

Ковальчук О. О. ORCID: 0000-0003-1372-6284 (ВІТІ ім. Героїв Крут)  
д-р техн. наук, доцент Беляков Р. О. ORCID: 0000-0001-9882-3088 (ВІТІ ім. Героїв Крут)  
Металіди О. Г. ORCID: 0009-0005-2534-0612 (НУОУ)

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

У статті проведено комплексний аналіз сучасних методів виявлення безпілотних літальних апаратів із використанням сенсорних систем різних типів з урахуванням еволюції повітряних загроз і появи нових типів малорозмірних дронів. Предметом дослідження є методи виявлення безпілотних літальних апаратів (БпЛА) радіолокаційними, радіочастотними, акустичними та оптико-електронними/інфрачервоними підсистемами, а також принципи їх інтеграції в багатосенсорну інформаційно-керуючу архітектуру. Особливий акцент зроблено на домінуванні на полі бою малорозмірних FPV-дронів і появи апаратів з оптоволоконним каналом керування, які фактично є імунними до засобів радіоелектронної боротьби та «невидимими» для RF-детекторів, що формує критичний розрив у традиційних C-UAS (від англ. Counter-Unmanned Aircraft Systems) підходах.

Систематизовано можливості та обмеження кожної сенсорної модальності. Показано, що ефективність радіолокаційних систем (РЛС) визначається малою ефективною площею розсіювання (ЕПР) цілі та умовами прямої видимості; при зменшенні ЕПР різко скорочується дальність детекції, а флуктуації ЕПР через обертання роторів ускладнюють супроводження. Водночас аналіз мікродоплерівських сигнатур розглянуто як перспективний інструмент розрізнення БпЛА та птахів, а також класифікації типу апарата за спектральними ознаками. Встановлено, що RF-методи забезпечують високу ймовірність виявлення лише для дронів з активним радіоканалом і є принципово непридатними для автономних та оптоволоконних платформ. Для акустичних систем визначено ключові переваги пасивності та NLOS (від англ. Non-Line-of-Sight) здатності, але підкреслено обмеження дальності, залежність від вітру й підвищений рівень хибних тривог у міському шумі. Для електронно-оптичного/інфрачервоного каналу зазначено критичну залежність від метеоумов, освітленості та теплового контрасту, а також потребу у зовнішньому цілевказанні через обмежене поле зору при великому збільшенні кратності оптичного модуля.

Обґрунтовано необхідність переходу від одноканальних рішень до багатосенсорної архітектури зі злиттям даних MSDF (від англ. Multi-Sensor Data Fusion) та адаптивним зважуванням інформаційних потоків залежно від параметрів середовища і достовірності каналу. Запропоновано концептуальну модель інформаційно-керуючої системи (ІКС) спостереження на основі бездротових сенсорних мереж (БСМ) із індикаторами доступності вимірювань для різних сенсорів, що особливо важливо при відсутності RF-компоненти для виявлення оптоволоконних БпЛА. Підкреслено роль алгоритмів штучного інтелекту для зниження хибних спрацювань, класифікації мікродоплерівських/візуальних/акустичних ознак і підвищення надійності прийняття рішень у реальному часі. Отримано висновок, що лише інтеграція кількох сенсорних модальностей у розподілену мережеву систему MSDF забезпечує необхідний рівень ймовірності виявлення малорозмірних БпЛА в умовах стохастичних збурень зовнішнього середовища та еволюції способів керування дронами.

**Ключові слова:** інформаційно-керуюча система, безпілотний літальний апарат, ф'южн-алгоритм, методи виявлення, штучний інтелект, радіотехнології, системи автоматичного управління, обробка даних, бездротові сенсорні мережі, сенсор.

### **O. Kovalchuk, R. Bieliakov, O. Metalidi. Analysis of methods for detecting unmanned aerial vehicles using wireless sensor networks**

The article presents a comprehensive analysis of modern methods for detecting unmanned aerial vehicles (UAVs) within wireless sensor networks, taking into account the evolution of aerial threats and the emergence of new types of small-sized drones. The subject of the study is UAV detection methods based on radar, radio-frequency, acoustic, and electro-optical/infrared subsystems, as well as the principles of their integration into a multisensor information and control architecture. Particular emphasis is placed on the dominance of small FPV drones on the battlefield and the emergence of platforms with fiber-optic control links, which are effectively immune to electronic warfare systems and "invisible" to RF detectors, thereby creating a critical gap in traditional Counter-Unmanned Aircraft Systems (C-UAS) approaches.

The capabilities and limitations of each sensor modality are systematized. It is shown that the effectiveness of radar systems is determined by the small radar cross-section (RCS) of the target and line-of-sight conditions; as the RCS decreases, the detection range drops sharply, while RCS fluctuations caused by rotor rotation complicate target tracking.

*At the same time, the analysis of micro-Doppler signatures is considered a promising tool for distinguishing UAVs from birds and for classifying the type of platform based on spectral features. It is established that RF methods provide a high probability of detection only for drones with an active radio channel and are fundamentally unsuitable for autonomous and fiber-optic platforms. For acoustic systems, the key advantages of passive operation and non-line-of-sight (NLOS) capability are identified, while their limitations in terms of range, dependence on wind conditions, and elevated false alarm rates in urban noise are emphasized. For the electro-optical/infrared channel, a critical dependence on weather conditions, illumination, and thermal contrast is noted, as well as the need for external cueing due to the limited field of view at high optical magnification.*

*The necessity of transitioning from single-channel solutions to a multisensor architecture with Multi-Sensor Data Fusion (MSDF) and adaptive weighting of information flows depending on environmental parameters and channel reliability is substantiated. A conceptual model of an information and control surveillance system based on wireless sensor networks is proposed, incorporating indicators of measurement availability for different sensors, which is especially important in the absence of an RF component for detecting fiber-optic UAVs. The role of artificial intelligence algorithms in reducing false alarms, classifying micro-Doppler, visual, and acoustic features, and improving the reliability of real-time decision-making is emphasized. It is concluded that only the integration of several sensor modalities into a distributed networked MSDF system can provide the required probability of detecting small UAVs under stochastic environmental disturbances and evolving drone control methods.*

