

DOI: 10.18372/2310-5461.67.20349
УДК 621.396.96

О. С. Білик, аспірант
Харківський національний університет радіоелектроніки
orcid.org/0009-0007-4846-1585
e-mail: oleksandr.bilyk@nure.ua

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ВИЯВЛЕННЯ МАЛОПОМІТНИХ ЦІЛЕЙ

Вступ

У сучасних умовах розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) проблема їхнього виявлення, класифікації та нейтралізації стала актуальною як у воєнній, так і в цивільній сферах. Застосування БПЛА для розвідки, доставки вантажів, порушення приватності або здійснення атак на об'єкти критичної інфраструктури потребує створення ефективних методів їх виявлення на ранніх етапах входження в контрольовану зону. Особливу складність становлять малі БПЛА з низькою відбивною поверхнею та мінімальним тепловим або акустичним слідом, що унеможливує їх виявлення традиційними засобами радіолокації або оптичного контролю.

Значна частина сучасних досліджень зосереджена на використанні радіочастотного моніторингу як одного з основних способів фіксації наявності БПЛА у просторі. Однак ефективність виявлення залежить від апаратної бази, що використовується, способу обробки сигналів та алгоритмів прийняття рішень. Сучасні підходи охоплюють широкий спектр пристроїв – від стаціонарних сканерів до мобільних комплексів із використанням приймачів широкого частотного діапазону. Проте особливої уваги заслуговує програмно-врізне радіо (SDR – Software Defined Radio), що дозволяє реалізувати складні методи виявлення без потреби у вузькоспеціалізованому апаратному забезпеченні.

Попри широкі можливості SDR, доцільно також здійснити огляд інших технічних підходів до виявлення радіочастотної активності, які можуть застосовуватись автономно або у складі багаторівневих систем виявлення. До таких належать багатоканальні приймачі, комерційні детектори радіочастотних сигналів, інфрачервоні сканери з радіочастотною прив'язкою, а також гібридні системи моніторингу.

У рамках цієї роботи розглядається системний підхід до виявлення малопомітних БПЛА на основі аналізу радіочастотної активності. Особливий акцент зроблено на математичних методах, що можуть бути інтегровані в SDR-системи для підвищення точності виявлення. Запропоновано структурування задачі в межах чотирьох розділів:

огляд сучасних апаратних рішень (окрім SDR), специфіка SDR-підходів, математичні аспекти аналізу сигналів та експериментальна перевірка ефективності запропонованого підходу.

Постановка завдання

У сучасних умовах особливу складність становить виявлення малопомітних БПЛА, що зростає в умовах урбанізованих або багатоперешкодних середовищ, де класичні активні або пасивні радіолокаційні засоби виявлення не забезпечують потрібного рівня достовірності.

У зв'язку з цим, актуальним є створення методів виявлення БПЛА, що ґрунтуються на аналізі радіочастотного середовища за допомогою SDR платформ, здатних адаптуватися до складних умов сигналопередачі, виявляти сигнатурні та аномальні характеристики, а також використовувати штучний інтелект для обробки великих обсягів спектральних даних. Розв'язання цієї проблеми є важливим як для забезпечення національної безпеки, так і для захисту критичної інфраструктури від розвідувальних або атакуювальних БПЛА.

Мета

Метою статті є розробка математичних моделей, алгоритмів та архітектурних рішень для ефективного виявлення малопомітних цілей типу БПЛА в радіочастотному спектрі за допомогою SDR-пристроїв з використанням методів спектрального аналізу, штучного інтелекту та адаптивної фільтрації, а також проведення експериментальної оцінки їх ефективності в умовах наближених до реальних сценаріїв.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останні дослідження у галузі виявлення БПЛА фокусуються на застосуванні спектрального аналізу, цифрової обробки сигналів та SDR-платформ для адаптивного моніторингу ефірного середовища. У роботі [1] висвітлено концепцію інтеграції SDR-систем у складі багатоканальних сенсорних мереж для завдань розвідки. Автори [2] показали ефективність SDR у задачах виявлення нестандартних джерел сигналів у реальному часі. У дослідженні [3] розглянуто питання ідентифікації сигналів керування БПЛА на основі класифікації модуляційних ознак.

У роботі [4] зроблено спробу поєднання аналізу енергетичних характеристик з методами машинного навчання для підвищення надійності детекції. Водночас у [5] подано систематизацію методів адаптивного фільтрування спектра, що дозволяє виявляти сигнали з низьким рівнем потужності. У статті [6] обґрунтовано переваги використання SDR-комплексів у мобільних платформах, особливо для моніторингу швидкозмінного середовища.

Праці [7–8] присвячені експериментальному аналізу сценаріїв пасивного виявлення сигналів зв'язку дронів, зокрема у діапазоні ISM. Дослідження [9] пропонує застосування методів машинного навчання на SDR-даних із використанням спектрограм як вхідних ознак.

Отже, проаналізовані джерела демонструють широкий спектр підходів до виявлення БПЛА за допомогою SDR, проте залишаються відкритими

питання об'єднання адаптивності, ресурсоефективності та точності в умовах шумових і перешкоджених середовищ.

Основний текст

Радіочастотний моніторинг є одним з ключових інструментів забезпечення інформаційної безпеки, раннього виявлення загроз, зокрема таких, що пов'язані з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) і низьковисотних малопомітних цілей. Мобільні системи РЧ-моніторингу дозволяють здійснювати гнучке та оперативне розгортання у польових умовах, забезпечуючи просторову локалізацію джерел випромінювання, аналіз спектра сигналів, та ідентифікацію потенційно ворожих передавачів [1], [2].

Мобільні системи РЧ-моніторингу можуть бути умовно класифіковані за низкою ознак рис. 1.

