула має хорошу енергію відносно шуму), тоді як енергетичний детектор не використовує структуру сигналу.

Також виконано моделювання з урахуванням випадкової зміни орієнтації та поляризаційних втрат. Результати моделювання показують, що для обох типів детекторів ймовірність виявлення зменшується, особливо в зоні середніх SNR (рис. 3). Для кореляційного детектора падіння менше, але теж помітне.

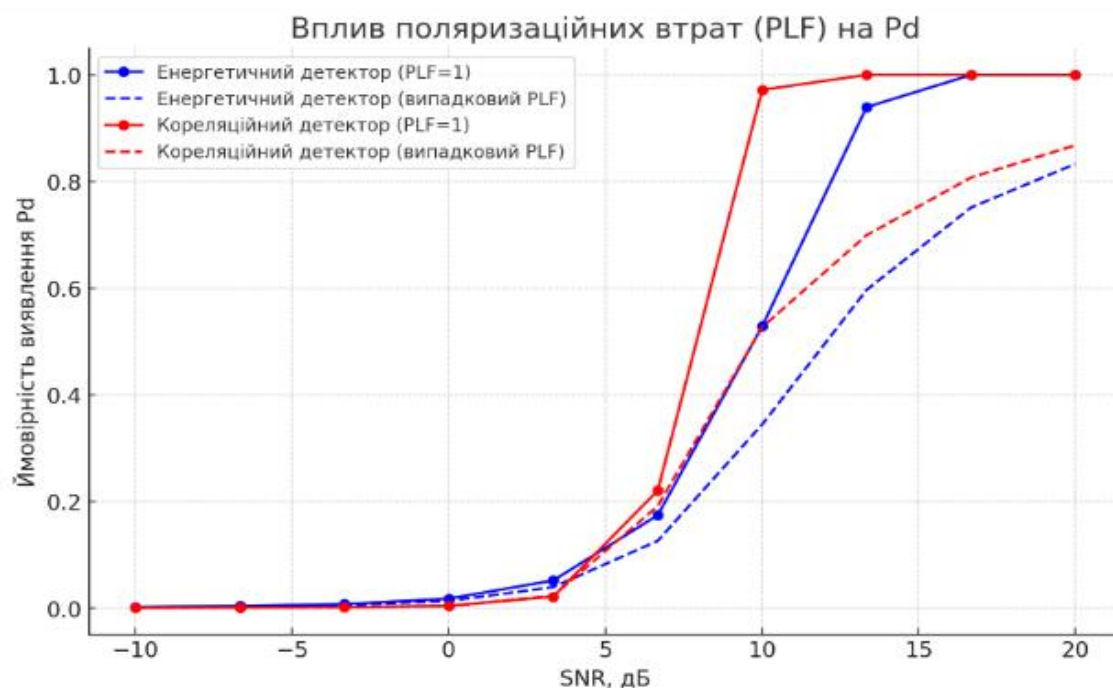


Рис. 3. Вплив поляризаційних втрат (PLF) на ймовірність виявлення

Ця модель забезпечує збалансований підхід щодо чутливості й точності виявлення малопомітних БПЛА, даючи змогу ефективно функціонувати навіть в умовах інтенсивного шумового фону та радіоелектронного протистояння.

Результати додаткового моделювання для виявлення (прийняття рішення про наявність БПЛА) в результаті спектрального та автокореляційного аналізу наведено на рис. 4–6.

