

## ВИЯВЛЕННЯ МАЛИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЗА АКУСТИЧНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

Багаєва М.А.

Науковий керівник – к.т.н., проф. Олейніков В.М.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МІРЕС,  
м. Харків, Україна

e-mail: milena.bahaieva@nure.ua

In this paper explores acoustic emission analysis as a method for drone detection, emphasizing the quieter electric engines of remotely controlled UAVs. Through examining the spectral power density (SPD) of acoustic emissions from drones and considering the impact of the Doppler effect on perceived sound frequency, this study develops a mathematical model for identifying drone characteristics. The research utilizes neural networks to analyze acoustic signals, enhancing the detection accuracy even in noisy environments or when signals are weak. The findings demonstrate the potential of acoustic methods to improve the security of critical infrastructures and public events by providing detailed insights into drone trajectory and behavior.

В теперішній час актуальність захисту цивільних та воєнних об'єктів від безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як ніколи висока, оскільки вони несуть пряму загрозу життю. Важливою задачею є їхнє вчасне виявлення, але це нелегко зробити оскільки малі літальні апарати (МЛА) часто малопомітні в різних діапазонах хвиль, також вони маневрені і можуть змінювати як напрям свого руху, так і висоту та динаміку.

Одним із методів виявлення МЛА є аналіз акустичного випромінювання. В теперішній час все частіше використовуються БПЛА, що керуються дистанційно та мають електричні двигуни. При цьому рівень шуму даних літальних апаратів значно нижче, ніж двигунів внутрішнього згоряння. Оскільки БПЛА створюють шум за допомогою рухомих частин та двигунів розпізнавання за акустичним випромінюванням є актуальною проблемою.

Для того, щоб виявити характерні особливості інформаційних акустичних сигналів і створення математичної моделі було досліджено спектральну щільність потужності (СЩП) акустичного випромінювання МЛА. Для прикладу приведемо спектральну щільність потужності акустичного випромінювання квадрокоптера DJI Phantom 3 (рис.1).

Частоти гармонічних складових в спектрі шуму повітряного гвинта визначаються у відповідності до виразу:

$$f_B = knN, \quad (1)$$

де  $k$  – номер гармоніки;  $n$  – частота обертів ротора (об/с);  $N$  – число лопатів.

Для аналізу сигналів були використані моделі малорозмірних БПЛА, які здатні нести корисне навантаження, таке як відеокамера. Частота основного тону акустичного випромінювання БПЛА знаходиться у діапазоні від 90 до 240 Гц (в залежності від типу БПЛА), кількість гармонік до декількох десятків, проте зі збільшенням відстані до БПЛА високочастотні гармоніки послаблюються.

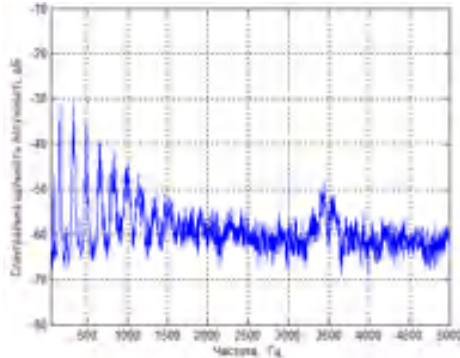


Рисунок 1 – Спектральна щільність потужності акустичного випромінювання квадрокоптера DJI Phantom 3

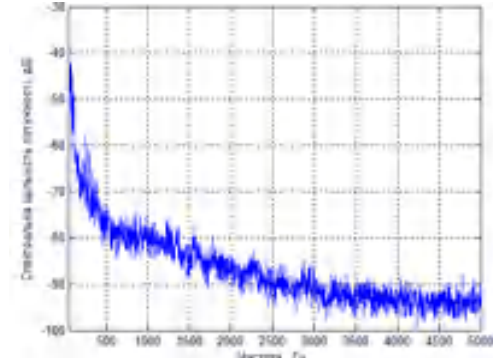


Рисунок 2 – Спектральна щільність завад та шумів

Характеристики завад і шуму (рис.2) мають важливе значення для синтезу алгоритмів виявлення і розпізнавання сигналів.

Коли МЛА рухається відносно пункту спостереження, частота звуку, що сприймається, змінюється відповідно до ефекту Доплера.