**Keywords:** *information and control system, unmanned aerial vehicle, fusion algorithm, detection methods, artificial intelligence, radio technologies, automatic control systems, data processing, wireless sensor networks, sensor.*

## **1. Постановка проблеми в загальному вигляді**

У сучасних умовах БпЛА набувають усе ширшого застосування в різноманітних галузях – від розважальних і цивільних до спеціалізованих військових систем. Паралельно із цим зростає актуальність створення надійних і результативних засобів їх своєчасного виявлення. Розроблення таких рішень становить складну науково-технічну проблему, оскільки більшість дронів характеризуються малими габаритами, низькою помітністю та здатністю функціонувати в умовах перешкод, складного рельєфу й несприятливих погодних факторів.

У статті здійснено ґрунтовний огляд ключових технологій і технічних підходів до виявлення БпЛА. Розглянуто їхні функціональні можливості, а також визначено основні переваги й обмеження кожного методу. Порівняльний аналіз сильних і слабких сторін різних підходів дозволяє сформуванню цілісного уявлення про їхню ефективність та доцільність застосування залежно від умов експлуатації й характеру загроз та підкреслити актуальність напрямку наукового дослідження.

### **Мета дослідження**

Метою цієї роботи є проведення комплексного аналізу та впорядкування сучасних підходів до виявлення БпЛА з урахуванням їхніх технічних характеристик, експлуатаційної ефективності та функціональних обмежень. Дослідження орієнтоване на порівняльну оцінку основних сенсорних технологій – радіолокаційних, акустичних, оптико-електронних та радіочастотних систем – з визначенням їхніх сильних і слабких сторін у різних умовах застосування. Отримані результати покликані сформуванню систематизовану науково-методичну основу для подальшого вдосконалення існуючих і розроблення новітніх, більш результативних підходів виявлення БпЛА.

## **2. Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Радіолокаційні засоби (РЛС) використовуються для активного зондування простору та залишаються одним із базових каналів виявлення малорозмірних БпЛА, особливо за обмеженої видимості. У роботі [1] запропоновано метод виявлення й класифікації дронів за range-Doppler картами FMCW-радарів, де згортовка нейромережа підвищує стійкість до зниження сигналу на дальності та нечітких мікродоплерівських ознак. У дослідженні [2] проведено аналіз мікродоплерівських сигнатур БпЛА та показано, що коректне виділення мікрорухів (обертання гвинтів/роторів) у FMCW-спостереженнях підвищує точність класифікації, а також окреслено практичні обмеження для малих цілей. Додатково, сучасні огляди зазначають зсув від “класичної” детекції до DL-класифікації за мікродоплером та комбінування ознак для зменшення хибних тривог [3]. Оптико-електронні (ОЕ) засоби

забезпечують спостереження у видимому та ІЧ-діапазоні й активно розвиваються завдяки DL-детекторам малих об'єктів. У роботі [4] показано застосування YOLOv5 для виявлення малих дронів у тепловізійному діапазоні, що є критичним у сутінках/ночі та при слабкому контрасті. У статті [5] запропоновано модифікацію YOLOv5 (IRSDD-YOLOv5) зі спеціалізованими модулями для інфрачервоних малорозмірних цілей, що підвищує якість детекції саме для “малих” дронів у ІЧ-зображеннях. У роботі [6] YOLOv5 – метод, що застосовується як базова модель глибокого навчання для автоматичного виявлення БпЛА на зображеннях та відео, однак СВ-YOLOv5 покращує метрики детекції дронів завдяки змінам у backbone/neck та кращій роботі з дрібними об'єктами. Акустичні методи базуються на аналізі характерних частот і спектральних ознак двигунів/гвинтів БпЛА. У [7] запропоновано підхід із blind source separation для підвищення завадостійкості акустичного виявлення в реальному середовищі. У [8] експериментально досліджено ML-виявлення акустичних сигналів БпЛА з урахуванням дальності та впливу середовища, що важливо для налаштування порогів і сценаріїв розгортання сенсорів. Окремий сучасний напрям – DL-розпізнавання акустичних подій БпЛА (у т. ч. для мікрофонних масивів), що підвищує точність при низькому SNR [9], а також легкі архітектури, придатні для польового застосування [10]. Інтеграція різноманітних сенсорів та злиття даних у бездротових/розподілених мережах дозволяє істотно підвищити достовірність виявлення та знизити хибні спрацювання, порівняно з моносенсорними системами. У [11] показано ефективність злиття RF- та акустичних ознак із глибокими неймережами для підвищення надійності детекції. У [12] запропоновано ф'южн-підхід (RF + акустика) на рівні ознак/рішень для кращої ідентифікації БпЛА в завадах. У технічному звіті JRC [13] наведено таксономію сенсорів C-UAS та підкреслено, що мультисенсорне злиття є ключовим для задач ДТІ (від англ. Detection Tracking Identification) у реальному часі для критичної інфраструктури. Також у [14] продемонстровано неймережевий фреймворк аудіовізуального ф'южн-алгоритму для відокремлення дронів від фонових подій у відео- та аудіопотоках. Розподілені мережі БпЛА та децентралізована обробка розглядаються як перспектива для масштабування ІКС, але потребують адаптивних алгоритмів керування ресурсами, стійких каналів та узгоджених протоколів обміну. У [15] подано сучасний огляд застосувань AI в UAV-enabled wireless networks (планування, автономність, управління ресурсами), що формує наукову базу для децентралізованих рішень у мережах із БпЛА. Обробка великих обсягів даних та IoT-концепції стають критичними для ІКС, оскільки багатосенсорні системи генерують високошвидкісні потоки вимірювань і потребують малих затримок прийняття рішень. У [16] наведено огляд Edge AI як підходу до перенесення інтелектуальної обробки “на край” мережі (на сенсорні вузли/локальні сервери), що дозволяє зменшити затримку та навантаження на магістральні канали. У [17] виконано мета-огляд edge intelligence для IoT-сервісів, де узагальнено архітектури та типові обмеження (ресурси, енергія, приватність), важливі для побудови масштабованих ІКС. Крім того, у [18] систематизовано підходи big data analytics для інтелектуальних систем із потоковими даними, що корисно як загальний методологічний фундамент для підсистем зберігання/аналітики в ІКС. У [19] запропоновано ієрархічну модель інтелектуального управління мережею, у межах якої повітряні вузли на базі БпЛА можуть виступати носіями сенсорів і ретрансляторами даних, що є важливим для побудови розподілених систем спостереження та виявлення. У [20] виконано оцінку ефективності методологічних підходів до ієрархічного інтелектуального управління наземно-повітряною AD-Нос мережею із застосуванням алгоритмів машинного навчання, що створює підґрунтя для адаптивної маршрутизації, керування ресурсами та оперативного передавання результатів виявлення у багатосенсорних ІКС.

