

КОРНЄЄВ Віктор

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0005-8784-2271>

viktor.s.kornieiev@lpnu.ua

БЕРНЕВЕК Іван

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0000-2122-0545>

ivan.a.bernevek@lpnu.ua

ЯРЕМКО Олег

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0007-7740-9081>

oleh.m.yaremko@lpnu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ УТВОРЕННЯ СИГНАТУР БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

В роботі проаналізовано особливості формування радіочастотних сигнатур безпілотних літальних апаратів (БПЛА), встановлено основні чинники, що впливають на їх структуру та інформативність. Розглянуто методи визначення сигнатур на основі аналізу розсіювання електромагнітних хвиль у різних частотних діапазонах, а також досліджено залежність сигнатури від геометричної форми об'єкта та електрофізичних властивостей матеріалів конструкції. Проведено аналіз радіофону БПЛА як сукупності власних електромагнітних випромінювань каналів керування, телеметрії та передачі даних. Розглянуто часові характеристики сигналів, зокрема міжпакетні інтервали, статистичні параметри та автокореляційні властивості послідовностей, що використовуються як додаткові ознаки для ідентифікації. Введено індекс активності сигналу та ентропійні характеристики для кількісної оцінки інтенсивності та структурної складності сигналів. Проаналізовано зміну параметрів радіочастотної сигнатури БПЛА в залежності від фаз польоту, включаючи режими очікування, передстарту, активного польоту, зависання, автономного режиму та посадки. Встановлено, що кожному режиму відповідає характерна комбінація частоти передачі, потужності сигналу та часової структури, що формує унікальні сигнатурні ознаки. Розглянуто підходи до створення еквівалентних сигнатур за допомогою пасивних та активних методів, зокрема із використанням DRFM та SDR-технологій. Проаналізовано способи реалізації пристроїв формування сигнатур на основі сучасних протоколів зв'язку, таких як LoRa, DSSS/CDMA, ExpressLRS та Crossfire, а також методи генерації синтетичних часових послідовностей сигналів. Наведено графічне та діаграмне відображення процесу зміни радіочастотної сигнатури БПЛА залежно від режимів функціонування, з детальним описом параметрів сигналу.

Ключові слова: Безпілотні літальні апарати, RF-сигнатура БПЛА, радіочастотний аналіз, ідентифікація БПЛА

KORNIEIEV Viktor, BERNEVEK Ivan, YAREMKO Oleg

Lviv Polytechnic National University

INVESTIGATION OF RF SIGNATURE CHARACTERISTICS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

The features of radio-frequency (RF) signature formation of unmanned aerial vehicles (UAVs) were analyzed, and the main factors influencing their structure and informativeness were identified. Methods for determining signatures based on the analysis of electromagnetic wave scattering in different frequency ranges are considered, and the dependence of signatures on object geometry and material properties is investigated. The RF background of UAVs is analyzed as a combination of intrinsic electromagnetic emissions of control, telemetry, and data transmission channels. Temporal characteristics of signals are considered, including inter-packet intervals, statistical parameters, and autocorrelation properties of sequences used as additional identification features. The signal activity index and entropy-based characteristics are introduced for quantitative evaluation of signal intensity and structural complexity. Changes in RF signature parameters depending on UAV flight phases, including idle, pre-flight, active flight, hovering, autonomous operation, and landing, are analyzed. It is established that each operational mode corresponds to a characteristic combination of transmission frequency, signal power, and temporal structure, forming unique signature features. Approaches to generating equivalent signatures using passive and active methods are considered, including the application of DRFM and SDR technologies. Implementation methods of signature generation devices based on modern communication protocols such as LoRa, DSSS/CDMA, ExpressLRS, and Crossfire, as well as methods for generating synthetic temporal signal sequences, are analyzed. Graphical and diagram-based representations of RF signature variation depending on UAV operational modes are presented, with a detailed description of signal parameter dependencies.

Keywords: Unmanned aerial vehicles, UAV RF signature, UAV radio-frequency analysis, UAV identification, UAV detection.

Стаття надійшла до редакції / Received 20.04.2026
Прийнята до друку / Accepted 30.06.2026
Опубліковано / Published 10.09.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© КОРНЄЄВ Віктор, БЕРНЕВЕК Іван, ЯРЕМКО Олег

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Із розвитком безпілотних літальних апаратів (БПЛА) суттєво розширюються сфери їх застосування у військових, цивільних, наукових та спеціалізованих технічних системах. Сучасні БПЛА використовуються для розвідки, моніторингу територій, доставки вантажів, спостереження, а також для виконання задач в умовах підвищеного ризику. Одночасно зі зростанням кількості таких апаратів і ускладненням їх конструкції зростають вимоги до засобів їх виявлення, класифікації та ідентифікації. У цьому контексті особливого значення набуває дослідження сигнатур БПЛА як сукупності ознак, за якими об'єкт може бути виявлений та відрізнений від інших повітряних цілей.

Сигнатура БПЛА може формуватися за рахунок різних фізичних проявів об'єкта, зокрема радіолокаційних, електромагнітних, акустичних, інфрачервоних та оптичних характеристик. Одним із найважливіших напрямів є аналіз радіолокаційної сигнатури, оскільки саме вона визначає особливості взаємодії безпілотного апарата з радіохвилями та дозволяє оцінити його ефективну площу розсіювання, залежність від форми, матеріалів конструкції, просторової орієнтації та робочого діапазону частот. Для малорозмірних БПЛА ця задача є особливо актуальною, оскільки застосування композитних матеріалів, малих геометричних розмірів і конструктивних рішень зі зниженою помітністю ускладнює їх надійне виявлення традиційними засобами спостереження.

Питання виявлення та класифікації БПЛА за радіолокаційними характеристиками досліджувалися у працях J. S. Patel та ін. [2], де проведено огляд методів класифікації та вимірювання ЕПР малих БПЛА. I. K. Karoulas та ін. [3] дослідили сигнатури БПЛА з фіксованим крилом та можливості їх виявлення комерційними системами. Мікро-доплерівські сигнатури БПЛА та птахів у K- та W-діапазонах проаналізовано у роботі M. Ritchie та ін. [6]. Пасивне RF-виявлення на основі методів машинного навчання розглянуто у працях M. Ezuma та ін. [12] та M. Zahid та ін. [1]. Методи виявлення FHSS-сигналів контролерів БПЛА на основі STFT досліджено E. Ozturk та ін. [8].

