

**ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ ПОЛОЖЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ
БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ
ЗА АКУСТИЧНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ**

Кутько К.О.

e-mail: kostiantyn.kutko1@nure.ua

Науковий керівник - проф. Олейніков В.М.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МІРЕС
студентський науковий гурток «Акустичні методи вимірювання
параметрів технічних засобів», м. Харків, Україна

The paper reviews the principles of passive acoustic detection and localization of small unmanned aerial vehicles (UAVs). The main spectral characteristics of acoustic signals generated by drones are analyzed. The advantages and disadvantages of the Time Difference of Arrival (TDOA) method using microphone arrays are discussed. The influence of environmental factors and the Doppler effect on the accuracy of coordinate determination is considered.

Останнє десятиліття характеризується стрімким розвитком та поширенням малорозмірних безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Вони використовуються у моніторингу, логістиці та військовій сфері. Висока маневреність, невеликі габарити, мала помітність БПЛА створюють проблему їхнього оперативного виявлення.

Для вирішення зазначених проблем широкого розповсюдження набули радіолокаційні, оптикоелектронні та акустичні методи. Традиційні методи виявлення положення БПЛА мають суттєві обмеження: радіолокаційні станції ефективні на великих дистанціях, але мають складнощі з виявленням малопомітних цілей (низька ЕПР) та демаскують себе активним випромінюванням. Оптичні системи залежать від погодних умов та освітлення. Акустичний метод, натомість, є пасивним (прихованим) і дозволяє працювати з цілями на гранично малих висотах, що робить його перспективним для побудови систем ближньої дії [1].

Для розробки алгоритмів локалізації БПЛА необхідно проаналізувати природу його акустичного поля. Спектральна щільність потужності (СЩП) акустичного випромінювання (АВ) БПЛА містить як вузькосмугові тональні складові (гармоніки обертання гвинтів), так і широкосмуговий шум (обтікання лопатей повітрям). Основна енергія сигналу зосереджена в діапазоні частот від 80 до 700 Гц. На рис. 1 наведено спектрограму акустичного випромінювання квадрокоптера в польоті. Видно, що при маневруванні БПЛА частоти гармонік АВ змінюються, оскільки контролер регулює обертання двигунів для стабілізації.

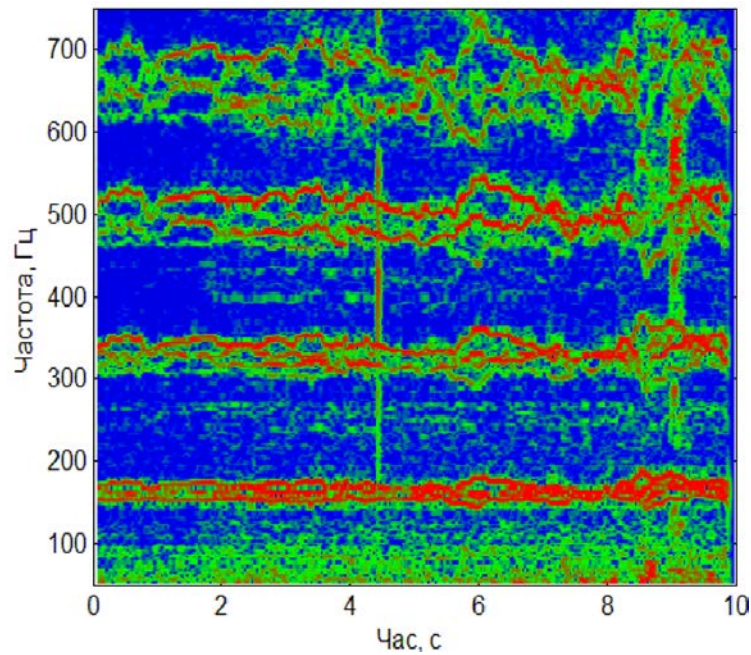


Рис. 1 – Спектрограма складових акустичного випромінювання квадрокоптера в процесі польоту

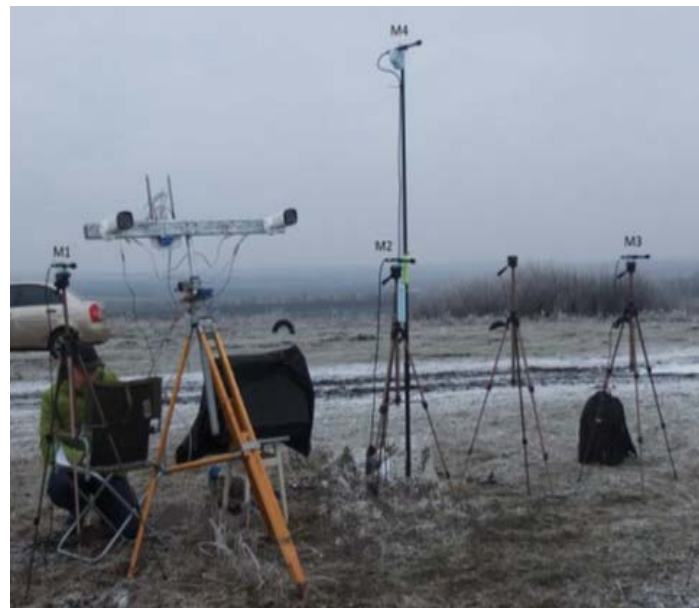


Рис. 2 – Зовнішній вигляд мікрофонної решітки пасивного содару під час випробувань

Для визначення координат використано різницево-далекомірний метод (TDOA - Time Difference of Arrival). Він базується на вимірюванні різниці часу приходу звукової хвилі до рознесених у просторі мікрофонів. Для реалізації цього методу було розроблено структуру пасивного содару (Sound Detection and Ranging)[2]. Система складається з чотирьох вимірювальних мікрофонів Superlux ECM-999, підключених до звукової карти Behringer U-Phoria UM2, що забезпечує частоту дискретизації сигналу 48 кГц.