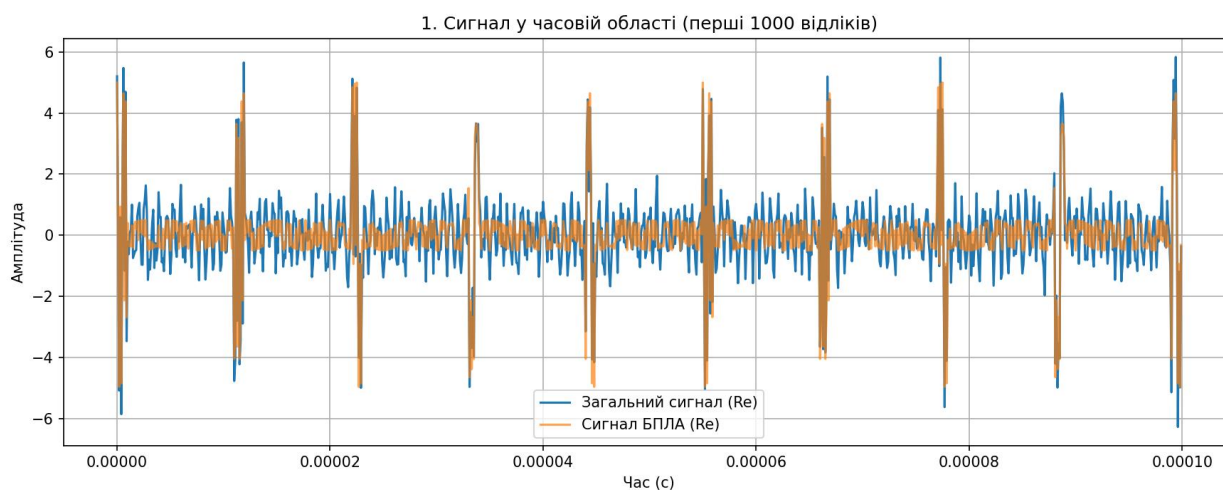


Рис. 4. Виявлення за сигнатурами сигналів БПЛА



Рис. 5. Спектральний аналіз під час виявлення БПЛА

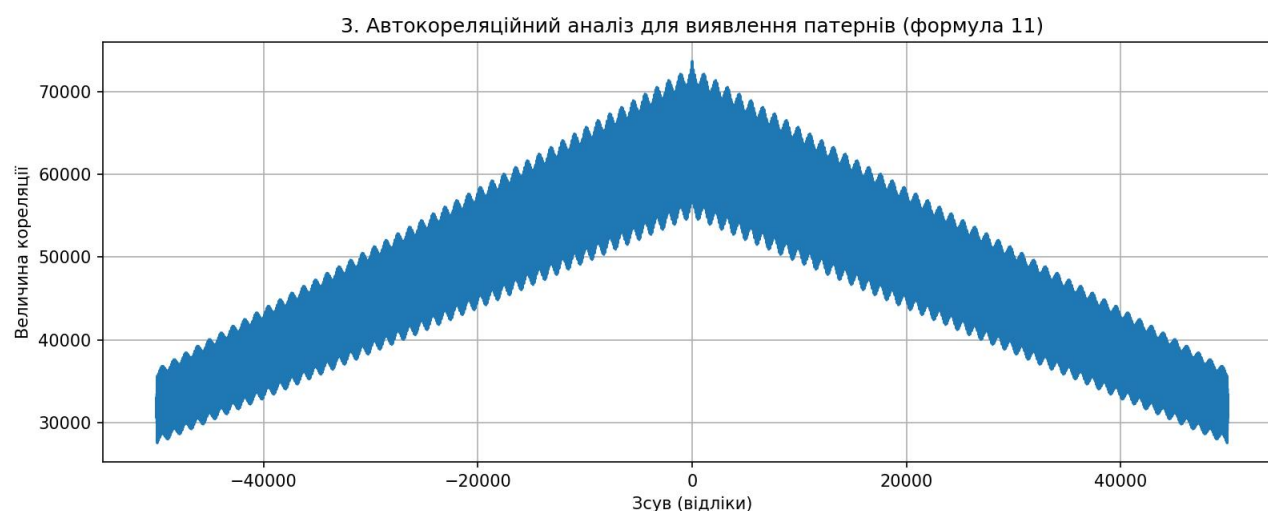


Рис. 6. Автокореляційний аналіз для виявлення патернів сигналу БПЛА

Критерій 1: виявлено 14 енергетичних піків вище від порога. Найпотужніший сигнал на частоті 1,50 МГц.

Критерій 2: повторювані патерни виявлено.

Критерій 3: розрахований кумулянт (ексцес) $S_4 = -0,40$ Тип модуляції не схожий на BPSK / QPSK.

Розрахована вагова сума $S = 0,96$ (поріг $\delta = 0,6$).