Проте у зазначених роботах недостатньо висвітлено комплексний підхід до формування сигнатур, який би враховував одночасно радіолокаційні характеристики, пасивний аналіз радіофону та часові послідовності сигналів залежно від фаз польоту БПЛА.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є дослідження методів утворення сигнатур безпілотних літальних апаратів, аналіз основних способів їх визначення за характеристиками розсіювання електромагнітних хвиль, вивчення залежності сигнатур від форми об'єкта та частотних властивостей радіохвиль, а також розгляд підходів до створення поверхонь і пристроїв, відгук яких є еквівалентним реальному БПЛА.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

1. Способи визначення сигнатур

Сигнатура БПЛА як фізичний об'єкт формується внаслідок складної взаємодії електромагнітного випромінювання з конструктивними, матеріальними та геометричними особливостями апарата. Залежно від природи цієї взаємодії виділяють кілька принципово різних методів визначення сигнатур: на основі аналізу розсіювання електромагнітних хвиль у різних частотних діапазонах, дослідження залежності відгуку від форми об'єкта, а також пасивного аналізу власного радіовипромінювання БПЛА. Кожен із цих методів має свої особливості, обмеження та галузь застосування, що обумовлює необхідність комплексного підходу до задачі ідентифікації безпілотних апаратів.

1.1 Діапазони, що використовують розсіювання

Визначення сигнатур безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є ключовим аспектом для їх ідентифікації та класифікації. Одним із методів отримання таких сигнатур є аналіз розсіювання електромагнітних хвиль від об'єкта, що дозволяє визначити ефективну площу розсіювання (ЕПР) БПЛА. Для задач аналізу сигнатур БПЛА найбільше практичне значення мають такі діапазони:

1. Метровий діапазон (ОВЧ, 30–300 МГц)

У цьому діапазоні довжина хвилі співмірна або перевищує розміри БПЛА, що призводить до дифракційного характеру розсіювання. Це може ускладнювати точне визначення форми та розмірів об'єкта, але дозволяє виявляти БПЛА з композитних матеріалів, які менш помітні в вищих частотних діапазонах. Дослідження показують, що ефективна площа розсіювання (ЕПР) БПЛА в метровому діапазоні може бути достатньою для їх виявлення, незважаючи на матеріал конструкції.

2. Дециметровий діапазон (УВЧ, 0,3–3 ГГц; піддіапазони L та S)

У цьому діапазоні довжина хвилі є співмірною з характерними розмірами БПЛА, що призводить до появи резонансних ефектів. Це дозволяє отримати додаткову інформацію про геометрію об'єкта. Даний діапазон забезпечує баланс між дальністю виявлення та роздільною здатністю і широко використовується для задач супроводу та базової класифікації повітряних цілей.

3. Сантиметровий діапазон (НВЧ, 3–30 ГГц; піддіапазони С, Х, К)

Високочастотні радіолокаційні системи цього діапазону забезпечують високу роздільну здатність і точність виявлення. Довжина хвилі дозволяє детально розрізняти дрібні елементи конструкції БПЛА, такі як лопаті гвинтів. Проте, такі системи більш чутливі до атмосферних впливів, що може обмежувати їх ефективність в певних умовах. Дослідження показують, що в сантиметровому діапазоні ЕПР БПЛА значно залежить від кута падіння хвилі та поляризації, що слід враховувати при розробці радіолокаційних систем.

4. Міліметровий діапазон (КНВЧ, 30–300 ГГц; піддіапазони Ка, V, W)

Міліметровий діапазон забезпечує найвищу просторову роздільну здатність і дозволяє детально аналізувати структуру об'єкта, включаючи дрібні конструктивні елементи. Особливістю цього діапазону є можливість реєстрації виражених мікродоплерівських сигнатур, які виникають внаслідок руху окремих частин БПЛА, зокрема обертання лопатей гвинтів та вібрацій конструкції.

Застосування частотних діапазонів для аналізу сигнатур БПЛА

Малі БПЛА є особливо складними радіолокаційними цілями: їх ЕПР типово становить від –22 до –10 дБсм, а швидкість польоту — лише 2–15 м/с. Сучасні конвенційні системи радіолокаційного спостереження часто показують незадовільні результати при виявленні та супроводі малих БПЛА через їх суттєво меншу ЕПР порівняно зі звичайними повітряними суднами [3].

Додатковою проблемою є те, що птахи мають схожі фізичні розміри та ЕПР з малими БПЛА, а також летять на близьких висотах і швидкостях — тому надійна система виявлення БПЛА повинна вміти розрізняти ці два типи цілей. Саме тому для виявлення та класифікації БПЛА особливого значення набуває мікродоплерівська сигнатура — додаткова модуляція сигналу, спричинена обертанням лопатей гвинтів [5].

Порівняльну характеристику діапазонів з точки зору характеру сигнатури БПЛА наведено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Характер сигнатур БПЛА у різних радіолокаційних діапазонах

Діапазон	Частота	Характер сигнатури БПЛА	Інформативність для ідентифікації
Метровий (ОВЧ)	30–300 МГц	Дифракційна, слабо залежить від форми	Низька – деталі конструкції не розрізняються
Дециметровий (L, S)	0,3–3 ГГц	Резонансна, залежить від габаритів	Середня – загальна класифікація за розміром
Сантиметровий (C, X)	3–12 ГГц	Геометрична оптика, залежить від форми та матеріалу	Висока – видно великі елементи конструкції
Сантиметровий (K, Ku)	12–30 ГГц	Мікро-доплер від гвинтів, кутова флуктуація ЕПР	Дуже висока – класифікація за типом БПЛА
Міліметровий (Ka, V)	30–75 ГГц	Детальна просторова сигнатура лопатей	Дуже висока – ідентифікація кількості гвинтів
Міліметровий (W)	75–110 ГГц	Найбільш виражений мікро-доплер	Найвища – розрізнення БПЛА/птахи

Вибір частотного діапазону безпосередньо визначає характер та інформативність отримуваної сигнатури: радары вищих частот формують більш деталізовані сигнатури завдяки більшій смузі пропускання та вищій роздільній здатності, проте мають обмежену дальність дії. Дослідження мікродоплерівських сигнатур БПЛА та птахів у K- та W-діапазонах показали, що відгук W-діапазону забезпечує вищий SNR мікродоплерівського сигналу, хоча K-діапазон також дозволяє ефективно виділяти мікро-рухові характеристики обох типів цілей [11].

1.2 Залежність від форми, та частотних властивостей радіохвиль

Характер радіолокаційної сигнатури безпілотного літального апарата (БПЛА) значною мірою визначається взаємодією електромагнітних хвиль із його геометричною формою та електрофізичними властивостями. У цьому контексті ефективна площа розсіювання (ЕПР) є функцією не лише розмірів об'єкта, але й співвідношення між довжиною хвилі зондувального сигналу та характерними геометричними параметрами БПЛА.