### **3. Виклад основного матеріалу**

Сучасний етап розвитку Збройних Сил провідних країн світу характеризується фундаментальною трансформацією характеру повітряних загроз, обумовленого стрімким зростанням ролі БпЛА як у військовій сфері, так і в цивільному секторі. Результати аналізу

воєнних дій на території України 2022–2025 років, проведеного Royal United Services Institute (RUSI), свідчать, що понад 80 % бойових втрат спричинені БпЛА різних класів – від тактичних FPV-дронів масою 0,3–1,5 кг до ударних апаратів типу Shahed-136 з бойовою частиною 40–50 кг.

Масштаби застосування БпЛА є безпрецедентними, на основі статистичних даних The Economist, сумарні втрати обох сторін конфлікту сягають близько 10 000 дронів щомісяця. Зазначені тенденції породжують потребу в розробці ефективних систем виявлення та протидії БпЛА (Counter-UAS, C-UAS).

Водночас задача виявлення дронів є нетривіальною з огляду на специфічні характеристики таких повітряних об'єктів, як: малі геометричні розміри, низька ефективна площа розсіювання (ЕПР), відносно невелика швидкість польоту та низький рівень акустичного випромінювання електричних двигунів. Додаткову складність створює характер застосування БпЛА, тобто здатність здійснювати політ на малих висотах серед природних і штучних перешкод (рослинність, забудова), маскуючись на фоні птахів та інших рухомих об'єктів.

Виявлення малорозмірних БпЛА радіолокаційними засобами обмежується фундаментальними фізичними характеристиками цілей. Ефективна площа розсіювання комерційних і саморобних дронів варіюється в широких межах залежно від розміру, конструкції та матеріалів корпусу. Нано-БпЛА масою до 250 г мають ЕПР менше 0,001 м<sup>2</sup>. Мікро-БпЛА типу FPV 5" характеризуються ЕПР в діапазоні 0,001–0,01 м<sup>2</sup>. Міні-БпЛА класу DJI Mavic мають ЕПР 0,01–0,05 м<sup>2</sup>. Малі БпЛА типу DJI Matrice – 0,05–0,1 м<sup>2</sup>.

Залежність дальності виявлення від ЕПР визначається рівнянням радіолокації. Відношення сигнал/шум на виході приймача пропорційне четвертому степеню відношення ЕПР до четвертого степеня дальності. При зменшенні ЕПР вдвічі для збереження того ж відношення сигнал/шум необхідно зменшити дальність у  $2^{1/4} \approx 1,19$  рази. Для типового протидронового радара з дальністю виявлення 10 км при ЕПР 0,01 м<sup>2</sup> дальність виявлення FPV-дрона з ЕПР 0,001 м<sup>2</sup> становитиме лише 5,6 км, що суттєво скорочує час на прийняття рішення та застосування засобів ураження.

Флуктуації ЕПР дронів внаслідок обертання роторів та зміни ракурсу спостереження суттєво ускладнюють стабільне супроводження. Варіації ЕПР можуть досягати 10–20 дБ протягом одного циклу обертання ротора, що відповідає першій моделі Сверлінга з коефіцієнтом варіації близько одиниці. Для компенсації флуктуацій необхідне застосування алгоритмів некогерентного накопичення або адаптивних методів виявлення.

Перспективним методом розрізнення БпЛА є аналіз мікродоплерівських сигнатур. Обертання роторів мультикоптерів створює характерну модуляцію відбитого сигналу, відому як HERM-лінії (Helicopter Rotor Modulation). Частота модуляції визначається швидкістю обертання роторів (3000–30000 об/хв) та кількістю лопатей, і типowo знаходиться в діапазоні 50–500 Гц. Спектральний аналіз доплерівської модуляції дозволяє визначити тип апарата (квадрокоптер, гексакоптер, літак), кількість роторів та навіть наявність корисного навантаження за зміною інерції роторів.

#### **Виявлення автономних БпЛА з оптоволоконним управлінням**

FPV-дрони (First Person View) є домінуючим типом ударних БпЛА у сучасному російсько-українському конфлікті. Типові характеристики бойових FPV: маса 0,3–1,5 кг; розмір 200–350 мм по діагоналі; ЕПР 0,001–0,05 м<sup>2</sup>; швидкість 80–200 км/год; дальність 5–15 км для радіокерованих варіантів та 5–50 км для оптоволоконних; час польоту 5–15 хв; корисне навантаження 0,5–3 кг вибухівки.