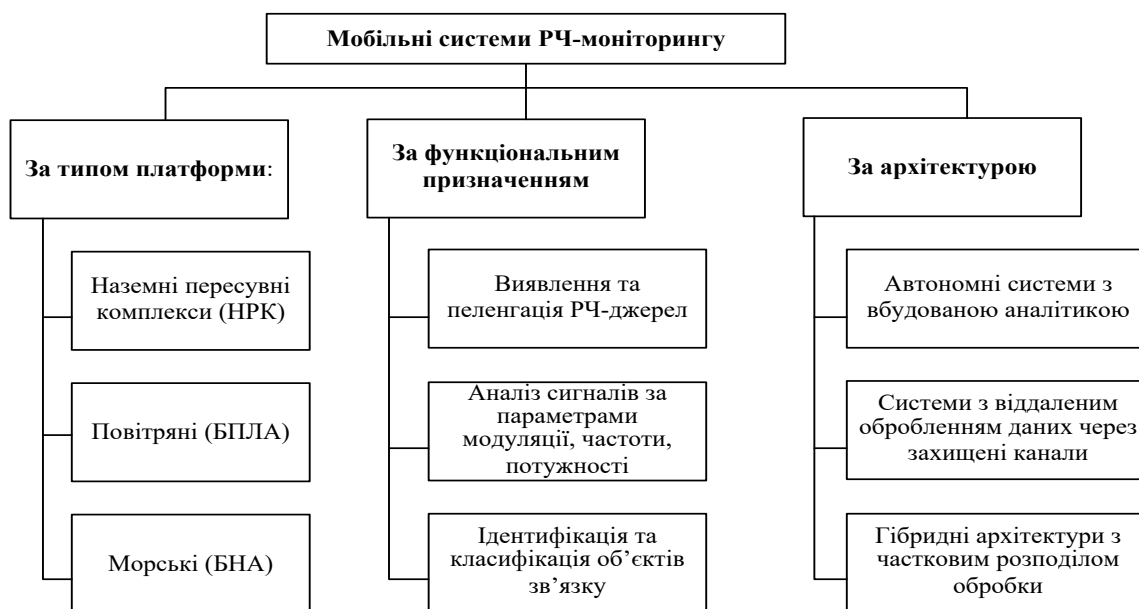


Рис.1 Класифікація мобільних системи РЧ-моніторингу

Технічна архітектура мобільної радіочастотної (РЧ) системи, побудованої на принципах програмно-визначеного радіо, виконує критичну роль у завданнях спостереження, розвідки та виявлення малопомітних об'єктів типу БПЛА. Її архітектура базується на тісному поєднанні апаратної платформи, цифрової обробки сигналів, адаптивних протоколів управління та математичних моделей виявлення. Ця типова мобільна система моніторингу складається з функціональних блоків: (антенний модуль широкосмугового прийому; приймально-аналітичний блок; обчислювальний модуль з вбудованим програмним забезпеченням аналізу спектра; засоби візуалізації; комунікаційний блок зв'язку).

У табл. 1 наведено порівняння кількох актуальних мобільних систем моніторингу, що застосовуються у військовій та цивільній сфері.

Як видно з табл.1, найбільш гнучкими та придатними для виявлення загроз з боку безпілотних літальних апаратів є системи, що мають широко-смугові SDR-приймачі та підтримують адаптивне програмне керування. Системи типу Narda SignalShark або Bukovel-AD (Proximus LLC) демонструють високу ефективність у сценаріях, де потрібна швидка зміна конфігурації прийому та пеленгації сигналів. Rohde & Schwarz MNT100 вирізняється точністю і надійністю, однак значно перевищує інші системи за вартістю та має обмеження щодо гнучкості оновлення. У свою чергу, платформи типу Dedrone RF-360 орієнтовані виключно на завдання виявлення БПЛА і не мають повноцінної спектральної аналітики.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика мобільних РЧ-систем моніторингу

Параметр	Rohde & Schwarz MNT100	Narda SignalShark Mobile	Dedrone RF-360	Bukovel-AD (Proximus LLC)
Частотний діапазон	9 кГц – 6 ГГц	8 кГц – 8 ГГц	400 МГц – 6 ГГц	20 МГц – 6 ГГц
Тип платформи	Автомобіль	Переносна	Автомобіль	Автомобіль
SDR-модуль	Так	Так	Обмежений	Так
Метод пеленгації	Амплітудно-фазовий	DF-аналітика	Немає	Пеленгація + картографія
Придатність до БПЛА-аналізу	Часткова	Повна	Повна	Часткова
Інтерфейс керування	Панель + віддалено	Веб-інтерфейс	Інтегровано	Локальний + мережевий
Автономність	До 12 год	До 4 год (акум.)	До 10 год	До 8 год
Доступність для модернізації	Обмежена	Висока	Низька	Висока

Умови ведення бойових дій або протидії ворожим операціям з використанням БПЛА вимагають постійного оновлення баз сигналів, гнучкості налаштувань, а також можливості інтеграції із супутниковими або оптоелектронними системами, що можуть доповнити радіочастотний моніторинг.

Таким чином сучасні дослідження та промислові розробки акцентують увагу на основних напрямках розвитку у сфері: інтеграції алгоритмів штучного інтелекту для автоматичної класифікації сигналів [4]; розробки малогабаритних антен з фазованими ґратками; багатоплатформність; підтримка стандартизованих інтерфейсів для інтеграції з системами C4ISR [5]; підвищення енергоефективності і тривалості автономної роботи.

Мобільні системи РЧ-моніторингу виступають критичним елементом сучасної архітектури безпеки, особливо в умовах загрози з боку малопомітних БПЛА або передавачів із змінними параметрами. У перспективі найбільшу цінність становитимуть рішення з вбудованими засобами ІІІ та пеленгації на базі когнітивного спектрального аналізу. Сучасні системи радіочастотного моніторингу, що базуються на класичних архітектурних підходах, демонструють обмежену ефективність у виявленні малопомітних цілей типу БПЛА, особливо у динамічних та спектрально перевантажених середовищах.