Ефективна площа розсіювання, як міра здатності об'єкта відбивати радіохвилі назад до радара, вираховується як:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{E_s^2}{E_i^2}, \quad (1)$$

де:

E_i – інтенсивність падаючого сигналу,

E_s – інтенсивність відбитого сигналу на відстані R .

Таким чином, ЕПР є функцією не лише розмірів об'єкта, але й співвідношення між довжиною хвилі зондувального сигналу та характерними геометричними параметрами БПЛА.

Вплив форми об'єкта на розсіювання

БПЛА, як правило, мають складну просторову структуру, що включає корпус, раму, двигуни, гвинти та допоміжні елементи. Кожен із цих компонентів формує власний внесок у сумарну сигнатуру об'єкта. З точки зору електродинаміки, такий об'єкт може бути представлений як сукупність поверхонь із різними коефіцієнтами відбиття та провідності.

Розсіювання електромагнітних хвиль на об'єктах складної форми описується за допомогою методів фізичної оптики, геометричної теорії дифракції, а також чисельних методів моделювання (метод моментів, метод кінцевих елементів). При цьому особливу роль відіграють:

- орієнтація об'єкта відносно джерела випромінювання;
- наявність ребер, кутів і нерівностей поверхні;
- матеріали конструкції (метали, композити, діелектрики);
- рухомі елементи (зокрема гвинти), які можуть формувати змінні компоненти сигнатури.

Складна геометрія БПЛА призводить до формування багатокомпонентної сигнатури, яка може змінюватися в часі та залежати від режиму польоту..

Залежність розсіювання від частоти радіохвиль

Частота зондувального сигналу визначає довжину хвилі, яка є ключовим параметром при аналізі розсіювання. Залежно від співвідношення між довжиною хвилі λ та характерним розміром об'єкта L можна виділити три основні режими розсіювання:

- $\lambda \gg L$ (довга хвиля) — домінує дифракційне розсіювання, сигнал “огинає” об'єкт, і деталі форми майже не впливають на сигнатуру;
- $\lambda \approx L$ — спостерігається резонансний режим, при якому окремі елементи конструкції можуть суттєво підсилювати або послаблювати відбитий сигнал;
- $\lambda \ll L$ (коротка хвиля) — реалізується геометрична оптика, де розсіювання визначається локальними властивостями поверхні та кутами падіння хвилі.

Таким чином, одна і та сама конструкція БПЛА може мати суттєво різні сигнатури залежно від частоти випромінювання. Це пояснює необхідність використання багатодіапазонних систем для підвищення ефективності виявлення та класифікації.

Взаємозв'язок форми об'єкта та частоти радіохвиль

Ефективна площа розсіювання об'єкта залежить від співвідношення між розмірами об'єкта та довжиною хвилі. Для об'єктів, розміри яких значно перевищують довжину хвилі, розсіювання можна моделювати методами геометричної оптики. У випадку, коли розміри об'єкта співмірні з довжиною хвилі, необхідно враховувати хвильові ефекти, такі як дифракція та інтерференція. Це особливо важливо при аналізі розсіювання на БПЛА, оскільки їхні розміри та форма можуть призводити до складних моделей розсіювання залежно від використовуваних частот.

1.3. Аналіз радіофону БПЛА

Одним із важливих напрямів визначення сигнатур безпілотних літальних апаратів є аналіз їхнього радіофону, тобто сукупності радіочастотних випромінювань, що виникають під час роботи каналів керування, телеметрії, передавання відео та допоміжних бездротових модулів. На відміну від радіолокаційного підходу, де сигнатура формується внаслідок відбиття зовнішнього зондувального сигналу, радіофон БПЛА визначається власним електромагнітним випромінюванням апарата та його наземного сегмента. Саме тому такий підхід є основою пасивного виявлення, яке не потребує активного опромінення цілі та може використовуватися в умовах прихованого спостереження.

Пасивні RF-системи виявлення здійснюють моніторинг електромагнітного спектра без власного випромінювання, що є їхньою ключовою перевагою — вони не можуть бути виявлені дроном або оператором, якого вони відстежують.

Потужність сигналу на вході приймача описується рівнянням Фрізу:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \cdot L^{-1}, \quad (2)$$

де P_t — потужність передавача БПЛА, G_t, G_r — коефіцієнти підсилення антен, λ — довжина хвилі, R — дальність, L — втрати в середовищі.

З цього випливає, що потужність спадає як R^{-2} , що є суттєво кращим показником порівняно з радіолокаційним рівнянням (R^{-4}), — саме тому пасивне RF-виявлення ефективне на більших дальностях ніж активна радіолокація при тій самій ЕПР.

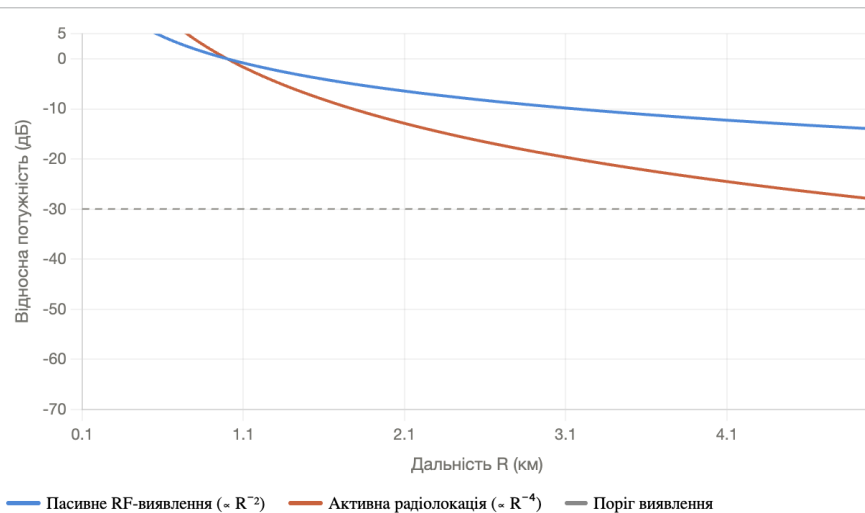


Рис. 1. Залежність потужності прийнятого сигналу від дальності для пасивного RF-виявлення та активної радіолокації

Частотні характеристики радіосигнатури БПЛА

БПЛА керуються дистанційно за допомогою пульта, що працює в діапазоні 2,4 ГГц або 5,8 ГГц неліцензованого ISM-діапазону (промислового, наукового та медичного). Цей діапазон також використовується іншими технологіями — Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee — що ускладнює виділення сигнатури БПЛА на фоні перешкод.

