

безпеки, зменшує залежність від зовнішніх аудитів і сприяє побудові ефективних інтелектуальних систем захисту інформації.

Список літератури

1. Мартовицький, ВО, et al. "Дослідження методів виявлення аномалій у ари журналах для забезпечення безпеки та надійності програмних систем." Вісник Херсонського національного технічного університету 2.1 (92) (2025): 142-148.

МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ РАДІОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ БПЛА

Лега О.С., Мартовицький В.О.

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

У сучасну епоху швидкого прогресу безпілотних літальних апаратів (БПЛА) проблема їхнього виявлення та розпізнавання стає дедалі актуальнішою. Завдяки невеликим розмірам, високій мобільності та порівняно низькій вартості, БПЛА стрімко знайшли застосування у цивільній, комерційній та військовій галузях. Зростання кількості малих БПЛА — від побутових квадрокоптерів до спеціалізованих платформ — суттєво підвищило вимоги до систем ситуаційної обізнаності, захисту периметра та протидії потенційним загрозам. Поряд із радарними, оптичними та акустичними технологіями, радіочастотні методи виявлення та класифікації вирізняються високою стійкістю до впливу погодних умов, можливістю роботи за відсутності прямої видимості та здатністю визначати тип апарата за його керуючими та телеметричними сигналами. Дослідження останніх років підкреслюють, що радіочастотний аналіз стає ключовою ланкою багатосенсорних систем виявлення/супроводу БПЛА, особливо у насичених міських радіоефірах [1].

Метою доповіді є комплексний аналіз сучасних методів та технологій радіочастотного виявлення і класифікації безпілотних літальних апаратів. У роботі передбачається розгляд принципів функціонування систем, що базуються на аналізі радіочастотного спектра. В доповіді наводяться результати дослідження методів виявлення та класифікації радіочастотних сигналів дрона, алгоритм їх роботи, переваги та недоліки кожної з запропонованих моделей.

БПЛА, що випромінюють радіочастотні сигнали, можна перехоплювати та аналізувати для відстеження та визначення їх місцезнаходження. Радіочастотні системи сканують спектр для виявлення сигналів, які передаються між БПЛА і його оператором. Вони можуть визначити частоти управління та передачі даних, ідентифікувати тип дрону та навіть місцезнаходження оператора. Процес виявлення БПЛА на основі радіочастот зазвичай включає аналіз радіочастотного сигналу для виділення характерних ознак, які потім порівнюються з базою даних радіочастотних профілів БПЛА для їх ідентифікації. Останніми роками значного поширення набули підходи, засновані на машинному навчанні, що суттєво вплинули на розвиток методів

виявлення БпЛА за допомогою радіочастот. Для підвищення ефективності цих методів дослідники застосовують різноманітні підходи, які можна поділити на дві основні категорії. Перша категорія передбачає використання методів обробки сигналів, наприклад, перетворення Фур'є, для виділення характеристик, після чого здійснюється класифікація за допомогою таких алгоритмів, як SVM, дерева рішень тощо. Друга категорія використовує мінімальну попередню обробку сигналів, покладаючись на нейронні мережі для автоматичного виділення ознак та ідентифікації сигналу БпЛА [2].

Розглянемо першу категорію, або традиційний метод радіочастотного виявлення. Цей метод ґрунтується на фіксації сигналів керування польотом і передачі відеосигналів, які передаються між безпілотником та його наземною станцією. Суть методу полягає в аналізі характеристик сигналу — таких як робоча частота, швидкість передавання символів, тип модуляції, ширина каналу та інші параметри, що формують унікальний «радіочастотний відбиток» конкретного БпЛА, що дозволяє не лише виявити БпЛА, а й ідентифікувати його тип. До даного методу входять наступні етапи:

- прийом сигналу – система приймає сигнали у визначених смугах частот, які використовуються для зв'язку між дроном оператором;
- попередня обробка сигналу - отримані сигнали підлягають фільтрації смуги, компенсації дрейфу осцилятора та калібруванню I/Q-каналів;
- детекція активності – вікна сигналу аналізуються на предмет наявності активності, що відповідає дрону;
- екстракція ознак – виділяються ознаки, які використовуватимуться для класифікації або ідентифікації [3];
- класифікація – на підставі виділених ознак застосовуються класичні алгоритми машинного навчання (SVM, kNN, Random Forest) або їх комбінації;
- пост-обробка – після класифікації система може генерувати сповіщення, запускати локалізацію джерела, вести логування чи передачу даних до системи реагування.