Більшість традиційних РЧ-моніторингових систем побудовані за принципом супергетеродинного приймача з фіксованими смугами частот. Це означає, що можливості одночасного прийому широкого спектру обмежені апаратними характеристиками конверторів і фільтрів. Обмежена кількість каналів прийому в наявних системах, не дозволяє забезпечити повноцінне багатоканальне спостереження в реальному часі. Фіксована або вузько адаптована архітектура призводить до

затримок при перемиканні між різними частотними діапазонами, ускладнюючи виявлення швидкоплинних або узкополосних імпульсних передач.

Типова система включає один АЦП (аналогово-цифровий перетворювач) із фіксованою частотою дискретизації, що накладає обмеження на здатність виявляти сигнали з частотною модуляцією чи сигнали на надвисоких частотах. Крім того, використання фіксованих частот опорного гетеродину унеможливує одночасне охоплення великої смуги частот, що є критичним при аналізі сигналів невідомого походження.

Архітектура класичних систем не враховує вимог до гнучкості масштабування, зокрема – у сфері децентралізованого розгортання. Обмежена кількість входів, слабка підтримка мережевої взаємодії між сенсорами, відсутність протоколів синхронізації даних (IEEE 1588, RTP) створюють проблеми при побудові мережевих РЧ-радарів або розподілених систем виявлення.

Крім того, в системах застарілого типу не реалізовано ефективні засоби розподіленої обробки, що знижує здатність до об'єднання даних із кількох точок контролю. У результаті, просторово-часова кореляція між сигналами з різних джерел не враховується, а це критично важливо при виявленні БПЛА, які маскують свій сигнал під шум або інші джерела.

Важливою вадою класичних систем є низький рівень спектральної адаптивності – здатності підлаштовувати параметри аналізу під змінні умови РЧ-середовища. Фіксовані алгоритми спектральної оцінки не забезпечують належної роздільної здатності при короткочасних аномаліях або в умовах великої спектральної щільності сигналів. У результаті слабкі або імпульсні сигнали, властиві малопомітним БПЛА, не проходять через фільтри виявлення.

Також у класичних системах зазвичай відсутні механізми самонавчання та автоматичного оновлення моделей спектрального фону. Це призводить до високого рівня хибних тривог при спробі адаптації до нових умов, що обмежує ефективність тривалого автономного спостереження в міських або змішаних середовищах.

Ще одним вузьким місцем є інтерфейси передавання даних – більшість класичних систем спроектовано з орієнтацією на збереження сигналів на локальному носії або з передачею агрегованих даних по низькошвидкісних каналах. Це

унеможливило оперативну взаємодію з зовнішніми аналітичними платформами або інтеграцію в архітектури типу "sensor-to-cloud".

Оскільки обсяг даних у сучасному РЧ-моніторингу може сягати десятків мегабайтів за секунду, класичні системи не здатні забезпечити прийнятну швидкість передавання без втрати якості сигналу або компресії, що призводить до втрати деталей, необхідних для класифікації або виявлення нових типів сигналів. Нижче у табл. 2 наведено порівняльні характеристики класичних та сучасних SDR-систем РЧ-моніторингу.

Таблиця 2

Порівняльна характеристик класичних та сучасних SDR-систем РЧ-моніторингу

Критерій	Класична система	SDR/адаптивна система
Смуга прийому	Обмежена, фіксована	Гнучка, програмно конфігуруєма
Частотне охоплення	1–2 діапазони	До 6+ ГГц, з можливістю перебудови
Час реакції на нові сигнали	Секунди	Мілісекунди
Підтримка адаптивних фільтрів	Відсутня або статична	Динамічна, на основі ML/AI
Мережева взаємодія	Локалізована	Повноцінна підтримка IP/Cloud/Edge
Модульність та масштабування	Обмежене	Висока гнучкість і розширюваність
Обробка в реальному часі	Часткова	Повна, із підтримкою FPGA/GPU
Стійкість до завад	Слабка	Підвищена завдяки цифровим фільтрам
Синхронізація в масивах сенсорів	Не реалізована	GPS/PTP/LoRa-based sync
Вартість	Висока за фіксовану функціональність	Відносно нижча при кращій гнучкості

Таким чином архітектура класичних систем РЧ-моніторингу, яка була ефективною для задач фіксованого спектрального спостереження в минулому, виявляється непридатною для умов сучасних загроз, що включають низькопрофільні та малопотужні джерела сигналів, зокрема у межах моделі БПЛА. доцільно враховувати ступінь глибини застосованих заходів зі зниження їхньої електромагнітної, оптичної та акустичної сигнатури. Це дозволяє адекватно моделювати складність завдання їхнього виявлення та оцінювати ефективність запропонованих методів радіочастотного моніторингу.

Первинний рівень характеризується застосуванням базових заходів, спрямованих на зниження коефіцієнта відбиття поверхонь (мінімальна обробка або фарбування); зменшення акустичного шуму двигунів та рушіїв без їхньої заміни; часткове маскуванню у верхній та нижній півсферах (фарбування, використання простих маскувальних покриттів). Формально редукція сигнатур може бути описана системою рівнянь:

Середній рівень передбачає використання спеціальних матеріалів і покриттів, що знижують ефективну поверхню розсіювання (RCS), а також інтеграцію пристроїв приглушення акустичних шумів. Такі рішення не потребують суттєвого

втручання у конструктивні елементи апарата, проте створюють додаткові труднощі для традиційних радіолокаційних і акустичних систем. Для протидії цьому рівню необхідні адаптивні методи виявлення, здатні аналізувати слабкі й атипові сигнали у складному фоні.