Більшість БПЛА передають три типи RF-сигналів: вихідна лінія зв'язку (uplink) зазвичай працює в діапазоні 2,4 ГГц із застосуванням технології FHSS, тоді як низхідна лінія (downlink) функціонує в діапазоні 2,4 ГГц або 5,8 ГГц із використанням модуляції OFDM.

Для телеметрії та каналів керування з великою дальністю застосовуються нижчі частоти. Існують також системи дальньої телеметрії на основі протоколу MAVLink, що працюють у діапазонах 433 або 915 МГц ISM, забезпечуючи дальність до 40–60 км при використанні модулів типу RFD900.

В таблиці 2 наведені канали ISM-діапазону 2.4 ГГц та їх використання у системах зв'язку. Канали 1, 6, 11 — стандартні Wi-Fi, решта активно використовуються FHSS-протоколами

Таблиця 2.

Канали ISM-діапазону 2.4 ГГц та їх використання у системах зв'язку БПЛА

Канал	Частота (МГц)	Смуга (МГц)	Використання БПЛА	Зайнятість
1	2412	20	FHSS + Wi-Fi	висока
2	2417	20	FHSS (стрибок)	середня
3	2422	20	FHSS (стрибок)	середня
4	2427	20	FHSS (стрибок)	низька
6	2437	20	FHSS + Wi-Fi	висока
7	2442	20	FHSS (стрибок)	низька
8	2447	20	FHSS (стрибок)	низька
9	2452	20	FHSS (стрибок)	низька
11	2462	20	FHSS + Wi-Fi	висока
13	2472	20	Резервний	мінімальна

Методи формування та розпізнавання RF-сигнатури

Радіосигнатура БПЛА формується не лише протоколом зв'язку, а й апаратними особливостями конкретного пристрою. Контролери мікро-БПЛА мають унікальну RF-сигнатуру завдяки особливостям схемотехніки та застосуванню методів модуляції, що дозволяє використовувати RF-відбиток (RF Fingerprinting) для виявлення та класифікації апаратів.

Унікальність RF-відбитку кожного передавача обумовлена нелінійними характеристиками його аналогових компонентів, що виникають у процесі виробництва. Для виділення таких ознак застосовуються вейвлет-перетворення — зокрема CWT та WST — завдяки їх здатності до локалізації в часово-частотній площині.

Сучасні БПЛА активно застосовують технології розширення спектра для захисту каналу зв'язку від перехоплення та перешкод. Більшість БПЛА використовують технологію FHSS, при якій сигнал слідує псевдовипадковій схемі перестрибування частот, що ускладнює виявлення та класифікацію. Аналіз спектральної сигнатури фіксує унікальний патерн, створений конкретною апаратною та програмною реалізацією дрона – навіть апарати, що використовують ідентичні протоколи, можуть давати дещо різні сигнатури через відмінності компонентів та версій прошивки.

Методи аналізу та виявлення RF-сигнатури

Для виявлення сигнатури БПЛА в умовах стрибкоподібної зміни частоти застосовують часово-частотні методи аналізу. Метод на основі STFT (Short-Time Fourier Transform) дозволяє оцінювати часові тривалості, центральні частоти та смуги кожного стрибка; при цьому часові проміжки між стрибками обчислюються через функцію автокореляції (ACF), що забезпечує точне розрізнення сигналів різних БПЛА.

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \cdot w(\tau - t) \cdot e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad (3)$$

де $x(\tau)$ – вхідний RF-сигнал,

$w(\tau - t)$ – віконна функція (Гаусс, Хеннінг або Морле),

t – часовий зсув,

f – аналізована частота.

STFT дозволяє отримати часово-частотне представлення сигналу, необхідне для виявлення стрибків FHSS.

Сучасні SDR-системи здатні виявляти сигнали БПЛА в діапазонах 2,4 ГГц і 5,8 ГГц навіть при рівнях потужності до -120 дБм, застосовуючи RF-фінгерпринтинг та алгоритми машинного навчання для розрізнення сигналів БПЛА від Wi-Fi і Bluetooth.

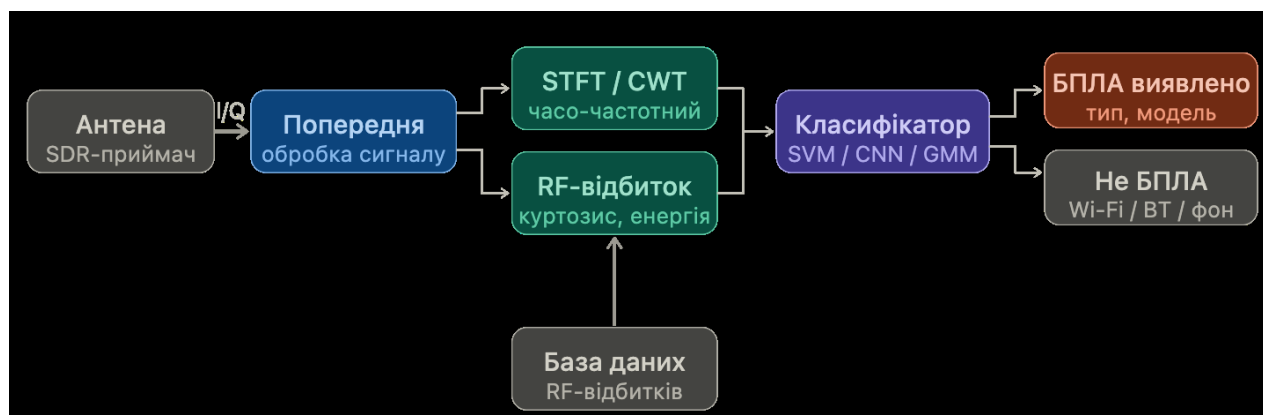


Рис. 2. Блок-діаграма системи RF-відбитку БПЛА

Система формування радіочастотного відбитку БПЛА (RF fingerprinting) функціонує як конвеєр послідовної обробки сигналу, що складається з п'яти основних етапів (рис. 2).

На першому етапі SDR-приймач (Software Defined Radio), підключений до антени, захоплює сирі квадратурні відліки сигналу у форматі I/Q у діапазонах 2,4 або 5,8 ГГц. На другому етапі виконується попередня обробка: фільтрація шуму, нормалізація амплітуди та виділення сегментів сигналу, що відповідають активним передачам БПЛА.

Третій етап є ключовим і реалізується двома паралельними шляхами. Перший — часово-частотний аналіз методами STFT або CWT — дозволяє виявити характерні патерни стрибків частоти FHSS та визначити параметри протоколу зв'язку. Другий — виділення статистичних ознак сигналу, зокрема куртозису, дисперсії та спектральної енергії, — що відображають апаратні особливості конкретного передавача і формують унікальний RF-відбиток пристрою.

