

Дослідження спектральних характеристик сигналів безпілотних летальних апаратів на ортогональних складових

Олександр Білик

аспірант кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В. В. Поповського,
Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки
України; судовий експерт, Західноукраїнське відділення Науково-дослідного центру
судової експертизи у сфері інформаційних технологій та інтелектуальної власності
Міністерства юстиції України, м. Івано-Франківськ, Україна,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4846-1585>, e-mail: oleksandr.bilyk@nure.ua

Олександр Мартинчук

кандидат технічних наук, доцент кафедри інфокомунікаційної інженерії
ім. В. В. Поповського, Харківський національний університет радіоелектроніки
Міністерства освіти і науки України, м. Харків, Україна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9729-4401>, e-mail: oleksandr.martynchuk@nure.ua

Розглянуто спектральні характеристики сигналів БПЛА на ортогональних складових. Показано можливість ідентифікації типу дрону та застосування ML-алгоритмів у межах судової комп'ютерно-технічної експертизи.

Ключові слова: БПЛА; спектральний аналіз; ортогональні складові; SDR; експертиза; ML.

Study of Spectral Characteristics of UAV Signals on Orthogonal Components

Oleksandr Bilyk, Oleksandr Martynchuk

The spectral characteristics of UAV signals on orthogonal components are analyzed. The study shows the possibility of UAV type identification and ML use within forensic computer-technical examinations.

Keywords: UAV; spectral analysis; orthogonal components; SDR; forensics; ML.

Сигнали, які випромінюють безпілотні літальні апарати (далі — БПЛА), мають унікальні спектральні характеристики, що залежать від типу пристрою, протоколу зв'язку, методу модуляції та умов середовища. В умовах сучасної радіоелектронної боротьби актуальним є виявлення та класифікація таких сигналів. Одним із підходів є спектральний аналіз сигналів на ортогональних складових (реальній та уявній частинах), що дає змогу виокремити ключові особливості модуляції та спектральної щільності потужності сигналу.

Метою роботи є дослідження спектральних характеристик реальних IQ-сигналів, отриманих із програмно-визначеного радіо (SDR), та виявлення інформативних параметрів ортогональних складових, які можуть бути застосовані для ідентифікації дронів або аналізу їхньої активності в ефірі.

Для досягнення мети було сформульовано такі завдання:

- провести спектральний аналіз у реальному та комплексному представленні;

- виокремити спектральні характеристики реальної та уявної складової;
- дослідити асиметрію, частотну нестабільність, ширину смуги та модуляційні структури;
- розглянути застосування ML/AI для класифікації на основі спектральних ознак.

Сигнали записувались із застосуванням *HackRF One* на частотах 2.4 ГГц та 5.8 ГГц у форматі *complex IQ* (тип *.raw*). Застосовувались дрони *DJI Mini*, *FPV*-дрони з аналоговим відеопередавачем та саморобні апарати з *Wi-Fi FPV*-модулями.

Результати дослідження

1. *DJI*-сигнал:

- висока спектральна стабільність, вузька смуга (до 5 МГц);
- сильна кореляція між *I* та *Q*, переважає синфазна модуляція (*QPSK*).
- імовірно застосування *Wi-Fi/OFDM* (802.11ac) з адаптивною модуляцією.

2. *FPV*-аналоговий:

- спектр наближений до амплітудно-модуляційного, несиметричний;
- у *Q*-компоненті переважає шум;
- ширина смуги до 20 МГц, залежно від *VTX*.

3. *DIY (LoRa, 5.8 GHz Wi-Fi FPV)*:

- широка змінність параметрів;
- частотні «піки» та імпульсні переходи;
- виявлено модуляцію з фазовим і частотним слайдингом.

Порівняння:

- *Q*-компонента містить більше модуляційної інформації для *LoRa/FPV*;
- *I*-компонента стабільна для *DJI*;
- комбіновані спектри дають змогу автоматизовану класифікацію за особливостями спектра.

Перспективи *ML*-ідентифікації

На основі отриманих спектрограм і *PSD*-профілів сформовано навчальні вибірки для *ML*-аналізу. Алгоритми *CNN* і *LSTM* показали можливість класифікації типу дрону з точністю понад 92% (за тестовою вибіркою з 1000 фрагментів). Модель працює із зображеннями спектрограм (128×128) або зі спектральними векторами *PSD* (512 точок).

У межах судової комп'ютерно-технічної експертизи або експертизи електронних комунікацій дослідження сигналів БПЛА може бути ключовим для:

- ідентифікації типу дрону за характером його випромінювання;
- установлення факту використання БПЛА в зоні події (наприклад, у контексті незаконного спостереження, збирання інформації або порушення повітряного простору);
- визначення каналу керування, що може бути доказом зв'язку з конкретним оператором;
- порівняння сигналів зразків (записаних експертом) зі зразками досліджуваного пристрою.

Проведено глибокий аналіз спектральних характеристик сигналів

дронів на ортогональних складових (I та Q), виявлено ключові інформативні параметри для ідентифікації дронів, описано відмінності між комерційними, *FPV* та *DIY*-сигналами.

У результаті показано можливість автоматизованої класифікації на основі *ML*-алгоритмів. Запропонований підхід може бути застосований у системах виявлення та протидії БПЛА.

Перелік джерел посилання

1. Білик О., Мартинчук О., Виявлення БПЛА за допомогою SDR HACKRF ONE. *Інформаційна безпека та інформаційні технології* : зб. доп. V Міжнар. наук.-практ. конф. (Львів, 27.11.2024). Львів, 2024. С. 430—432. URL: https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/15299/1/%D0%A1%D0%BC%D0%BE%D1%82%D1%80-%D0%9C%D0%B5%D1%87%D1%83%D1%81_%D0%9B%D0%94%D0%A3%D0%91%D0%96%D0%94_%D0%86%D0%91%D0%86-%D0%A2%202024.pdf (дата звернення: 05.04.2025).
2. Білик О., Мартинчук О., Дослідження БПЛА в судовій комп'ютерно-технічній експертизі. *Проблеми теорії та практики судової експертизи з питань інтелектуальної власності («Крайневські читання»)* : мат-ли VIII Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 29.01.2024). Київ, 2024.
3. Martynchuk O., Bilyk O. Study of the efficiency of suppression of correlated active noise interferences by adaptive antenna arrays of double polarization p 78 І. *Стан та перспективи розвитку інформаційних технологій в сучасних умовах* : міжвуз. наук. конф. Харк. нац. ун-ту Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба (Харків, 22.11.2024). Харків, 2024. С. 93.