До переваг даного методу можна віднести наступне: пасивність і непомітність, незалежність від погодних умов і видимості, велика дальність виявлення, висока точність ідентифікації., низькі обчислювальні вимоги. Недоліки даного методу: залежність від наявності сигналу передачі, висока чутливість до завад, потреба в базі даних сигналів, з якими будуть порівнюватись виявлені сигнали, обмеження щодо просторового визначення [1].

Друга категорія – виявлення на основі радіочастот із використанням глибокого навчання. Головною перевагою методів глибокого навчання є здатність нейронних мереж автоматично витягувати релевантні ознаки безпосередньо з необроблених сигналів, без необхідності застосування складних алгоритмів попередньої обробки чи реконструкції сигналу. Наприклад, використання згорткових нейронних мереж (CNN) дозволяє ефективно виділяти ознаки зі стислих зондувальних сигналів, оминаючи процес відновлення вихідного сигналу. Це суттєво спрощує процес обробки сигналу та знижує вимоги до обчислювальних ресурсів.

Порівняно з традиційними методами виділення ознак, підхід із використанням глибокого навчання демонструє вищу ефективність та точність. У деяких експериментах точність виявлення та класифікації сигналів БпЛА досягала 99%. Крім того, глибокі нейронні мережі виявилися здатними до адаптації, що дозволяє їм працювати з різними типами сигналів і підвищувати точність навіть у випадках із зашумленими даними [2].

Метод глибокого навчання має наступний алгоритм:

- збір і попередня обробка сигналів – виконується перехоплення сигналів та їх фільтрація;
- формування навчальної вибірки – створюється база даних із запитів сигналів різних можелей дронів;
- вибір архітектури нейронної мережі – обирається найбільш підходяща архітектура;
- навчання моделі – модель тренується на розмічених даних [4];
- виявлення та класифікація – у реальному часі вхідні РЧ-сигнали передаються в натреновану мережу;
- оцінка ефективності – точність оцінюється за метриками.

Переваги даного методу: висока точність і надійність, автоматичне навчання ознак, адаптивність до нових умов, можливість обробляти сишнали в режимі реального часу. До недоліків даного методу можна віднести наступне: досить високі вимоги до обчислювальної техніки, потреба у великій кількості даних, потенційна вразливість до атак.

Радіочастотні методи є одним із найефективніших способів виявлення та класифікації безпілотних літальних апаратів. Традиційні підходи, засновані на аналізі спектра сигналів, забезпечують надійність і простоту реалізації, проте мають обмежену точність в умовах шуму чи складних радіочастотних середовищ. Сучасні технології, що базуються на машинному та глибокому навчанні, значно підвищують точність і здатність до розпізнавання конкретних типів дронів. Вони автоматизують процес аналізу спектра, дозволяючи системам виявлення адаптуватися до нових типів сигналів.

Список літератури

1. Rahman, M.H.; Sejan, M.A.S.; Aziz, M.A.; Tabassum, R.; Baik, J.-I.; Song, H.-K. A Comprehensive Survey of Unmanned Aerial Vehicles Detection and Classification Using Machine Learning Approach: Challenges, Solutions, and Future Directions. *Remote Sens.* 2024, 16, 879. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16050879>
2. Leha, O., V. Martovytskyi, and I. Severin. "analysis of methods for detecting unmanned aerial vehicles." *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць* 2.80 (2025): 13-19. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.2.013>
3. Nemer I, Sheltami T, Ahmad I, Yasar AU, Abdeen MAR. RF-Based UAV Detection and Identification Using Hierarchical Learning Approach. *Sensors (Basel)*. 2021;21(6):1947. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21061947>
4. Alam, S.S.; Chakma, A.; Rahman, M.H.; Bin Mofidul, R.; Alam, M.M.; Utama, I.B.K.Y.; Jang, Y.M. RF-Enabled Deep-Learning-Assisted Drone Detection and Identification: An End-to-End Approach. *Sensors* 2023, 23, 4202. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23094202>