На четвертому етапі отримані ознаки подаються на вхід класифікатора — SVM, CNN або GMM, — навченого на еталонних зразках з бази даних RF-відбитків. База містить заздалегідь зібрані та розмічені сигнатури відомих моделей БПЛА.

На виході системи формується одне з двох рішень: ідентифікація конкретного БПЛА із зазначенням його типу та моделі, або класифікація сигналу як фоновий (Wi-Fi, Bluetooth, інші джерела), що не є БПЛА.

2. Способи реалізації пристроїв

Реалізація пристроїв для формування радіофону та сигнатур безпілотних літальних апаратів (БПЛА) базується на використанні сучасних бездротових технологій, які застосовуються в реальних системах керування, телеметрії та передачі даних. Вибір конкретного протоколу визначає структуру сигналу, спектральні характеристики та часові параметри, що безпосередньо впливають на формування радіочастотної сигнатури.

Розглянемо основні технології зв'язку БПЛА з точки зору їх сигнатурних властивостей.

2.1 Технології на основі LoRa

LoRa (Long Range) – технологія бездротового зв'язку, що використовує модуляцію Chirp Spread Spectrum (CSS) для забезпечення далекодіючого зв'язку з мінімальним енергоспоживанням. Вона забезпечує:

- високу дальність передачі;
- стійкість до завад;

– низьку швидкість передачі даних.

CSS-модуляція є ключовою особливістю, що визначає сигнатуру LoRa: сигнал розподіляється по широкій смузі частот у вигляді лінійних частотних чирпів, що суттєво відрізняє його від звичайних вузькосмугових сигналів.

LoRa-модуляція здатна працювати при відношенні сигнал/шум до -20 дБ, тобто фактично нижче рівня фоновому шуму, що робить такі сигнали важкими для виявлення традиційними засобами радіомоніторингу. Основні параметри сигнатури LoRa визначаються коефіцієнтом розширення (Spreading Factor, SF від 7 до 12), що регулює компроміс між дальністю та швидкістю передачі даних. LoRaWAN використовується переважно для телеметрії та передачі місійних команд автономним БПЛА через протокол MAVLink.

2.2 ExpressLRS (ELRS)

ExpressLRS — відкрита система радіокерування для БПЛА, що використовує LoRa-модуляцію для досягнення рекордних показників дальності та затримки. Система підтримує роботу в діапазонах 868/915 МГц та 2,4 ГГц ISM, а також застосовує FHSS для зниження рівня завад.

З точки зору сигнатури ELRS формує характерний радіочастотний відбиток завдяки поєднанню кількох модуляційних режимів: LoRa для максимальної дальності та FLRC (Fast Long-Range Communication) для мінімальної затримки. Швидкість оновлення пакетів можна налаштовувати — від 50 Гц для далеко діючих операцій до 1000 Гц для перегонів з мінімальною затримкою, що безпосередньо впливає на часову структуру сигнатури. Відсутність шифрування в стандартній конфігурації ELRS робить його сигнатуру доступною для аналізу пасивними засобами перехоплення.

2.3 TBS Crossfire

TBS Crossfire — комерційна система дальнього зв'язку від Team BlackSheep, що працює в діапазоні 868/915 МГц з використанням LoRa-модуляції. Система забезпечує двосторонній зв'язок з телеметрією, підтримує MAVLink та протокол CRSF для взаємодії з польотним контролером.

На відміну від ELRS, Crossfire застосовує LoRa лише на швидкості 50 Гц, а при підвищенні частоти оновлень до 150 Гц переходить на FSK-модуляцію — це формує двокомпонентну сигнатуру, що може бути виявлена засобами часово-частотного аналізу. Crossfire реалізує шифрування даних та захист CRC, що є унікальною характеристикою серед хобі-протоколів і може використовуватись як ознака класифікації при аналізі радіовідбитку. Потужність передавача сягає 2 Вт, що забезпечує значну дальність, але одночасно формує добре виявний RF-відбиток.

2.4 CDMA

Стандарт CDMA (Code Division Multiple Access) застосовується в окремих системах зв'язку БПЛА, де потрібна висока завадостійкість та можливість одночасної роботи кількох апаратів у спільному частотному діапазоні. На відміну від FHSS-систем, CDMA розподіляє сигнал по всій смузі частот одночасно через псевдовипадкові кодові послідовності, що формує широкосмугову сигнатуру з низькою спектральною щільністю потужності. Виявлення таких сигналів вимагає знання кодової послідовності або застосування кореляційних методів аналізу.

2.5 MAVLink

MAVLink (Micro Air Vehicle Link) — легковаговий протокол передачі повідомлень між компонентами БПЛА (польотний контролер, наземна станція, корисне навантаження). MAVLink є стандартом для автономних БПЛА на базі ArduPilot та PX4, передаючи дані телеметрії, координати місії та параметри польоту. LoRa є оптимальним фізичним рівнем для передачі MAVLink-повідомлень завдяки сумісності низької швидкості передачі з великою дальністю.

З точки зору сигнатури MAVLink-трафік формує характерні часові патерни: короткі пакети фіксованої структури з регулярним інтервалом відправлення (зазвичай 1–10 Гц для телеметрії), що може бути виявлено пасивним моніторингом навіть у зашифрованому вигляді через аналіз часових інтервалів між пакетами.

2.6 Формування послідовностей сигналів

Радіочастотна сигнатура БПЛА є не лише характеристикою окремого пакету даних, але й результатом часової послідовності передач протягом усього сеансу зв'язку. Аналіз цієї послідовності дозволяє ідентифікувати апарат навіть у випадках, коли зміст пакетів зашифрований або протокол невідомий.

2.6.1. Структура одиночного RF-пакету

Типовий пакет системи зв'язку БПЛА має таку послідовну структуру, зображена на рис. 3.

Преамбула формує найбільш стабільну частину RF-відбитку — її тривалість, форма наростання та спадання сигналу є унікальними для конкретного апаратного передавача і майже не змінюються між сеансами

зв'язку. Перехідні сигнали преамбули (transient signals) є більш інформативними для ідентифікації БПЛА, ніж сталі сигнали від контролера, оскільки відображають унікальні апаратні характеристики конкретного передавача.