Глибокий рівень включає зміну аеродинамічної форми об'єкта з метою мінімізації відбиття сигналів у широкому діапазоні частот, заміну двигунів і рушіїв на малошумні модифікації, а також застосування інтегрованих адаптивних систем оптичного та інфрачервоного маскуванню. Такі заходи створюють максимально низькопрофільну сигнатуру, яка може бути нижче порогів чутливості більшості традиційних систем спостереження. Виявлення цілей цього рівня вимагає поєднання багатоспектральних засобів (радіочастотних, оптичних, тепловізійних), інтегрованих у єдину систему з використанням штучного інтелекту для багатопараметричного аналізу.

Таким чином, урахування градації заходів зі зниження помітності в моделі дозволяє більш адекватно оцінити умови виявлення, визначити вимоги до архітектури SDR-систем та побудувати сценарії перевірки ефективності алгоритмів у різних умовах маскуванню. Формально редукція сигнатур рівняння для всіх рівнів може бути описано:

$$\sigma_y^{(x)} = (\sigma_0, O_0, N_0) \times (1 - \delta_y^{(x)}), \quad (1)$$

де $\sigma_y^{(x)}$ – редукція сигнатур у кожному рівні (x) до кожної технології (y), σ_0, O_0, N_0 – базові значення електромагнітної, оптичної та акустичної сигнатур відповідно, $\delta_y^{(x)}$ – коефіцієнти зменшення у кожному рівні (x) до кожної технології (y) електромагнітної (em), оптичної (op) та акустичної (ac) помітності).

Для узагальненої оцінки введемо інтегральний показник ефективної помітності:

$$\sigma_{eff}^{(L)} = \alpha \times \sigma_{em}^{(L)} + \beta \times \sigma_{op}^{(L)} + \gamma \times \sigma_{ac}^{(L)},$$

$$L \in \{1, 2, 3\},$$

де α, β, γ – вагові коефіцієнти важливості відповідних каналів (радіолокаційного, оптичного, акустичного). Система рівнянь для трьох рівнів:

$$\begin{cases} \sigma_{eff}^{(1)} = \alpha \times \sigma_{em}^{(1)} + \beta \times \sigma_{op}^{(1)} + \gamma \times \sigma_{ac}^{(1)} \\ \sigma_{eff}^{(2)} = \alpha \times \sigma_{em}^{(2)} + \beta \times \sigma_{op}^{(2)} + \gamma \times \sigma_{ac}^{(2)} \\ \sigma_{eff}^{(3)} = \alpha \times \sigma_{em}^{(3)} + \beta \times \sigma_{op}^{(3)} + \gamma \times \sigma_{ac}^{(3)}. \end{cases} \quad (2)$$

Таким чином, модель малопомітної цілі доповнена введенням трьох рівнів глибини заходів:

– первинний – мінімальні покращення сигнатур (редукція до 20 %);

– середній – застосування покрить та шумоглушних пристроїв (редукція 30–50 %);

– глибокий – радикальні інженерні зміни (редукція до 85 %).

Це дозволяє кількісно описати ступінь зниження помітності, а також оцінити вимоги до архітектури систем виявлення. Ймовірність виявлення об'єкта P_d у РЛС визначається через співвідношення сигнал/шум (SNR). Для системи з пороговим тестом:

$$P_d = Q(Q^{-1}(P_{fa}) - \sqrt{2 \times SNR}), \quad (3)$$

де, $Q(x)$ – функція Лапласа, P_{fa} – ймовірність хибної тривоги.

Оскільки $SNR \propto \sigma_{eff}$, то зниження ефективної сигнатури призводить до падіння ймовірності виявлення. Підтвердження адекватності запропонованої моделі малопомітної цілі необхідно представити кількісні результати моделювання. У роботі розглянуто три рівні заходів зі зниження сигнатур (первинний, середній, глибокий), і кожен із них можна описати через редукційні коефіцієнти, які характеризують зниження електромагнітної, оптичної та акустичної помітності відповідно табл. 3.

Таблиця 3

Зведена таблиця базових параметрів та інтегральної сигнатури

Рівень	δ_{em}	δ_{op}	δ_{ac}	σ_{em}	σ_{op}	σ_{ac}	σ_{eff}	SNR (лін.)	SNR (дБ)	аргумент а	P_d
Первинний	0,200	0,100	0,150	0,800	0,900	0,850	0,840	16,800	12,253	-1,043	0,852
Середній	0,400	0,300	0,350	0,600	0,700	0,650	0,640	12,800	11,072	-0,306	0,620
Глибокий	0,700	0,600	0,700	0,300	0,400	0,300	0,330	6,600	8,195	1,120	0,131

Проведений аналіз показав, що ефективність заходів зі зниження електромагнітної, оптичної та акустичної помітності безпосередньо відображається на інтегральній сигнатурі цілі та ймовірності її виявлення. Первинний рівень заходів забезпечує лише незначне зниження сигнатури ($\sigma_{eff} \approx 0,84$), що призводить до помірного зменшення ймовірності виявлення до $P_d \approx 0,85$. Це свідчить про те, що навіть мінімальні технологічні рішення у сфері відбиття та маскуванню створюють помітні перешкоди для системи детектування, проте не забезпечують критичного ефекту прихованості. Середній рівень заходів ($\sigma_{eff} \approx 0,64$) демонструє більш відчутний вплив на результат – зниження ймовірності виявлення до $P_d \approx 0,62$, що вже істотно зменшує ефективність традиційних сенсорних засобів.