Виконане моделювання дає підстави для рішення про наявність БПЛА.

Отже, розроблений алгоритм дає змогу з високою точністю ідентифікувати слабкі ознаки присутності малопомітних БПЛА за рахунок поєднання багатоканального аналізу спектральної потужності, когерентності та адаптивного порогового визначення, оптимізованого під SDR-архітектуру.

Висновки

Запропонований підхід до виявлення сигналів безпілотних літальних апаратів на основі технології SDR дав можливість розробити ефективний алгоритм, здатний працювати в умовах змінного радіоелектронного середовища та значних завад. Основна відмінність запропонованого методу полягає у використанні комплексного аналізу профілю сигналу БПЛА, а не лише його спектральних характеристик.

Експериментальні дослідження підтвердили ефективність розробленого алгоритму. Під час тестування в умовах міської забудови було успішно виявлено радіосигнал від DJI Phantom 4 на частоті 2,403 ГГц із середньою потужністю –45 дБм. Застосована смугово-пропускна фільтрація забезпечила високу завадостійкість, а ідентифікація типового OFDM-профілю з періодичними пакетами керування дала змогу не лише виявити сигнал, а й класифікувати його.

Результати роботи демонструють, що розроблений алгоритм забезпечує надійне виявлення БПЛА, враховуючи особливості їхніх сигнатур. Це створює міцну основу для подальшого вдосконалення систем радіочастотного моніторингу та протидії БПЛА в умовах електронної боротьби. У подальших дослідженнях заплановано розширити базу даних сигнатур для інших типів БПЛА та вдосконалити алгоритми машинного навчання для автоматичної класифікації.

Отже, в роботі сформовано концептуальну, теоретичну та прикладну основу для подальшого дослідження та розроблення алгоритмів виявлення БПЛА, орієнтованих на роботу в реальних умовах радіоелектронної боротьби

Список використаних літературних джерел

- [1] J. Drozd, M. El-Absi, M. G. El-Soud, T. Z. Al-Soud, and P. Kvac, "Using SDR receivers for UAV detection", *Elektronika ir Elektrotechnika*, Vol. 27, No. 4, pp. 31–37, 2021. DOI: 10.5755/j02.eie.29952
- [2] E. P. de Freitas, H. F. de Arruda, F. A. A. de Souza, V. A. de Sousa, R. A. A. de Freitas, and G. A. de L. L. Ribeiro, "Experimental Evaluation of an SDR-Based UAV Localization System", *Sensors*, Vol. 24, No. 9, p. 2789, 2024. DOI: 10.3390/s24092789
- [3] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, "RF-based drone detection and identification using deep learning", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 67, No. 5, pp. 3890–3902, 2018. DOI: 10.1109/TVT.2018.2792477
- [4] F. C. Chiper, A. Martian, C. V. B. Vladescu, and I. A. Fagarasan, "Drone Detection and Defense Systems: Survey and a Software-Defined Radio-Based Solution", in *2021 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, 2021, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ECAI52376.2021.9562854
- [5] O. S. Al-Obaidi, A. J. Al-Ali, and T. K. Al-Uqaili, "A Survey on RF-based Drone Detection and Neutralization Techniques", in *2022 International Conference on Computer Science and Software Engineering (CSASE)*, 2022, pp. 1–6. DOI: 10.1109/CSASE51777.2022.9759495
- [6] P. Flak, J. Lopatka, and P. Kawalec, "Drone Detection Sensor with Continuous 2.4 GHz ISM Band Coverage Based on Cost-Effective SDR Platform", *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 114674–114686, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3104738
- [7] M. Ezuma, F. Erden, C. K. Anjinappa, O. Ozdemir, and I. Guvenc, "Micro-UAV detection and classification from RF fingerprints using deep learning", in *2019 IEEE Aerospace Conference*, 2019, pp. 1–13. DOI: 10.1109/AERO.2019.8741749
- [8] S. N. Al-Sadoon, A. G. Al-Suhail, and A. A. Al-Ali, "A Comprehensive Review of Drone Detection and Classification Methods", in *2023 International Conference on Communication, Computing, and Digital Systems (C-CODE)*, 2023, pp. 1–8. DOI: 10.1109/C-CODE58232.2023.10123164
- [9] N. A. Al-Masri, M. S. Al-Issa, and M. I. Al-Hamar, "RF-Based UAV Detection and Identification Using Hierarchical Learning Approach", *Sensors*, Vol. 21, No. 6, p. 1947, 2021. DOI: 10.3390/s21061947
- [10] T. O'Shea, T. C. Clancy, and H. J. Ebeid, "Practical signal detection and classification in the RF spectrum", in *2016 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, 2016, pp. 1–10. DOI: 10.1109/DySPAN.2016.7543940
- [11] S. Y. Zhuk, I. O. Tovkach, O. V. Neuimin, and V. V. Vasyliiev, "Adaptive Filtering of UAV Movement Parameters Based on AOA-Measurements of the Sensor Network in the Presence of Abnormal Measurements", *Journal of Aerospace Technology and Management*, Vol. 13, e4421, 2021. DOI: 10.5028/jatm.v13.1235
- [12] V. M. Kartashov, V. M. Pososhenko, V. V. Voronin, V. V. Kolesnik, and O. V. Kapusta, "Methods for detection-recognition of radar, acoustic, optical and infrared signals of unmanned aerial vehicles", *Радіотехніка*, No. 205, pp. 138–153, 2021. DOI: 10.30837/rt.2021.2.205.15
- [13] O. Yudin, R. Ziubina, S. Buchyk, and O. Matviichuk-Yudina, "Development of methods for identification of information-controlling signals of unmanned aircraft complex operator", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, No. 9 (104), pp. 26–36, 2020. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.195510