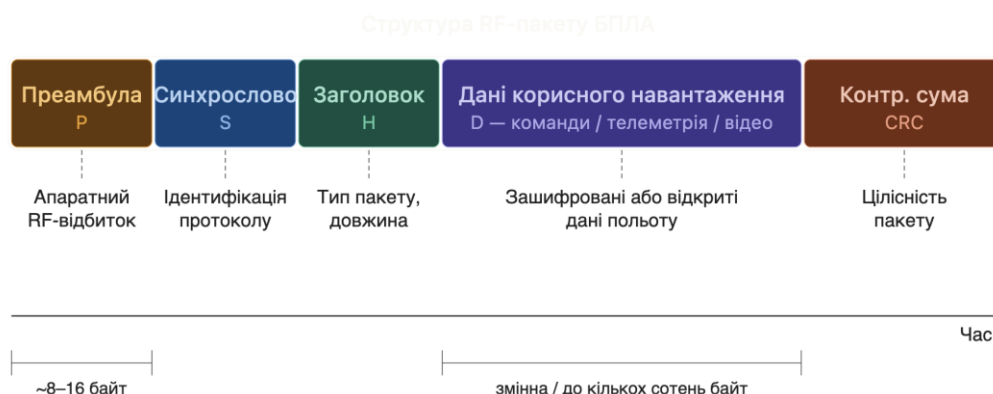


Рис. 3. Структура RF-пакету БПЛА та сигнатурна роль кожного поля

2.6.2. Часова послідовність та ритм передач

Різні протоколи формують характерні часові патерни, що є частиною сигнатури БПЛА:

- Канал керування (uplink): короткі пакети з фіксованим інтервалом, що відповідає частоті оновлення протоколу (від 50 Гц у LoRa до 1000 Гц у ELRS). Ця характеристика безпосередньо ідентифікує тип протоколу зв'язку.
- Телеметрія (downlink): пакети змінної довжини з нижчою частотою — зазвичай 1–10 Гц для MAVLink-повідомлень з координатами та параметрами польоту.
- Відеоканал: безперервний OFDM-потік у діапазоні 5,8 ГГц, що формує стаціонарну широкосмугову компоненту сигнатури.

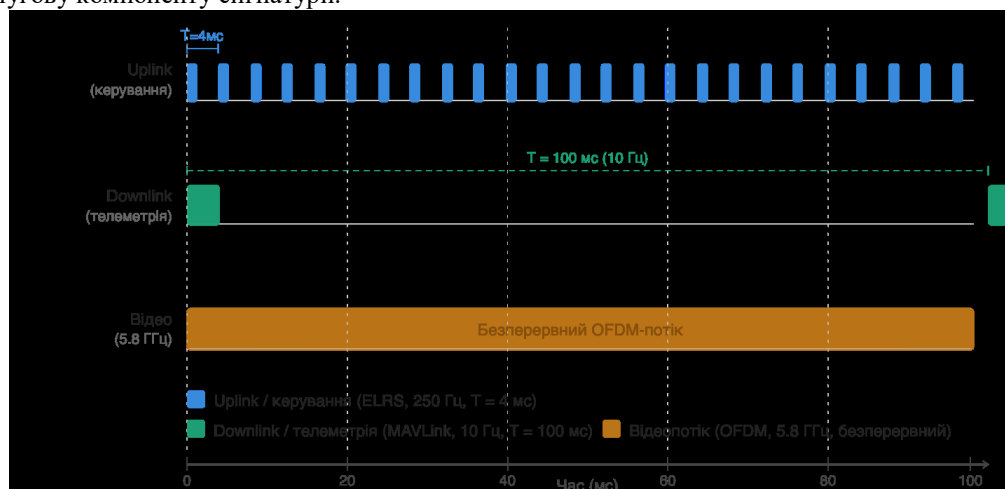


Рис. 4. Часова діаграма RF-потоків БПЛА (ELRS 250 Гц + MAVLink)

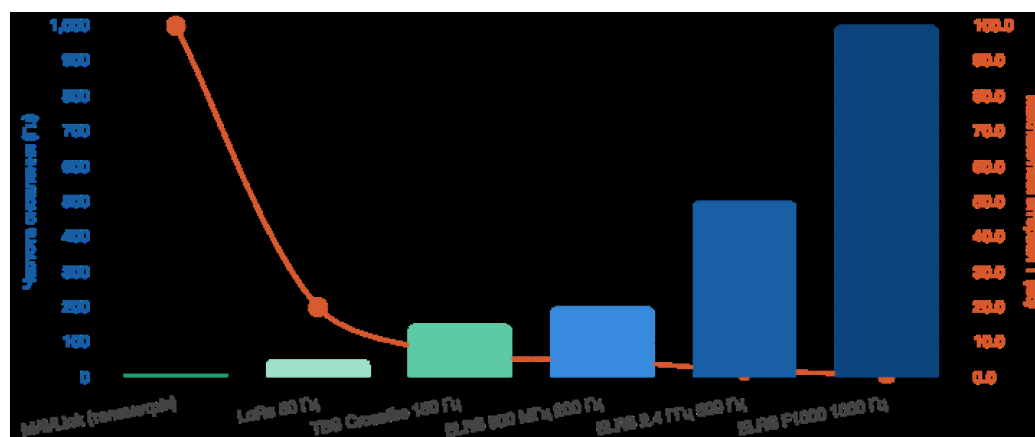


Рис. 5. Порівняння частот оновлення каналу керування та відповідних міжпакетних інтервалів для основних протоколів БПЛА

Аналіз часових інтервалів між пакетами дозволяє виявити присутність БПЛА навіть у зашифрованому трафіку — ритмічна структура передач є характерною ознакою, що відрізняє системи зв'язку БПЛА від фонових Wi-Fi та Bluetooth сигналів.

2.6.3. Послідовність станів БПЛА та зміна сигнатури

Сигнатура БПЛА динамічно змінюється залежно від фази польоту, що формує характерну багатостанову послідовність. Для кількісного опису інтенсивності радіообміну доцільно використовувати індекс активності сигналу:

$$A = P_{avg} \cdot f_{update}, \quad (4)$$

де P_{avg} — середня потужність передавача (мВт), f_{update} — частота оновлень (Гц). Наприклад, у режимі активного польоту (500 мВт, 250 Гц): $A = 125\,000 \text{ мВт} \cdot \text{Гц}$; у режимі зависання (100 мВт, 50 Гц): $A = 5\,000 \text{ мВт} \cdot \text{Гц}$.

З урахуванням цих показників, основні стани функціонування БПЛА характеризуються наступним чином:

- Передстартовий стан: передавач активний, але частота пакетів знижена — лише телеметрія та синхронізація.
- Зліт та активний політ: максимальна частота оновлень каналу керування, підвищена потужність передавача.
- Режим зависання: знижена частота команд керування, підвищена телеметрія (відеопотік, GPS).
- Автономний режим (BVLOS): канал керування переходить у режим низької частоти (MAVLink), телеметрія стає домінуючою компонентою.

RF-відбиток конкретного пристрою залишається стабільним незалежно від стану польоту та режиму роботи, оскільки визначається апаратними нелінійностями передавача, а не програмними параметрами.