Рис. 1. Основні компоненти управління FPV-дронем

Масштаби виробництва та застосування FPV-дронів показують експоненційне зростання. Україна у 2024 році придбала 1,5 млн FPV-дронів від вітчизняних та закордонних виробників. На 2025 рік заплановано закупівлю 4,5 млн одиниць – трикратне збільшення порівняно з попереднім роком. Динаміка місячного виробництва вражає: січень 2024 року – 20 000 одиниць, грудень 2024 року – 200 000 одиниць, план на грудень 2025 року – близько 540 000 одиниць. За протяжності активної лінії фронту 960 км щільність FPV-атак у 2025 році досягає приблизно 20 дронів на кілометр фронту на добу.

Оптоволоконні FPV-дрони представляють принципово нову загрозу для систем протидії БпЛА. Перше масове бойове застосування апаратів з оптоволоконним управлінням зафіксовано навесні 2024 року з боку російської федерації. Україна адаптувала технологію протягом кількох місяців. Технічно оптоволоконний FPV відрізняється від радіокерованого наявністю котушки з тонким одномодовим оптичним волокном діаметром 0,1–0,2 мм. Довжина кабелю серійних зразків складає 5–20 км, експериментальних – до 50 км. Швидкість передачі даних по оптоволокну досягає 1 Гбіт/с при затримці менше 1 мс. Додаткова вага котушки складає 500–1800 г, додаткова вартість – 200–500 дол. США.



Рис. 2. Управління FPV-дронем на основі оптоволоконного методу

Переваги оптоволоконних FPV визначають їхню зростаючу роль на полі бою. Повний імунітет до засобів радіоелектронної боротьби є ключовою перевагою, оскільки процес подавлення радіочастот не впливає на оптичний канал управління. За різними оцінками, засоби

РЕБ збивають 75–90 % радіокерованих дронів, тоді як ефективність проти оптоволоконних апаратів дорівнює нулю. Невидимість для RF-детекторів означає, що близько 40 % сенсорного парку сучасних систем протидії БпЛА, що базуються на радіочастотному виявленні, стають повністю неефективними. Ідеальна якість відеозв'язку забезпечується відсутністю інтерференції та мінімальними затримками оптичного каналу, що підвищує точність наведення. Можливість польоту в “радіотіні”, тобто у будівлях, лісових масивах, ярах та інших місцях з поганим радіопокриттям, що розширює тактичні можливості застосування. Режим «засідки» дозволяє дрону приземлитися біля дороги та чекати на ціль годинами з мінімальним енергоспоживанням.

Методи виявлення оптоволоконних FPV обмежені трьома типами сенсорів, що здатні реєструвати фізичний об'єкт незалежно від каналу управління. Радіолокаційні системи залишаються основним засобом виявлення, однак мала ЕПР оптоволоконних FPV (менше  $0,01 \text{ м}^2$ ) обмежує практичну дальність до 2–5 км для типових антидронових радарів. Електрооптичні та інфрачервоні системи забезпечують візуальне виявлення, при цьому потребують зовнішнього цілевказання через обмежений кут огляду та неефективність вночі і в поганих погодних умовах. Акустичні системи реєструють звук роторів на дальності 150–500 м, що при швидкості цілі понад 100 км/год залишає лише 5–18 с на реакцію.

*Формалізація завдання ІКС спостереження та виявлення БпЛА.*

Нехай вектор стану цілі  $\mathbf{x}(t) = [x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T$  описує положення та швидкість БпЛА у тривимірному просторі. Для кожного типу сенсора  $s \in \text{radar}, RF, EO, \text{acoustic}$  визначимо функцію спостереження  $\mathbf{h}_s(\mathbf{x})$  та індикатор доступності вимірювань  $\chi_s(\mathbf{x}, \mathbf{e})$ , де  $\mathbf{e}$  – вектор параметрів середовища та характеристик цілі.

Для БпЛА з оптоволоконним управлінням:

$$\chi_{RF}(\mathbf{x}, \mathbf{e}_{fiber}) = 0 \quad \forall \mathbf{x}, t,$$

тобто RF-канал є принципово недоступним незалежно від положення цілі та умов функціонування. Матриця спостереження системи виглядає так:

$$\mathcal{O} = [H_{\text{radar}} \ H_{EO} \ H_{\text{acoustic}}],$$

і не включає компоненту RF-детектора, що знижує загальну надійність виявлення та ускладнює задачу ідентифікації цілі.

Завдання ускладнюється тим, що оптико-електронні системи, які теоретично здатні виявляти будь-які візуально помітні об'єкти, мають суттєві обмеження: критична залежність від погодних умов (падіння ймовірності виявлення  $P_d$  на 50–80 % при тумані), неможливість роботи EO-каналу вночі, відсутність прямої інформації про дальність без активних лазерних далекомірів.

Таким чином, виявлення БпЛА з оптоволоконним управлінням потребує обов'язкового застосування радіолокаційних та акустичних сенсорів, причому з урахуванням малої ЕПР таких апаратів ( $\sigma = 0,001\text{--}0,01 \text{ м}^2$  для типових FPV-дронів) дальність радіолокаційного виявлення суттєво обмежена.

#### **Акустичні системи виявлення БпЛА**

Акустичний метод виявлення БпЛА ґрунтується на реєстрації та аналізі характерних звукових коливань, що генеруються несучими гвинтами та силовими установками БпЛА. Високочутливі мікрофони, об'єднані у просторові решітки (масиви), забезпечують прослуховування акустичного простору в зоні відповідальності системи.

Принцип функціонування акустичних систем базується на вимірюванні часової затримки прийому звукового сигналу до елементів мікрофонного масиву, що дозволяє визначити

напрямок на джерело звуку. Застосування кількох просторово рознесених мікрофонних вузлів забезпечує можливість локалізації положення повітряного об'єкта методом тріангуляції.

Акустичні сенсорні системи здатні виявляти БпЛА в умовах відсутності прямої видимості, що є перевагою в умовах міської забудови та складного рельєфу. За результатами випробувань, ймовірність виявлення в ідеальних умовах становить  $P_d = 0,995$ , що є вищим показником серед розглянутих технологій.