У частотному спектрі акустичного сигналу переважають гармоніки швидкості гвинта. Модель для частоти акустичного сигналу від БПЛА, що рухається, виміряна стаціонарним мікрофоном визначається за формулою:

$$f_i(t) = \frac{f_a c^2}{(c^2 - \mu_a^2)} \left[ 1 - \frac{\mu_a^2 (t+h/c)}{\sqrt{\mu_a^2 c^2 (t+h/c)^2 - h^2 (\mu_a^2 - c^2)}} \right], \quad (2)$$

де  $f_a$  – акустична частота джерела,  $c$  – швидкість звуку в середовищі,  $\mu_a$  – швидкість літального апарату,  $h$  – висота літального апарату.

З рівняння бачимо, що миттєва частота залежить від швидкості руху, висоти та частоти джерела звуку. Методика розрахунку полягає в обчисленні доплерівської частотно-часової варіації виміряного звукового сигналу і знаходження моделі сигналу, яка б мала найменшу середньоквадратичну похибку відхилення від поведінки у часі реального сигналу.

На рисунку 3 можемо спостерігати наявність ефекту Доплера при пересуванні МЛА, поступова зміна частоти акустичного сигналу відбувається в період проходження літального апарату над пунктом спостереження.

У контексті виявлення МЛА, аналіз змін частоти, спричинених ефектом Доплера, може допомогти визначити не тільки присутність апарату в

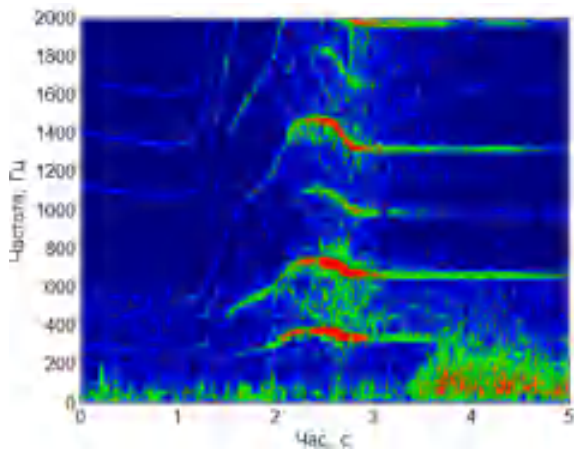


Рисунок 3 – Спектрограма акустичного випромінювання МЛА під час прольоту над пунктом спостереження

лінією спостереження близький до  $90^\circ$ , оскільки в таких випадках зміна частоти може бути мінімальною. Крім того, для точного аналізу потрібні високоякісні детектори та складні алгоритми обробки сигналів.

Акустична спектрограма сигналів, виміряних за допомогою наземного стаціонарного мікрофона показує, що використання доплерівських частот є потужним інструментом для отримання оцінок висоти, швидкості та обертів двигуна літального апарату. Особливо це покращує прогнозування часу наближення МЛА.

Використання акустичного методу виявлення МЛА відкриває нові можливості для захисту критично важливих об'єктів, забезпечення безпеки публічних заходів та моніторингу зон з особливим режимом. Однак, ефективність цього методу значною мірою залежить від розробки та інтеграції передових алгоритмів обробки сигналів та штучного інтелекту для аналізу акустичних даних.

#### Список використаних джерел:

1. Sadasivan S., Gurubasavaraj M., Sekar S. R. Acoustic signature of an unmanned air vehicle exploitation for aircraft localisation and parameter estimation // Defence Science Journal. 2001. Vol. 51, No. 3. P. 279–284.
2. Карташов В. Розроблення системи комплексної обробки оптичних, інфрачервоних, акустичних і радіолокаційних сигналів для виявлення безпілотних літальних апаратів, визначення їх координат та параметрів руху : звіт про НДР. Харків, 2020. 393 с.
3. Kartashov V., Pososhenko V., Voronin V., Kolesnik V., Kapusta A., Rybnikov N. (2021). Methods for detection-recognition of radar, acoustic, optical and infrared signals of unmanned aerial vehicles. Radiotekhnika, 2 (205), 138–153. <https://doi.org/10.30837/rt.2021.2.205.15>