На рис. 6 представлено діаграму станів безпілотної літальної апарату (БПЛА) та відповідні характеристики його радіочастотної (RF) сигнатури. Кожен стан визначається параметрами частоти передачі пакетів f та потужності передавача P , що разом формують індекс активності сигналу.

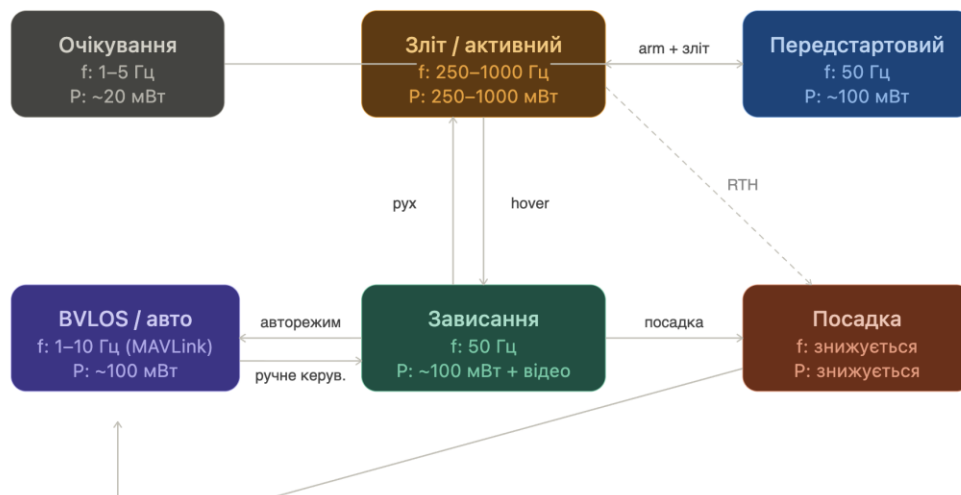


Рис. 6. Діаграма станів БПЛА та RF-сигнатур

У стані очікування спостерігається мінімальна активність: частота передачі становить 1–5 Гц при потужності близько 20 мВт, що відповідає низькому значенню A . У передстартовому стані частота зростає до приблизно 50 Гц при потужності близько 100 мВт, що свідчить про підготовку систем до польоту.

Під час зльоту та активного польоту досягаються максимальні значення параметрів: частота передачі 250–1000 Гц та потужність 250–1000 мВт. Це призводить до значного зростання індексу активності ($A \sim 10^5 - 10^6$), що відображає інтенсивний обмін командами керування та телеметрією. У цьому режимі також спостерігається висока ентропія послідовності пакетів оскільки передаються різноманітні дані (керування, телеметрія, відео):

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \quad (5)$$

де p_i — імовірність i -го типу пакету в послідовності. Висока ентропія відповідає активному польоту з різноманітними командами; низька — монотонному режиму зависання або очікування.

У режимі зависання частота керуючих сигналів знижується до приблизно 50 Гц при потужності близько 100 мВт, однак може додаватися відеопотік. Це формує середній рівень індексу активності та змінну ентропію: при наявності відео H зростає, при стабільному положенні — зменшується.

У автономному режимі (BVLOS) канал керування переходить у низькочастотний режим (1–10 Гц, наприклад, протокол MAVLink), а основний внесок у сигнатуру становить телеметрія. Індекс активності залишається відносно низьким, однак ентропія може бути помірною або високою через різноманітність телеметричних даних.

Стан посадки характеризується поступовим зменшенням як частоти передачі, так і потужності, що призводить до зниження індексу активності сигналу. Ентропія також зменшується внаслідок спрощення структури переданих даних.

Можливі переходи між станами, зокрема:

- перехід від передстартового стану до активного польоту (arm + зліт);
- циклічні переходи між активним польотом і зависанням (рух / hover);
- переходи між ручним керуванням і автономним режимом;
- аварійний або автоматичний перехід до посадки (RTN — return-to-home).

На рис.8 наведено зміну основних параметрів RF-сигнатури БПЛА залежно від фаз польоту, а саме потужності передавача P , частоти оновлення пакетів f та індексу активності сигналу $A = P \cdot f$ (нормованого для спільного відображення). Як видно з графіка, всі три параметри мають узгоджену динаміку: мінімальні значення спостерігаються у стані очікування, після чого відбувається поступове зростання на етапі передстарту та різкий пік у фазі активного польоту. Саме в цій фазі індекс активності досягає максимальних значень, що підтверджує інтенсивний характер радіообміну.

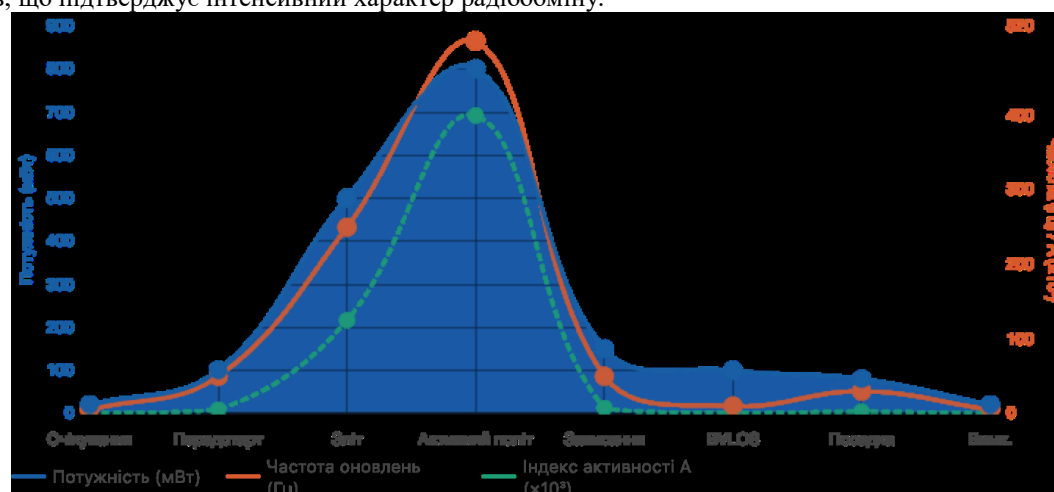


Рис. 7. Зміна RF-параметрів сигнатури БПЛА за фазами польоту

Таким чином, графік наочно демонструє кореляцію між фазами польоту БПЛА та зміною його RF-сигнатури, що може бути використано для ідентифікації режимів роботи та класифікації поведінки безпілотних систем.

2.6.4. Використання послідовності для ідентифікації

Сучасні системи ідентифікації БПЛА використовують ритмічні особливості RF-послідовності як окрему ознаку класифікації – так звані rhythm-based features, що описують статистику міжпакетних інтервалів та автокореляційні характеристики часового ряду пакетів [10].