До переваг акустичних датчиків слід віднести:

- повну пасивність роботи (відсутність власного випромінювання);
- здатність виявляти всі типи БпЛА, зокрема автономні апарати з оптоволоконним управлінням, що не використовують радіоканал;
- можливість функціонування в умовах обмеженої прямої видимості (NLOS);
- відносна простота розгортання та відносно-низька вартість (500–5 000 дол. США за сенсор).

Водночас акустичний метод має суттєві обмеження:

1. Мала дальність виявлення: типові значення для одиничного сенсора становлять 150–500 м для електричних БпЛА, що обумовлено швидким затуханням акустичних хвиль в атмосфері [10; 12]. Сучасні розробки з удосконаленими мікрофонними решітками дозволяють розширити радіус виявлення до 2 км (система Insignito Dumbo), а для БпЛА з двигунами внутрішнього згоряння заявляється дальність до 5 км.

2. Критична залежність від швидкості вітру: поріг працездатності системи обмежується значенням  $V_{wind} < 15$  м/с. Пориви вітру створюють акустичний фон, що маскує звук БпЛА, та викривляють траєкторію поширення звукових хвиль.

3. Високий рівень хибних тривог: ймовірність хибної тривоги  $P_{fa} = 0,03 - 0,10$  в міському середовищі, що є найвищим показником серед розглянутих технологій.

4. Похибка позиціонування: до  $\pm 30^\circ$  по азимуту для одиничного сенсора без застосування мережевої тріангуляції.

5. При виявленні групових цілей (роїв БпЛА) акустична система фіксує лише сумарний звуковий сигнал без можливості диференціації окремих апаратів та може вимагати вирішення додаткової задачі класифікації.

### **Радіочастотні аналізатори для виявлення БпЛА**

Радіочастотний (RF) метод виявлення орієнтований на реєстрацію та аналіз електромагнітного випромінювання, що використовується для управління БпЛА та передачі телеметричної інформації. Більшість комерційних і саморобних дронів функціонують у стандартних діапазонах частот (2,4 ГГц, 5,8 ГГц), що забезпечує можливість їх виявлення пасивними радіотехнічними засобами.

Існує два основні типи RF-аналізаторів: пеленгатори та декодери сигналів. Пеленгатори використовують антенні системи, як правило, кілька просторово рознесених приймачів для визначення напрямку на джерело радіовипромінювання шляхом вимірювання кута приходу сигналу. Для тривимірної локалізації цілі необхідно щонайменше три станції пеленгування.

Декодери сигналів здійснюють ідентифікацію протоколу зв'язку дрона з подальшим отриманням телеметричних даних. Сучасні системи, зокрема DroneShield DroneSentry з RFAI™ engine, забезпечують 360° покриття з класифікацією загроз та можливістю ідентифікації серійного номера дрона. Прикладом спеціалізованого декодера є система DJI Aeroscope, яка розпізнає сигнали апаратів виробництва DJI та збирає ідентифікаційну інформацію і координати БпЛА.

Переваги RF-аналізаторів включають:

- пасивний режим роботи без демаскуючого випромінювання;
- високу ймовірність виявлення комерційних БпЛА:  $P_d = 0,95 - 1,0$  для апаратів з активним радіоканалом управління на дистанціях 1–5 км;
- низький рівень хибних тривог:  $P_{fa} < 0,05$ ;

- можливість одночасного виявлення кількох БпЛА та локалізації позиції оператора;
- відносно невисоку вартість: 5–50 тис. дол. США за систему.

Обмеженням RF-методу є абсолютна неспроможність виявлення автономних апаратів без радіовипромінювання.

До категорії “невидимих” для RF-детекторів БпЛА належать:

1. FPV-дрони з оптоволоконним (fiber-optic) управлінням, що передають відеосигнал та команди керування по оптичному кабелю замість радіоканалу. Такі системи набули масового застосування на сучасному театрі воєнних дій завдяки повному імунітету до засобів РЕБ.

2. Автопілоти з INS/GNSS навігацією в режимі радіомовчання, які виконують політ за попередньо запрограмованим маршрутом без обміну даними з оператором.

3. Ударні БпЛА типу Shahed-136 на автономній ділянці траєкторії після виходу з зони управління продовжують політ автономно за даними інерціальної навігаційної системи з корекцією по GPS/ГЛОНАСС.

За експертними оцінками, близько 40 % сенсорного парку сучасних С-UAS систем базуються на RF-детекторах і є неефективними проти автономних загроз, що створює критичну прогалину в системі ППО, особливо із урахуванням тенденції до збільшення частки автономних БпЛА у загальній структурі загроз.

– Залежність від рельєфу, тобто від умов складної неоднорідної місцевості (міська забудова, ліс, пересічений рельєф) дальність виявлення значно зменшується через погане проходження радіохвиль крізь перешкоди.

– Фізичне випромінювання Wi-Fi, Bluetooth, стільниковий зв'язок створюють високий рівень завад, серед яких слабкий сигнал БпЛА може бути важко виокремити.

– Обмеженість бази сигнатур, вузькоспеціалізовані декодери не розпізнають нестандартні протоколи або апарати невідомих виробників.

### **Електрооптичні та інфрачервоні системи виявлення БпЛА**

Оптичні системи виявлення використовують відеокамери видимого діапазону та тепловізори для реєстрації зображення БпЛА з подальшим автоматичним або напівавтоматичним розпізнаванням цілей. Сучасні електрооптичні модулі, як правило, інтегрують денну камеру високої роздільності та інфрачервону камеру для забезпечення цілодобового функціонування.

