

АДАПТИВНІ МЕТОДИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ
БПЛА В УМОВАХ ЗМІННОГО РАДІОЧАСТОТНОГО СЕРЕДОВИЩА

Тези присвячено аналізу проблеми розпізнавання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) за радіочастотними ознаками в умовах змінного середовища. Наголошується, що традиційні моделі машинного навчання, навчені у статичних умовах, демонструють зниження продуктивності при зміні параметрів каналу, положення антен, впливі шумів і мультипасових ефектів. Обґрунтовується доцільність застосування адаптивних методів, зокрема адаптації до середовища (*domain adaptation*), які дозволяють зберігати точність без повного перенавчання. Запропоновано архітектуру системи з модулем виділення ознак, дискримінатором домену та симулятором змін середовища. Такий підхід відкриває перспективи для створення стійких до змін систем моніторингу БПЛА у військовій та цивільній сферах.

Ключові слова: БПЛА, розпізнавання, радіочастотний аналіз, адаптація до домену, машинне навчання, змінне середовище, *RF fingerprinting*.

Зі стрімким поширенням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у повсякденному житті, від рекреаційних польотів до розвідувальних і бойових місій, постає необхідність у побудові надійних систем їх виявлення та розпізнавання. Особливої актуальності ця задача набуває в умовах обмеженого доступу до візуальної або акустичної інформації, що притаманно як міському середовищу, так і театру бойових дій. Одним із напрямів, який розвивається в цьому контексті, є радіочастотне (RF) розпізнавання, що базується на аналізі випромінювання БПЛА або його зв'язку з оператором.

Однак, реалізація ефективних RF-систем стикається з кількома суттєвими труднощами. Найпоширенішою серед них є зміна середовища, тобто варіації каналу, положення передавачів і приймачів, присутність перешкод та інші фактори, які впливають на вигляд отриманого сигналу. Моделі машинного навчання, що використовуються для розпізнавання на основі таких даних, зазвичай демонструють зниження продуктивності, щойно умови тестування відрізняються від умов, у яких вони були навчені. Це явище, зміна середовища (*domain shift*), є загальною проблемою для ML-систем, але особливо гостро воно постає в задачах RF-розпізнавання.

Розпізнавання БПЛА на основі RF-сигналів за останнє десятиліття стало окремим підполем у задачах бездротової безпеки. Найбільш поширеним підходом є побудова моделей класифікації на основі IQ-семплів або спектрограм сигналу [1]. Для цієї мети використовують згорткові нейронні мережі (CNN), які добре зарекомендували себе у задачах розпізнавання образів [2]. У ряді робіт ці моделі доповнюються рекурентними компонентами, зокрема LSTM, що дозволяє враховувати часову динаміку передачі [3].

Іншим активно досліджуваним напрямом є так зване *RF fingerprinting*, або створення «відбитку» пристрою. Йдеться про використання дрібних особливостей у формуванні сигналу, які виникають через неточності електроніки: варіації у підсилювачах, генераторах, модуляторах. Навіть два однакові за моделлю дрони, у теорії, можуть бути розпізнані за своїм унікальним електромагнітним «почерком». Ці методи часто комбінують з CNN або автоенкодерами [4].

Однак, усі згадані рішення значною мірою залежать від умов, у яких здійснюється запис. Наприклад, зміна антен або розміщення приймача навіть на кілька метрів здатна повністю змінити вигляд сигналу у часовій або частотній області. Як наслідок, статично навчені моделі погано узагальнюють на нові сценарії.

Для подолання цього ефекту у суміжних галузях активно застосовуються методи *адаптації до середовища* (*domain adaptation*) – підходи, що дозволяють навчити модель бути інваріантною до ознак середовища. Найвідомішим є підхід DANN (Domain-Adversarial Neural Network), де мережа одночасно навчається виконувати класифікацію та «забувати» про домен через зворотну оптимізацію дискримінатора [5]. Візуально це виглядає як гра в «перетягування канату» між класифікатором і доменним розпізнавачем. Проте, у контексті RF-аналізу БПЛА цей клас методів поки що мало представлений у літературі, попри очевидну доцільність.