Нехай t_i – момент надходження i -го пакету. Тоді міжпакетний інтервал визначається як:

$$\Delta t_i = t_i - t_{i-1}, \quad (6)$$

На основі цієї послідовності формуються статистичні характеристики:

$$\mu_{\Delta t} = \mathbb{E}[\Delta t], \quad (7)$$

$$\sigma_{\Delta t}^2 = \mathbb{E}[(\Delta t - \mu_{\Delta t})^2], \quad (8)$$

що дозволяють оцінити середній ритм передачі та його варіативність.

Для виявлення періодичності та прихованих закономірностей використовується автокореляційна функція:

$$R(\tau) = \mathbb{E}[\Delta t_i \cdot \Delta t_{i+\tau}], \quad (9)$$

де τ – лаг (зсув). Наявність піків у $R(\tau)$ свідчить про періодичні патерни у передачі пакетів, характерні для конкретних протоколів або режимів польоту.

Додатково може використовуватись спектральний аналіз часової послідовності:

$$S(f) = |\mathcal{F}\{\Delta t_i\}|^2, \quad (10)$$

що дозволяє виділити домінуючі частоти у ритмі передачі.

Таким чином, повна RF-сигнатура БПЛА є тривимірною: вона включає частотні характеристики (який діапазон і канал), апаратний відбиток (унікальність преамбули передавача) та часову послідовність

(ритм і структура передач). Саме комбінація всіх трьох складових забезпечує надійну ідентифікацію апарата навіть в умовах зашифрованого зв'язку та щільного електромагнітного середовища.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У статті проведено комплексне дослідження методів формування радіочастотних сигнатур безпілотних літальних апаратів та отримано такі основні результати.

Встановлено, що ЕПР типових малих БПЛА становить від -22 до -10 дБсм, що підтверджує необхідність використання багатодіапазонних систем для їх надійного виявлення. W-діапазон (75–110 ГГц) забезпечує найвищу інформативність мікро-доплерівської сигнатури та дозволяє розрізняти БПЛА і птахів, тоді як нижчі діапазони (L, S) придатні лише для загальної класифікації за розміром.

Пасивне RF-виявлення має суттєву перевагу над активною радіолокацією за дальністю дії, оскільки потужність прийнятого сигналу спадає пропорційно квадрату відстані, а не четвертому степеню, як у радіолокаційному рівнянні. Це робить аналіз радіофону БПЛА ефективним інструментом ідентифікації.

Запропоновано індекс активності сигналу як кількісну характеристику інтенсивності радіообміну БПЛА. Значення індексу варіюється на кілька порядків залежно від фази польоту — від мінімальних у стані очікування до максимальних у фазі активного польоту, що дає змогу ідентифікувати режим функціонування апарата за параметрами RF-сигнатури. Ентропія послідовності пакетів є додатковою діагностичною ознакою: високі значення відповідають активному польоту з різнотипними даними, а низькі — монотонному режиму зависання або очікування.

Порівняльний аналіз протоколів зв'язку БПЛА (LoRa, ELRS, Crossfire, CDMA) виявив характерні сигнатурні відмінності між ними. Зокрема, Crossfire формує двокомпонентну сигнатуру при зміні частоти оновлень, що може використовуватися як класифікаційна ознака при часово-частотному аналізі.

Обґрунтовано, що повна RF-сигнатура БПЛА є тривимірною: вона включає частотні характеристики, апаратний відбиток передавача та часову послідовність передач. Саме комбінація трьох складових забезпечує надійну ідентифікацію апарата навіть в умовах зашифрованого зв'язку та щільного електромагнітного середовища.

Перспективи подальших досліджень полягають у експериментальній верифікації запропонованих показників на реальних RF-даних БПЛА, розробці класифікаторів на основі машинного навчання для автоматичної ідентифікації типу апарата та його режиму польоту, а також у дослідженні стійкості запропонованих методів в умовах радіоелектронної протидії.

References

1. Zahid M., Nisar M., Fazil A., Ryu J., Shah M. Composite Ensemble Learning Framework for Passive Drone Radio Frequency Fingerprinting in Sixth-Generation Networks. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 1–15.
2. Patel J. S., Fioranelli F., Anderson D. Review of radar classification and RCS characterisation techniques for small UAVs or drones. *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2018. Vol. 12, No. 9. P. 911–919. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2018.0020>.
3. Kapoulas I. K., Hatziefremidis A., Baldoukas A. K., Valamontes E. S., Statharas J. C. Small Fixed-Wing UAV Radar Cross-Section Signature Investigation and Detection and Classification of Distance Estimation Using Realistic Parameters of a Commercial Anti-Drone System. *Drones*. 2023. Vol. 7, No. 1. P. 39. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones7010039>.
4. Rosamilia M., Aubry A., Balleri A., Carotenuto V., De Maio A. RCS Measurements of UAVs and Their Statistical Analysis. *Proceedings of the IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, Pisa, Italy, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace54187.2022.9856394>.
5. Gong J., Yan J., Li D., Kong D. Detection of Micro-Doppler Signals of Drones Using Radar Systems with Different Radar Dwell Times. *Drones*. 2022. Vol. 6, No. 9. P. 262. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones6090262>.
6. Ritchie M., Fioranelli F., Griffiths H., Torvik B. Radar Micro-Doppler Signatures of Drones and Birds at K-band and W-band. *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. P. 17396. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35880-9>.
7. Ahmad T., Zhang L., Jin C., Feng K., Zhang X. A Survey on Detection, Classification, and Tracking of UAVs using Radar and Communications Systems. *arXiv preprint*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2402.05909>.
8. Ozturk E., Erden F., Guvenc I. Measurement Based FHSS-type Drone Controller Detection at 2.4GHz: An STFT Approach. *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Dublin, Ireland, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9129525>.
9. Colomina-Martínez D., Molina-García-Pardo J. M., Gozálviz J., Sepulcre M. Drone Detection and Tracking Using RF Identification Signals. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 17. P. 7650. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23177650>.
10. Alam S. S., Chakma A., Rahman M. H., Mofidul R. B., 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. Vol. 23, No. 9. P. 4202. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23094202>.
11. Maleki A., Farahmand S., Ghorashi A. A Tutorial on Chirp Spread Spectrum Modulation for LoRaWAN: Basics and Key Advances. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3432865>.
12. Ezuma M., Erden F., Anjinappa C. K., Ozdemir O., Guvenc I. Micro-UAV Detection and Classification from RF Fingerprints Using Machine Learning Techniques. *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, USA, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/AERO.2019.8741719>.