Оптичні сенсори, як правило, працюють у режимі підтвердження виявлення, після отримання цільовказівки від первинного датчика (радар, RF-аналізатор) поворотна камера наводиться на відповідний сектор простору та здійснює ідентифікацію об'єкта. Системи класу CONTROP EO/IR (застосовуються в Rafael Drone Dome) досягають дальності 8 км з функціями автоматичного розпізнавання цілей (Automatic Target Recognition, ATR) та детекції руху у відеопотоці (Video Motion Detection, VMD).

Нижче наведено переваги оптико-електронних сенсорів:

- можливість візуальної ідентифікації типу цілі та характеру підвішеного навантаження;
- фіксація доказових матеріалів (фото/відео);
- пасивний режим роботи без демаскуючого випромінювання;
- висока ймовірність виявлення в ідеальних умовах,  $P_d = 0,85 - 0,99$  (ясна погода, денний час, контрастний фон);

– здатність виявляти всі типи БпЛА, зокрема апарати з оптоволоконним управлінням.

Обмеження оптичного каналу:

1. Відсутність прямої інформації щодо дальності без застосування активних лазерних далекомірів. Камера визначає кутові координати цілі у площині зображення, що ускладнює тривимірну локалізацію об'єкта.

2. Залежність від погодних умов:

- Падіння видимості  $< 500$  м  $P_d$  на 50–80 % при впливі туману;
- падіння  $P_d$  на 20–40 % при сильному дощі;

– неможливість роботи EO-каналу вночі, тобто необхідний перехід на IR-діапазон.

3. Вплив динамічних спотворень, так за даними MDPI 2024 [10], сильне розмиття руху (motion blur) спричиняє падіння метрики mAP (mean Average Precision) на 77 пунктів, що різко знижує точність автоматичної класифікації.

4. Високий рівень хибних тривог  $P_{fa} = 0,05 - 0,20$ . Птахи, сторонні об'єкти, літальні апарати на великій висоті можуть хибно класифікуватися як БПЛА.

5. Обмежене поле зору при великому збільшенні, тобто оптико-електронні системи з довгофокусною оптикою (30–60×) мають вузький кут огляду, що ускладнює самостійне панорамне сканування простору без зовнішнього цілевказання.

Тепловізійні камери забезпечують виявлення цілей в умовах обмеженої видимості (ніч, туман, задимлення), ресструючи теплове випромінювання силової установки та акумуляторних батарей БПЛА. Однак їхня ефективність залежить від теплового контрасту: в умовах високої температури повітря або при схожій температурі цілі та фону дрон може “зливатися” з оточенням.

Математично формалізація залежності ймовірності виявлення EO/IR системи від умов середовища виглядає наступним чином.

Нехай  $e = [V_{vis}, T_{amb}, I_{light}, \sigma_{blur}]^T$  – вектор параметрів середовища, де  $V_{vis}$  – видимість, м;  $T_{amb}$  – температура повітря, °C;  $I_{light}$  – рівень освітленості, лк;  $\sigma_{blur}$  – параметр розмиття. Тоді:

$$P_d^{EO/IR}(e) = P_d^{max} \cdot \prod_i n_i(e),$$

де  $n_i(e) \in [0,1]$  – коефіцієнти деградації для кожного фактора впливу. При несприятливих умовах добуток коефіцієнтів може знижувати  $P_d$  до критично низьких значень.

#### Радіолокаційні системи виявлення БПЛА

Радіолокаційний метод є одним з найбільш надійних підходів до виявлення повітряних цілей. Суть методу полягає у процесі ідентифікації об'єкта на основі ефекту Доплера, тобто радар випромінює електромагнітні хвилі та приймає відбитий сигнал, що дозволяє визначити дальність, азимут, кут місця та швидкість об'єкта. Однак класичні радіолокаційні станції протиповітряної оборони розраховані на виявлення цілей з великою ЕПР (літаки, ракети), тому малорозмірні БПЛА для таких систем є малопомітними.

Останніми роками розроблено спеціалізовані антидронові радары, оптимізовані для виявлення цілей з малою ЕПР та низькою швидкістю. Характерними особливостями таких систем є робота на підвищених частотах (X-діапазон ~10 ГГц, Ku-діапазон), формування вузьких діаграм направленості антен та застосування чутливих доплерівських фільтрів.

Критичним фактором для радіолокаційного виявлення БПЛА є мала ЕПР малорозмірних апаратів. За результатами досліджень IEEE/MDPI, типові значення ЕПР становлять:

- DJI Phantom 4: порівняно з ЕПР птахів становить  $\sigma = 0,01-0,35 \text{ м}^2$ ;
- Nano/micro БПЛА:  $\sigma = 0,0001-0,01 \text{ м}^2$ ;
- FPV-дрони:  $\sigma = 0,001-0,05 \text{ м}^2$ ;
- ударні БПЛА типу Shahed-136:  $\sigma = 0,1-0,5 \text{ м}^2$ .

Залежність граничної дальності виявлення від ЕПР для X-band FMCW радарів описується співвідношенням:

- при  $\sigma = 0,1 \text{ м}^2$ :  $R_{max} = 3 \text{ км}$  при  $P_d = 0,83$ ,  $P_{fa} = 10^{-2}$ ;
- при  $\sigma = 0,01 \text{ м}^2$ :  $R_{max} \approx 1,5 \text{ км}$  при  $P_d = 0,60$ .

Дальність виявлення залежить від ЕПР за законом четвертого кореня (рівняння дальності радіолокації), що наведено нижче:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{min}}}$$

де  $P_t$  – потужність передавача;  $G$  – коефіцієнт підсилення антени;  $\lambda$  – довжина хвилі;  $\sigma$  – ЕПР цілі;  $P_{min}$  – мінімальна потужність сигналу для виявлення.

Перспективним напрямком є застосування технології аналізу мікродоплерівського підпису цілі характерних модуляцій відбитого сигналу, спричинених обертанням несучих гвинтів БпЛА. Така інформація дозволяє відрізнити дрон від птаха, так за даними, точність класифікації досягає  $> 98\%$  при застосуванні методів машинного навчання на основі мікродоплерівських сигнатур.