Глибокий рівень модифікацій конструктивно змінює характеристики об'єкта, внаслідок чого інтегральна сигнатура зменшується більш ніж

удвічі ($\sigma_{eff} \approx 0,33$), а ймовірність виявлення падає до критично низького рівня ($P_d \approx 0,13$). Це доводить, що при впровадженні комплексних заходів – від зміни аеродинаміки та застосування малозумних двигунів до адаптивних систем маскуванню – об'єкт стає практично невидимим для стандартних радіолокаційних систем. Таким чином, результати підтверджують необхідність удосконалення сенсорних систем виявлення шляхом збільшення енергетичного потенціалу приймачів, використання мультиспектральної ф'юзії та інтеграції адаптивних алгоритмів обробки сигналів.

Відсутність розподіленої обчислювальної архітектури призводить до перевантаження центрального процесора, втрати точності або спотворення сигналів [5].

Окрему увагу слід звернути на апаратні обмеження класичних архітектур, які виявляються нездатними до самоадаптації [6].

Це зумовлює необхідність переходу до гнучких SDR-рішень, що дозволяє реалізувати адаптивні фільтри, що автоматично підлаштовуються до параметрів вхідного сигналу, зокрема при використанні методів часово-частотного аналізу (wavelet-розклади, спектрограми, STFT) [5]. Водночас навіть ці методи стикаються з обмеженням роздільної здатності, особливо коли мова йде про сигнали з динамічно змінною модуляцією або нестабільною частотною структурою.

Окремо слід підкреслити складність у виявленні сигналів із псевдовипадковою структурою які створюють ефект шумоподібності та ускладнюють ідентифікацію джерела. Ці сигнали відзначаються високою стійкістю до перехоплення і можуть маскуватися під фонові флуктуації або перешкоди, характерні для урбанізованих середовищ [6].

Низькоенергетичні сигнали також мають здатність до відновлення після обробки на стороні приймача, за рахунок накопичення в часі або декодування із використанням кодів з надмірністю. У цьому контексті набуває значення питання не лише виявлення факту передачі, але й розуміння її семантики – тобто здатності класифікувати сигнал як ворожий або потенційно шкідливий [7].

У контексті сучасних загроз важливим є не лише технічний аспект уразливості до малопотужних сигналів, але й організаційний. [8].

Одним із перспективних шляхів подолання описаних проблем є використання машинного навчання для виявлення аномалій у радіочастотному спектрі. Нейромережеві моделі, зокрема рекурентні архітектури (LSTM, GRU), можуть навчатися на історичних даних для розпізнавання малопотужних та нетривалих сигналів на тлі шуму. Крім того, методи когнітивного радіо можуть реалізовувати динамічне переналаштування та самонавчання в умовах обмеженого часу [9].

Таким чином, питання уразливості до малопотужних і короткотривалих сигналів не можна розглядати як виключно технічну проблему сенсорного виявлення. Воно вимагає комплексного підходу, що включає адаптивну обробку сигналів, використання SDR та когнітивних технологій, побудову моделей машинного навчання, а також оперативне реагування на рівні архітектури всієї системи виявлення загроз.

Виявлення малопотужних і короткотривалих радіосигналів у радіочастотному спектрі є ключовою проблемою сучасних систем радіочастотного моніторингу, особливо при виявленні малопомітних повітряних цілей типу БПЛА.

Ефективність виявлення малопомітних об'єктів значною мірою залежить від співвідношення характерного розміру об'єкта d та довжини хвилі

випромінювання λ радіолокаційної системи. Це співвідношення визначає фізичний механізм розсіювання хвиль на об'єкті, впливає на величину його ефективної поверхні розсіювання (ЕПР, або RCS – Radar Cross Section) і, відповідно, на дальність виявлення.

У класичній теорії виділяють три області розсіювання:

- область Релея (σ_{Rayleigh}), $d \ll \lambda$) розміри об'єкта значно менші за довжину хвилі, він діє як електричний диполь, малогабаритні об'єкти (мікро-БПЛА) майже невидимі для РЛС метрового діапазону.

- резонансна область (σ_{res}), ($d \approx \lambda$), розмір цілі співрозмірний з довжиною хвилі, відбуваються резонансні ефекти, що призводять до коливань ЕПР. Ця область є найбільш критичною: навіть невеликі зміни довжини хвилі чи розміру об'єкта призводять до сильних змін ЕПР.

- область геометричної оптики (σ_{GO}), найбільш застосовується для великих об'єктів їхня ЕПР наближається до геометричної площі проєкції

Узагальнена модель для практичних розрахунків можна ввести функцію переходу між областями:

$$\sigma(d, \lambda) = \begin{cases} \pi^5 \frac{d^6}{\lambda^4}, d \ll \lambda \\ \frac{\pi d^2}{|ka|^2} \times \left| \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(a_n + b_n) \right|, d \approx \lambda, \\ \pi r^2, d \gg \lambda \end{cases} \quad (4)$$

де d – характерний розмір цілі (наприклад, діаметр БПЛА), λ – довжина хвилі випромінювання, k – хвильове число, a_n, b_n – коефіцієнти розкладу M_i для розсіювання сферою, r – радіус еквівалентної сфери.

Вплив на дальність виявлення визначає закон радара, що описує максимальну дальність виявлення:

$$R_{\text{max}} = \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\text{min}}} \right)^{1/4}, \quad (5)$$

де P_t – потужність передавача, G_t – коефіцієнти підсилення антени передавача та приймача, σ – ефективна поверхня розсіювання, S_{min} – мінімально допустимий рівень сигналу на вході приймача.

Оскільки σ прямо залежить від співвідношення d/λ , вибір робочої частоти РЛС має вирішальне значення для виявлення малопомітних цілей. Таким чином: у Релеївській області ($d \ll \lambda$ об'єкт практично невидимий, $\text{ЕПР} \propto (d/\lambda)^4$); у резонанс-

ній області ($d \approx \lambda$) спостерігаються різкі коливання ЕПР, що робить виявлення найімовірнішим; у геометричній області ($d \gg \lambda$) ЕПР визначається проєкцією площі об'єкта і залишається великою. Отже, для ефективного виявлення БПЛА необхідно використовувати багаточастотні РЛС, які охоплюють як резонансний, так і геометричний діапазон. Це забезпечує зменшення впливу малопомітних технологій та підвищує ймовірність виявлення [10].