Таблиця 1 надає порівняльну характеристику наведених підходів для розпізнавання БПЛА за допомогою радіочастотної інформації.

Таблиця 1.

Порівняльна характеристика підходів до RF-розпізнавання БПЛА

Підхід	Тип вхідних даних	Стійкість до змін середовища	Необхідність перенавчання	Коментар
CNN на спектрограмах	Частотні зображення	Низька	Висока	Швидко деградує при зміні каналу

LSTM на IQ-сигналах	Часові ряди	Низька–середня	Висока	Чутливе до флуктуацій у фазі
RF fingerprinting	IQ/амплітудні профілі	Середня	Середня	Працює краще для ідентифікації
Domain adaptation (DANN)	Ознаки з CNN	Висока	Низька	Потребує невідмічених даних з нового середовища
Data augmentation (канали)	Будь-які	Середня–висока	Залежить від варіанту	Може застосовуватись до інших моделей

Джерело: сформоване автором на основі [2 - 5].

У задачах розпізнавання за RF-даними стабільність середовища не може бути гарантована навіть протягом короткого проміжку часу. Змінність може виникати як у фізичному просторі (зміна розміщення антен, перешкоди в каналі, відбиття від навколишніх об'єктів), так і у частотному або часовому вимірах.

До основних типів змін належать:

- *Часові варіації*: затримки сигналу, зсуви частоти, пов'язані зі зсувами генератора або рухом.
- *Багатопроменевість (multipath)*: сигнал доходить до приймача різними шляхами з різними затримками і фазами.
- *Погодні фактори*: дощ, вологість, туман можуть змінювати поглинання і відбиття сигналу.
- *Апаратні особливості*: калібрування антен, налаштування підсилювачів, фільтри.

У практичних експериментах відзначено, що навіть незначне переміщення приймальної антени (на 30–50 см) у середовищі зі значною кількістю відбиттів може істотно змінити характер спектру сигналу. Це особливо критично для моделей, натренованих лише на «чистих» даних, отриманих у контрольованих умовах. Без урахування цього різновиду змін створення стійких до помилок систем стає практично неможливим.

Враховуючи зазначені обмеження, пропонується архітектура, яка поєднує класичний модуль виділення ознак (наприклад, згортова нейронна мережа) з модулем адаптації до домену. Основна ідея полягає у побудові системи, здатної розрізняти корисні ознаки (які відповідають класу БПЛА) і ігнорувати ті, що несуть лише інформацію про середовище. Блок-схема архітектури наведена на рисунку 1.

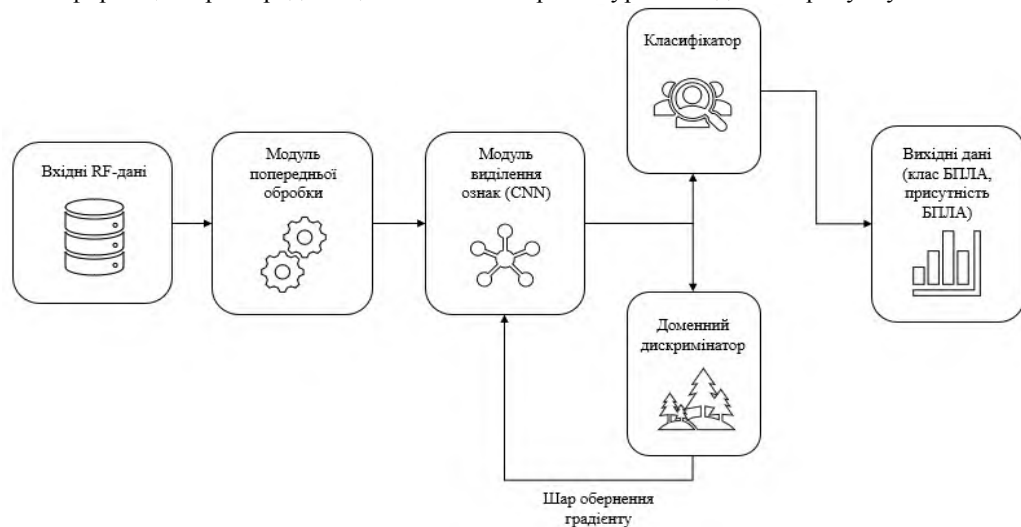


Рис. 1. Архітектура адаптивної системи RF-розпізнавання БПЛА

Джерело: сформоване автором на основі [5].