Переваги радарних систем:

- найбільша дальність виявлення серед розглянутих типів сенсорів (2–15+ км для тактичних систем, до 250 км для систем класу Thales GM200 MM);
- незалежність від погодних умов та освітлення;
- можливість точного автоматичного супроводження траєкторії одночасно десятків цілей;
- здатність виявляти повільні об'єкти, наприклад мінімальна доплерівська швидкість може становити до 0,1 м/с;
- низький рівень хибних тривог  $P_{fa} < 0,01$ ;
- здатність виявляти всі типи БпЛА, зокрема автономні апарати з оптоволоконним управлінням.

До основних обмежень радіолокаційних систем відносяться:

- Висока вартість впровадження та масштабування. Капітальні витрати на розгортання однієї одиниці обладнання варіюються в діапазоні від 50 тис. дол. США до понад 500 тис. дол. США, що робить економічно недоцільним побудову щільного поля покриття для захисту великих територій.
- Залежність дальності виявлення від ЕПР. Експериментально підтверджено кореляцію між дистанцією детекції та фізичними розмірами цілі. Для класу малорозмірних FPV-дронів, що характеризуються значенням ЕПР  $\sigma < 0,01$  м<sup>2</sup>, ефективна дальність виявлення деградує до значень 1–2 км, що не забезпечує достатнього часового запасу для реакції системи управління.
- Обмеження умов розповсюдження радіохвиль (NLOS). Функціонування класичних РЛС вимагає наявності прямої видимості (Line-of-Sight). В умовах складної забудови або пересіченої місцевості (режим Non-Line-of-Sight, NLOS) здатність системи до виявлення цілей суттєво знижується або втрачається повністю через ефекти затінення.
- Низька електромагнітна сумісність та прихованість. Активний режим випромінювання зондувальних сигналів виступає потужним демаскуючим фактором, що дозволяє засобам радіотехнічної розвідки противника виявляти, ідентифікувати та локалізувати позиції РЛС на значних відстанях.

Перевагою радіолокаційних систем в контексті виявлення БпЛА з оптоволоконним управлінням є їхня здатність виявляти будь-які фізичні об'єкти незалежно від наявності чи відсутності радіовипромінювання з боку цілі. Радар “бачить” fiber-optic FPV так само, як і звичайний дрон з радіоканалом, оскільки принцип виявлення базується на відбитті електромагнітних хвиль від корпусу апарата. Це робить радіолокаційні системи незамінним компонентом багатосенсорних комплексів протидії БпЛА.

Узагальнення характеристик розглянутих типів сенсорів на основі даних провідних світових виробників наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

## Порівняльні характеристики сенсорних підсистем виявлення БпЛА

Параметр	Акустичні	Радіочастотні	Радарні	ЕО/IR	Multi-sensor
Дальність виявлення, км	0,15–0,5	1–5	2–15+	0,5–4	0,5–15+
$P_d$ (ідеальні умови)	0,995	0,95–1,0	0,80–0,99	0,85–0,99	> 0,95
$P_{fa}$	0,03–0,10	< 0,05	< 0,01	0,05–0,20	< 0,01
Автономні БпЛА	так	ні	так	так	так
Погодні умови	низька	висока	висока	низька	адаптивна
NLOS виявлення	так	так	ні	ні	так

Як видно з таблиці, радіочастотні детектори є єдиним типом сенсорів, принципово нездатним виявляти БпЛА з оптоволоконним управлінням, що обумовлює необхідність включення до складу багатосенсорної системи радарних та/або акустичних компонентів.

Результати порівняльного аналізу тактико-технічних характеристик засобів моніторингу свідчать про відсутність сенсорної модальності, здатної забезпечити стабільно високі показники імовірності виявлення об'єктів  $P_{det} \rightarrow 1$  за умов впливу стохастичних збурень зовнішнього середовища. Для кожного класу сенсорів характерна наявність специфічних системних обмежень.

РЛС характеризуються найвищою стійкістю до метеорологічних факторів, однак їхня ефективність суттєво знижується під час детекції об'єктів із малою ЕПР, особливо на фоні підстилаючої поверхні.

Функціонування акустичних пеленгаторів має сильну залежність від параметрів атмосферного впливу, зокрема швидкості та напрямку вітру, наслідком чого стає деградація співвідношення сигнал/шум.

Для оптико-електронних та інфрачервоних систем властиве падіння ефективності виявлення до мінімальних значень за умов низької оптичної прозорості атмосфери, спричиненої туманом, опадами або задимленням.

Радіочастотні детектори принципово нездатні виявляти БпЛА під час роботи в режимі повної автономності без активного обміну даними з наземними станціями управління.

Наявна гетерогенність обмежень обумовлює необхідність переходу від одноканальних систем до комплексування інформаційних потоків (Multi-Sensor Data Fusion). Оптимальним рішенням вбачається застосування адаптивних алгоритмів обробки даних для динамічного зважування показань кожного сенсора в режимі реального часу на основі поточних параметрів середовища та апіорної оцінки достовірності каналу.

### Висновки та напрямки подальших досліджень

Таким чином, аналіз сучасних багатосенсорних систем та бойового досвіду російсько-українського конфлікту дозволяє сформулювати низку важливих узагальнень щодо побудови ефективних систем протидії БпЛА.

Принцип багатосенсорної інтеграції є визначальним для побудови ефективних систем виявлення. Жодна окрема технологія не забезпечує надійного виявлення всього спектра загроз: радарні обмежені малою ЕПР цілей, RF-детектори неспроможні виявляти автономні та оптоволоконні дрони, ЕО/IR-системи залежать від погодних умов, акустичні системи мають обмежену дальність. Лише інтеграція 2–4 типів сенсорів забезпечує взаємне доповнення можливостей та компенсацію обмежень.