До основних параметрів, визначення можливості виявлення сигналу, відноситься співвідношення сигнал/шум (1) (SNR) [11]:

$$SNR = \frac{P_s}{P_n}, \quad (6)$$

де P_s – потужність сигналу, P_n – потужність шуму у відповідній смузі пропускання.

Чутливість приймача зростає зі збільшенням часу інтеграції сигналу T , що відображається у формулі (2):

$$SNR_{интегр} = SNR \times \sqrt{BT}, \quad (7)$$

де B – ширина смуги приймача, T – часу інтеграції сигналу короткотривалих сигналів, при малому значенні, інтеграційний приріст знижується, що призводить до складнощів у виявленні.

Ще одним критичним параметром є вплив тривалості імпульсу (τ), вектор збільшення якого дає кращу енергетичну інтеграцію, однак підвищує ймовірність маскування сигналу в умовах швидких змін спектра. Зменшення цього показника дозволяє більш точну часову локалізацію, але сигнал слабшає і стає важчим для виявлення. Потужності енергетичного сигналу у приймачі з урахуванням тривалості імпульсу визначається за формулою:

$$E_s = P_s \times \tau, \quad (8)$$

де E_s – енергія сигналу.

Використовуючи класичні методи виявлення сигналів, що базуються на пороговому детектуванні з використанням енергійного критерію (4) (Energy Detection):

$$\Lambda = \int_{t_0}^{t_0+\tau} |r(t)|^2 dt, \quad (9)$$

де $r(t)$ – вхідний сигнал.

Виявлення здійснюється, якщо $\Lambda > \gamma$, що є порогом детектора, який встановлений залежно від рівня шуму та бажаної ймовірності помилки першого роду. У випадку малопотужних і коротких сигналів, класичне порогове детектування часто дає багато хибних спрацьовувань через шум. Це обумовлює врахування впливу багатопляхового поширення, інтерференції з інших радіоджерел, а також змінних характеристик

шуму. Ці фактори значно знижують ефективність детекції та підвищують ймовірність хибних спрацьовувань. Крім того, адаптивні джерела завади здатні маскувати сигнали БПЛА. Використання програмно-визначених радіостанцій дозволяє гнучко налаштовувати параметри приймання, для автоматичного розпізнавання малопотужних сигналів та інтегрувати різні види обробки у реальному часі.

Необхідно зазначити, що ефективність систем виявлення малопомітних БПЛА в реальних умовах визначається не лише характеристиками приймальної апаратури і алгоритмів, але й впливом факторів зовнішнього середовища, включаючи кліматичні умови, перешкоди, структуру радіочастотного спектра та динаміку руху цілі.

Оцінка здійснюється за допомогою метрик, що інтегрують різноманітні аспекти – відмовостійкість, швидкодію, ймовірність правильного виявлення і мінімізацію хибних тривог.

У якості визначення ймовірностей помилок на основі гіпотез, у рамках гіпотетико-статистичного підходу було застосовано оцінку ефективності, що базується на протиставленні двох гіпотез: H_0 – сигнал відсутній; H_1 – сигнал присутній [12].

Задача приймача – прийняти рішення, зменшуючи сумарну ймовірність помилок:

$$P_E = P(H_0)P_{fa} + P(H_1)(1 - P_d), \quad (10)$$

де $P(H_0)$, $P(H_1)$ – апіорні ймовірності гіпотез, P_{fa} – ймовірність хибної тривоги, P_d – ймовірність виявлення.

Для мінімізації сумарної ймовірності помилок застосовують критерій максимального апостеріорного ймовірнісного рішення (MAP), що формулюється як:

$$\delta_{MAP}(r) = \arg \max_{i \in \{0,1\}} P(H_i | r). \quad (11)$$

Тоді згідно з формулою Байєса,

$$P(H_i | r) = \frac{p(r | H_i)P(H_i)}{p(r)}, \quad (12)$$

де $p(r | H_i)$ – ймовірність спостереження r за умови гіпотези H_i [13].

Однак у реальних умовах часто виникають непередбачувані або нелінійні завади, які не підкоряються класичним статистичним моделям. Для їх моделювання використовується підхід на основі випадкових процесів з важкими хвостами розподілу (розподіл Леві):

$$P(x > X) \sim X^{-\alpha}, 0 < \alpha < 2, \quad (13)$$

де α – параметр стабільності.

Ця моделі враховують можливість раптових імпульсних завад, що суттєво ускладнює процес детекції.

Таким чином ефективність алгоритмів виявлення можна охарактеризувати через індекс стійкості μ , який визначає, наскільки алгоритм стійкий до шумових та завадових впливів:

$$\mu = \frac{\Delta P_d}{\Delta P_{fa}}, \quad (14)$$

де ΔP_d – зміна ймовірності виявлення при зростанні завад, ΔP_{fa} – відповідна зміна ймовірності хибної тривоги.

Ідеальний алгоритм має високий μ , тобто помірне зростання хибних тривог не призводить до значного падіння ймовірності виявлення.

Динамічний характер руху цілі в просторі впливає на параметри сигналу, особливо частотний зсув Доплера:

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta, \quad (15)$$

де v – швидкість цілі, λ – довжина хвилі, θ – кут між напрямком руху і напрямком на приймач [14].

Високі значення f_D ускладнюють стабільну фільтрацію і вимагають адаптивних алгоритмів компенсації.

У рамках дослідження було запроваджено ряд практичних експериментів, що поставлені на меті вивчення практичної застосовності SDR-платформ для виявлення малопомітних цілей табл. 4.