- [14] V. V. Tiutiunyk, O. A. Levterov, O. O. Tiutiunyk, and D. V. Usachov, "Acoustic monitoring of sources of emergency situations associated with the use of firearms", *Проблеми надзвичайних ситуацій*, Vol. 2, No. 40, pp. 269–292, 2024. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-40-19
- [15] S. O. Sokolskyi and A. V. Movchanyuk, "Audio signal processing algorithm using machine learning method", *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*, No. 93, pp. 39–51, 2023. DOI: 10.20535/RADAP.2023.93.39-51

EVALUATION OF SDR HACK-RF FOR UAV SIGNAL DETECTION

Oleksandr Bilyk, Oleksandr Martynchuk, Yurii Zhuha

Kharkiv National University of Radio Electronic, 14, Nauky Ave., Kharkiv, 61166, Ukraine

This paper presents a comprehensive study of the use of software-defined radio (SDR) technology as an effective instrument for detecting radiofrequency activity associated with unmanned aerial vehicles (UAVs). The research is focused not only on the general principles of SDR but also on the practical implementation of algorithms and methods aimed at enhancing the efficiency of UAV signal detection in complex and dynamic radio environments. The architecture of SDR systems was analyzed in detail, highlighting their flexibility, scalability, and adaptability compared to conventional radio monitoring tools. Functional aspects, including wideband signal acquisition, reconfigurable software modules, and multi-channel processing capabilities, were examined as key enablers for UAV detection tasks. Special emphasis was placed on the development and application of mathematical tools and algorithms. Fourier transform, wavelet analysis, and power spectral density estimation were applied to perform spectral analysis and identify characteristic frequency components of UAV transmissions. Furthermore, methods for modulation classification and anomaly detection were implemented to distinguish UAV-related signals from background noise and interference. Synchronization techniques and preamble detection were tested to increase the reliability of identification under low signal-to-noise conditions. Based on the conducted analysis, a detection algorithm was designed and optimized. The algorithm takes into account noise resistance, multi-channel processing, and adaptive real-time data analysis. Its performance demonstrates the capability to reliably identify UAV communication signals even in the presence of intentional jamming and rapidly changing electromagnetic conditions. The results of this work create a methodological foundation for the design of advanced radiofrequency monitoring systems intended for electronic warfare and counter-UAV applications. The proposed SDR-based approach not only improves detection accuracy but also offers adaptability to future challenges in the field of UAV threat mitigation.

Keywords: SDR, UAV, spectral analysis, Fourier transform, detection algorithm, digital signal processing (DSP).