Поява оптоволоконних методів управління FPV-дронами знаменує зміну парадигми протидії БпЛА. Близько 40 % існуючих систем C-UAS, що базуються на RF-технологіях, стають неефективними проти цього типу загроз. Виявлення можливе лише радарними, оптичними та акустичними засобами, що потребує перегляду архітектури систем протидії.

Тенденція до децентралізації систем протиповітряної оборони проявляється у забезпеченні кожного тактичного підрозділу власними засобами виявлення та нейтралізації.

Мобільні вогневі групи з великокаліберними кулеметами та тепловізійними прицілами демонструють високу ефективність при нижчій вартості за традиційні ЗРК.

Зростання ролі методів штучного інтелекту проявляється як у системах виявлення для автоматичної класифікації цілей та фільтрації хибних тривог, так і в системах управління БпЛА для координації роїв та автономного наведення.

Розподілені сенсорні мережі раннього попередження набувають ключового значення. Акустичні сенсори, пости візуального спостереження та RF-моніторинг, розгорнуті на глибині 5–10 км від лінії фронту, компенсують обмеження радарного виявлення малорозмірних цілей.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розроблення стохастичних моделей адаптивного зважування сенсорних каналів, впровадження глибинного навчання у задачі багаторівневого ф'южн та створення енергоефективних розподілених сенсорних мереж із можливістю автономного прийняття рішень у реальному часі. Отримані результати можуть бути використані під час проєктування сучасних систем протидії БпЛА та оптимізації структури інформаційно-керуючих систем у військовій і критичній інфраструктурі.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Han S.-K., Lee J.-H. Convolutional Neural Network-Based Drone Detection and Classification Using Overlaid Frequency-Modulated Continuous-Wave (FMCW) Range-Doppler Images // *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 17. Art. 5805. DOI: 10.3390/s24175805.
2. Bourn W., Paine S., Pidanic J. Micro-Doppler Signature Classification of Unmanned Aerial Vehicles Using FMCW Radar: proceedings of the 2024 International Radar Conference (RADAR). 2024. DOI: 10.1109/RADAR58436.2024.10994122.
3. Semenyuk V., et al. Advances in UAV detection: integrating multi-sensor technologies and data fusion techniques // *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2025. Art. 100744. DOI: 10.1016/j.ijcip.2025.100744.
4. Zubkov O., Sheiko S. Detection of Small Drones in Thermal Infrared Range Using YOLOv5 Neural Networks: proceedings of the 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). 2022. DOI: 10.1109/PICST57299.2022.10238493.
5. Yuan S., et al. IRSDD-YOLOv5: Focusing on the Infrared Detection of Small Drones // *Drones*. 2023. Vol. 7, No. 6. Art. 393. DOI: 10.3390/drones7060393.
6. Atik I., et al. Enhancing drone detection with BottleneckCSP and cross convolution in YOLOv5 // *Radiation Physics and Chemistry*. 2023. (Elsevier). (Дані про том/стор. — на сторінці видавця).
7. Wang W., Fan K., Ouyang Q., Yuan Y. Acoustic UAV detection method based on blind source separation framework // *Applied Acoustics*. 2022. Vol. 200. Art. 109057. DOI: 10.1016/j.apacoust.2022.109057.
8. Tejera-Berengue D., Zhu-Zhou F., Utrilla M., Gil-Pita R. Acoustic-Based Detection of UAVs Using Machine Learning: Analysis of Distance and Environmental Effects: proceedings of the 2023 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). 2023. DOI: 10.1109/SAS58821.2023.10254127.
9. Sun Y., Li, et al. Deep Learning-based drone acoustic event detection system for microphone arrays // *Multimedia Tools and Applications*. 2023. DOI: 10.1007/s11042-023-17477-1.
10. Liu Z., et al. Deep Learning-Based Acoustic Recognition of UAVs in Complex Environments // *Drones*. 2025. Vol. 9, No. 6. Art. 389. DOI: 10.3390/drones9060389.
11. Frid A., Ben-Shimol Y., Manor E., Greenberg S. Drones Detection Using a Fusion of RF and Acoustic Features and Deep Neural Networks // *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 8. Art. 2427. DOI: 10.3390/s24082427.
12. Aouladhadj D., et al. Drone Detection and Tracking Using RF Identification Signals // *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 17. Art. 7650. DOI: 10.3390/s23177650.
13. Grieco G., Amendola D., Anderson D. Counter-drone systems and data fusion. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. (Tech. rep.).
14. Audio-Visual Fusion and Deep Learning for Drone Detection // *Proceedings of the ACM* (конф. публікація). 2024. DOI: 10.1145/3643833.3656133.

15. Zhou L., et al. A Comprehensive Survey of Artificial Intelligence in UAV-enabled Wireless Networks // ICT Express (Elsevier). 2024.
16. Singh R., et al. Edge AI: A survey // Intelligent Systems with Applications. 2023. (Elsevier).
17. Barbuto V., et al. Disclosing Edge Intelligence: A Systematic Meta-Survey // Big Data and Cognitive Computing. 2023. (PDF).
18. Wang J., et al. Big data analytics for intelligent manufacturing systems: a review // Journal of Manufacturing Systems. 2022. (Elsevier).
19. Беляков Р. О. Ієрархічна модель інтелектуального управління наземно-повітряної комунікаційної мережі спеціального призначення // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. 2024. № 54. С. 225–235. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2024-54-28.
20. Беляков Р. О., Фесенко О. Д. Оцінка ефективності методологічних підходів ієрархічного інтелектуального управління наземно-повітряною комунікаційною AD-Нос мережею // Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки. 2024. Вип. № 5. DOI: 10.58254/viti.5.2024.02.15.

*Надійшла до редколегії 18.03.2026.*

*Схвалена до друку 22.05.2026.*

*Дата публікації 29.05.2026.*