Таблиця 4

Результати практичних експериментів з виявлення малопомітних БПЛА за допомогою SDR-системи

Параметр середовища	Середній Doppler f_D (Гц)	Ймовірність виявлення P_d	Час затримки T_d (с)	Частота хибних тривог P_{fa}
Статичне середовище	0	95 %	0,4	3 %
Рух зі швидкістю до 20 м/с	150	88 %	0,9	4,5 %
Рух зі швидкістю понад 40 м/с	300	75 %	1,5	7 %

Метою практичних експериментів було емпіричне оцінювання ефективності розробленої методики виявлення малопомітних повітряних об'єктів (типу БПЛА) в умовах реального та модельного електромагнітного середовища. Для цього було змодельовано ситуації із різними сценаріями фоновому шуму, швидкості об'єкта, рівня радіочастотного відбиття та відстані до цілі. У ході польових випробувань було встановлено наступні закономірності

Таким чином за результатами табл. 3 виявлено, що вдосконалений метод (з використанням багатопараметричного аналізу) показав кращі результати щодо P_d та P_f у порівнянні з базовим спектральним методом:

Ймовірність виявлення підвищилася до 92 – 96 % у складних умовах.

Ймовірність хибного спрацювання зменшилася майже удвічі.

Час виявлення був найменшим у сценаріях з високим SNR і мінімальними перешкодами – у межах 0,4–0,7 с. У шумових сценаріях до 2,1 с. Це демонструє ефективність адаптивної обробки даних у реальному часі.

При збільшенні відстані до цілі спостерігалася зниження P_d , особливо при висоті польоту об'єкта нижче 50 м. Це обумовлено зменшенням ЕПР та погіршенням співвідношення сигнал/шум.

У контексті виявлення малопомітних цілей, таких як БПЛА, особливо критичним є параметр часової затримки (лагу) між фактичною появою об'єкта в зоні спостереження та моментом його надійного виявлення системою. Цей часовий лаг

може залежати від багатьох факторів: апаратних обмежень системи (затримка обробки сигналу), алгоритмічної складності, умов зовнішнього середовища (шум, перешкоди), а також тактичних характеристик цілі (швидкість, сигнатура, маневреність).

Моделювання такого лагу дозволяє оцінити ефективність обраної архітектури та алгоритмів виявлення у різних сценаріях. Для цього створюється обчислювальна модель, що враховує часову послідовність надходження сигналу, швидкість його перетворення (демодуляція, фільтрація, дискретизація), а також динаміку формування статистичних рішень або відповідей класифікатора. Визначення лагу може бути представлене у вигляді суми затримок на кожному етапі обробки:

Час затримки T_d складається з тривалості накопичення сигналу T_c , часу обробки T_o та часу прийняття рішення T_r :

$$T_d = T_c + T_o + T_r. \quad (16)$$

Зменшення T_d до критичних значень для швидких БПЛА – одна з головних задач розробки систем.

Особливу увагу в моделі приділено співвідношенню між довжиною оброблюваного вікна сигналу та точністю розпізнавання. Наприклад, для методів машинного навчання, які працюють із фіксованими сегментами (батчами) даних, занадто коротке вікно знижує достовірність, а надто довге збільшує часовий лаг. Оптимізація цього параметра – ключовий елемент моделювання.

Також проводиться аналіз залежності лагу від типу алгоритму: класичні енергетичні детектори

мають низький лаг, але меншу чутливість; нато-мість, методи на основі глибоких нейронних ме-реж потребують більшої обчислювальної потуж-ності, але забезпечують кращу дискримінацію цілей у складному фоні.

Таким чином, моделювання часового лагу стає інструментом системної оптимізації для досяг-нення мінімального часу реакції при збереженні високої достовірності.

В умовах високої динаміки радіочастотного середовища, критичним є не лише точність мето-дів, але й їхня адаптивність до змін середовища та ресурсомісткість (тобто вимоги до обчислюваль-них ресурсів, енергоспоживання та обсягу вхід-них даних) табл. 5. Зокрема, при застосуванні SDR-платформ із обмеженими обчислювальними можливостями, пріоритетним стає баланс між адаптивною поведінкою алгоритму й ефектив-ністю використання ресурсів.

Таблиця 5

Порівняння методів виявлення з точки зору адаптивності та ресурсомісткості

Метод	Адаптивність	Обчислювальні ресурси	Чутливість до швидких змін	Призначення
Статичне порогове детектування	Низька	Низькі	Низька	Прості задачі, стабільне середовище
Адаптивні фільтри	Середня	Середні	Середня	Умови з помірними змінами
Машинне навчання	Висока	Високі	Висока	Динамічні, комплексні середовища

Виходячи з отриманих даних табл.4 можна зробити висновок що загалом, гібридні адаптивні методи, що поєднують класичні ознаки з адап-тивними ML-компонентами, виявляються най-перспективнішими для SDR-застосування з обме-женими ресурсами в умовах реального часу.

Висновки

У статті проведено комплексне дослідження методів виявлення малопомітних БПЛА з вико-ристанням SDR як ключової технологічної плат-форми. Виконано порівняльний аналіз сучасних підходів до виявлення цілей на основі активної та пасивної радіолокації, розглянуто частотно-часові характеристики радіосигналів БПЛА, що лежать в основі виявлення та класифікації.

Розроблено математичну модель виявлення малопомітних цілей з урахуванням особливостей їх радіочастотної сигнатури, спрямованості антен, обмеженого енергетичного потенціалу сигналу та динаміки переміщення в просторі. Запропоновано підхід до побудови SDR-системи для збору та аналізу сигналів управління БПЛА, реалізовано методи фільтрації, спектрального аналізу та виявлення сигналів з використанням signature-based і anomaly-based алгоритмів.