Архітектура включає такі компоненти:

1. *Модуль виділення ознак (CNN)* — обробляє спектрограми або IQ-сигнали, виділяючи ознаки.
2. *Класифікатор* — класифікує об'єкти (тип БПЛА або факт наявності).
3. *Доменний дискримінатор* — вчиться визначати, з якого середовища дані (середовища тренування або нового).
4. *Шар обернення градієнту* — зв'язує ознаки з дискримінатором і реалізує змагальне навчання.

Під час тренування, модель намагається бути «хорошим» класифікатором і водночас — «поганим» предиктором середовища. Такий механізм дозволяє їй навчитися витягати тільки релевантні ознаки.

Запропонований підхід відкриває шлях до створення систем розпізнавання БПЛА, здатних ефективно працювати у широкому спектрі середовищ без потреби у повному перенавчанні на кожен новий сценарій. У реальних умовах, де збір нових даних є дорогим, тривалим або взагалі неможливим, така властивість є критично важливою.

Сфери застосування охоплюють:

- Тактичні системи радіомоніторингу в зонах бойових дій;
- Системи охорони критичної інфраструктури;
- Безпекові рішення в урбанізованих просторах;
- Автономні сенсорні вузли з обмеженою обчислювальною потужністю.

У майбутньому передбачається реалізація програмно-апаратного прототипу, тестування системи у варіативних реальних умовах, а також дослідження можливостей її розширення для вирішення задач мультикласової класифікації, зокрема розпізнавання типу дрона, моделі, або навіть індивідуального пристрою за RF-відбитком.

References

1. Jafar N., Paeiz A., Farzaneh A. Automatic modulation classification using modulation fingerprint extraction. Journal of Systems Engineering and Electronics. 2021. Vol. 32, no. 4. P. 799–810.
2. Optimized Radio Frequency Footprint Identification Based on UAV Telemetry Radios / Y. Tian et al. Sensors. 2024. Vol. 24, no. 16. P. 5099.
3. Zhan, Y., et al. (2021). "UAV Detection Based on RF Fingerprints with CNN-LSTM Hybrid Model." Sensors.
4. Shi, Y., et al. (2020). "Deep Learning for RF Fingerprinting: A ResNet-Based Approach." IEEE Transactions on Vehicular Technology.
5. Tzeng, E., et al. (2017). "Adversarial Discriminative Domain Adaptation." CVPR.

DOI 10.34132/mspc2025.01.14.19

Ivan Sova,
Oleksiy Kozlov,

ADAPTIVE MACHINE LEARNING METHODS FOR UAV RECOGNITION IN A VARIABLE RADIO FREQUENCY ENVIRONMENT

The paper addresses the challenge of recognizing unmanned aerial vehicles (UAVs) based on radio frequency signals in variable operating conditions. It highlights that conventional machine learning models, trained in static environments, often suffer performance degradation when exposed to changes in channel characteristics, antenna positioning, noise, and multipath effects. The need for adaptive approaches is emphasized, particularly through domain adaptation techniques, which help preserve recognition accuracy without requiring full retraining. An architecture is proposed that incorporates a feature extraction module, a domain discriminator, and a simulated environment generator. This approach offers promising prospects for the development of robust UAV monitoring systems in both military and civilian applications.

Key words: UAV, recognition, radio frequency analysis, domain adaptation, machine learning, dynamic environment, RF fingerprinting.

Відомості про авторів / Information about the Authors

Іван Сова, аспірант факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: owlvano@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8972-4069>.

Ivan Sova, Ph. D. student of the Computer Science Faculty of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: owlvano@gmail.com, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8972-4069>.

Олексій Козлов, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: kozlov_ov@ukr.net, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2069-5578>.

Oleksiy Kozlov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Intellectual Information Systems of the Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: kozlov_ov@ukr.net, orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2069-5578>.