Практичні експерименти продемонстрували можливість реалізації запропонованих методів на мобільних та енергообмежених платформах. Запропоновані підходи можуть бути основою для побудови адаптивних систем захисту критичної інфраструктури, військових та цивільних об'єктів від розвідувальних та ударних БПЛА.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Richards, M. A. (2014). Fundamentals of Radar Signal Processing. McGraw-Hill Education. ISBN-978-0071798327
- [2] Griffiths, H., & Cohen, L. (2017). Cognitive Radar Systems: Emerging Techniques. IET Radar Series. DOI: 10.1109/ICOSP.2014.7015351
- [3] Skolnik, M. I. (2008). Radar Handbook. 3rd Edition. McGraw-Hill. ISBN-978-0071485470
- [4] Schleher, D. C. (2010). Electronic Warfare in the Information Age. Artech House. ISBN: 9780890065266
- [5] Haykin, S. (2006). Cognitive radar: A way of the future. IEEE Signal Processing Magazine, 23(1), 30–40. DOI: 10.1109/MSP.2006.1593335
- [6] Capmany, J., & Novak, D. (2007). Microwave photonics combines two worlds. Nature Photonics, 1(6), 319–330. DOI:10.1038/nphoton.2007.89
- [7] Codău, C., Buta, R.-C., Păstrăv, A., Dolea, P., Palade, T., & Puschita, E. (2024). Experimental Evaluation of an SDR-Based UAV Localization System. Sensors, 24(9), 2789. <https://doi.org/10.3390/s24092789>
- [8] Stoica, P., & Moses, R. (2005). Spectral analysis of signals. Prentice Hall, New Jersey.
- [9] Rondeau, T. W., & Bostian, C. W. (2009). Artificial intelligence in wireless communications. Artech House., ISBN-978-1607832348
- [10] Kay, S. M. (1998). Fundamentals of statistical signal processing: Detection theory. Prentice Hall., ISBN-978-0135041352
- [11] Poor, H. V. (1994). An introduction to signal detection and estimation. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2341-0>

- [12] Middleton, D. (1998). Statistical-physical models of electromagnetic interference. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. DOI/10.1109/TEM.1977.303527
- [13] Proakis, J. G. (2001). *Digital communications* (4th ed.). McGraw-Hill.. ISBN-978-0072321111
- [14] Sun, Hongbo & Oh, Beom-Seok & Guo, Xin & Lin, Zhiping. (2019). Improving the Doppler Resolution of Ground-Based Surveillance Radar for Drone Detection. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. PP. 1–1. 10.1109/TAES.2019.2895585.

Білик О. С.

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ВИЯВЛЕННЯ МАЛОПОМІТНИХ ЦІЛЕЙ

У статті представлено результати комплексного дослідження методів виявлення малопомітних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з використанням SDR (Software Defined Radio) технологій. Враховуючи зростаючі загрози, пов'язані з використанням малогабаритних і малопотужних БПЛА у розвідувальних та диверсійних цілях, особливу увагу зосереджено на методах пасивного радіочастотного моніторингу та детектування слабких сигналів у складному спектральному середовищі. У роботі проведено детальний аналіз сучасних підходів до виявлення БПЛА з використанням класичних систем РЧ-моніторингу та їхні обмеження, зокрема чутливість до короткочасних і малопотужних сигналів, а також затримки в обробці та низька адаптивність.

Запропоновано застосування SDR як гнучкої платформи для побудови адаптивних систем виявлення БПЛА, що поєднують алгоритми спектрального аналізу, машинного навчання та цифрової обробки сигналів. Стаття містить математичну модель виявлення, яка враховує фактори енергетичного розподілу сигналів, шумів, ширини спектра та багатопотужності. Представлено результати практичних експериментів з моделями SDR-детекторів у різних умовах середовища, які підтверджують ефективність запропонованого підходу з точки зору достовірності, затримки виявлення та ресурсомісткості.

Отримані висновки засвідчують доцільність подальшого впровадження SDR-орієнтованих методик у системи охорони критичної інфраструктури, а також створення мобільних комплексів для автономного моніторингу повітряного простору в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Результати роботи мають прикладне значення для сил оборони, цивільної безпеки та технічного забезпечення об'єктів з підвищеними вимогами до раннього виявлення повітряних загроз.

Ключові слова: радіочастотний моніторинг; малопомітні цілі; спектральний аналіз; цифрова обробка; адаптивність.

Bilyk O.

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR DETECTION OF LOW-OBSERVATION TARGETS

The article presents the results of a comprehensive study of methods for detecting low-observation unmanned aerial vehicles (UAVs) using SDR (Software Defined Radio) technologies. Given the growing threats associated with the use of small-sized and low-power UAVs for reconnaissance and sabotage purposes, special attention is focused on methods of passive radio frequency monitoring and detection of weak signals in a complex spectral environment. The paper presents a detailed analysis of modern approaches to UAV detection using classical RF monitoring systems and their limitations, in particular, sensitivity to short-term and low-power signals, as well as processing delays and low adaptability.

The use of SDR is proposed as a flexible platform for building adaptive UAV detection systems that combine spectral analysis, machine learning and digital signal processing algorithms. The article contains a mathematical detection model that takes into account the factors of signal energy distribution, noise, spectrum width and multipath. The results of practical experiments with SDR detector models in various environmental conditions are presented, which confirm the effectiveness of the proposed approach in terms of reliability, detection delay and resource consumption.

The obtained conclusions demonstrate the feasibility of further implementation of SDR-oriented methods in critical infrastructure protection systems, as well as the creation of mobile complexes for autonomous monitoring of airspace in conditions of limited computing resources. The results of the work have applied significance for the defense forces, civil security and technical support of facilities with increased requirements for early detection of air threats.

Keywords: radio frequency monitoring; low-visibility targets; spectral analysis; digital processing; adaptability.

Стаття надійшла до редакції 02.08.2025 р.

Прийнято до друку 10.09.2025 р.