Конфігурація мікрофонної решітки (рис. 2) включає дві азимутальні бази в горизонтальній площині ($d_1 = d_2 = 2$ м) для визначення пеленгу та одну кутомісну базу у вертикальній площині ($d_3 = 1$ м) для розрахунку висоти польоту.

Алгоритм обробки акустичних сигналів БПЛА передбачає обчислення взаємної кореляційної функції (ВКФ) сигналів між парами мікрофонів. Положення максимуму головної пелюстки ВКФ відповідає часовій затримці сигналу, яка перераховується у різницю відстаней і, врешті, у координати джерела звуку.

Точність визначення координат залежить від частоти дискретизації, розміру бази та відстані до цілі. Імітаційне моделювання в середовищі MATLAB показало, що інструментальна похибка зростає зі збільшенням відстані. Також на точність впливає ефект Доплера. При високих швидкостях руху БПЛА близько 20 м/с радіальні швидкості звуку відносно різних мікрофонів відрізняються, що призводить до спотворення розрахованої траєкторії - наприклад, колова траєкторія може трансформуватися в еліптичну.

Експериментальна перевірка проводилася з використанням квадрокоптера DJI Phantom 3 PRO. Верифікація отриманих акустичним методом координат здійснювалася шляхом порівняння з даними його бортового GPS-приймача. Результати вимірювань для тестового прольоту БПЛА наведені на рис. 3.

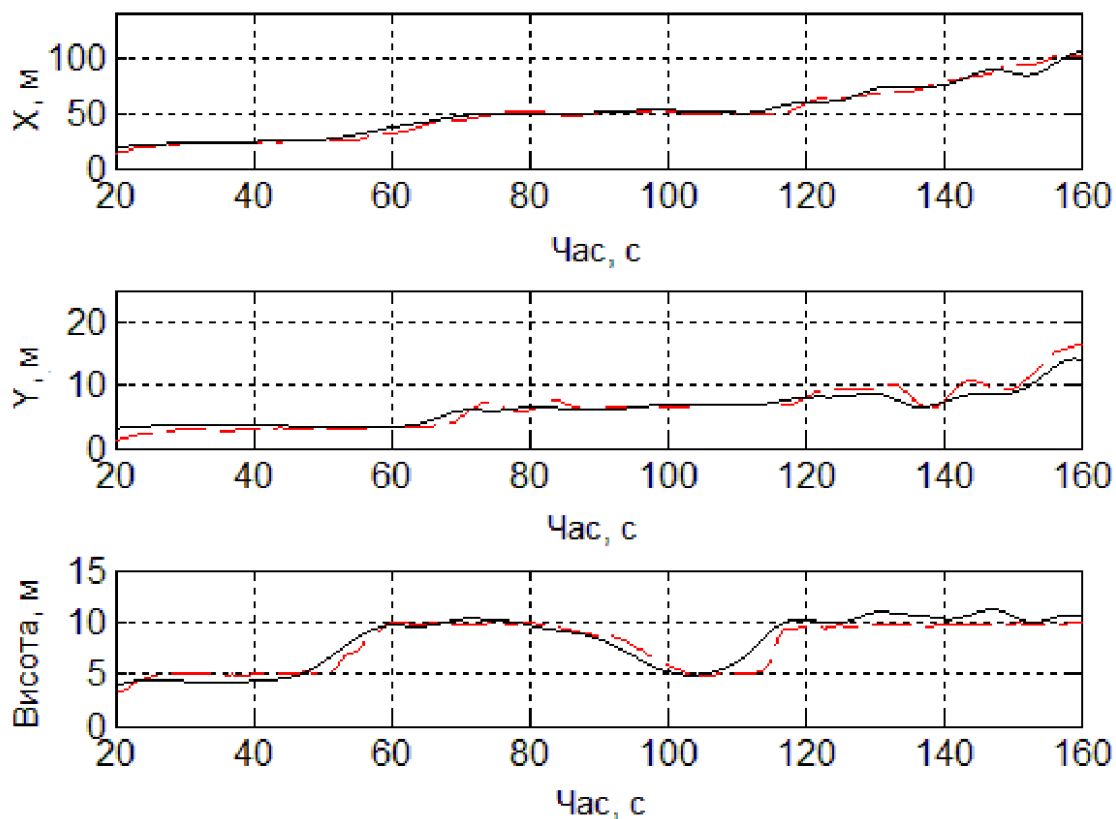


Рис. 3 – Зіставлення траєкторій польоту:
пунктир - дані GPS, суцільна лінія - дані акустичного сонару

Аналіз отриманих даних показує, що на відстані до 100 метрів (перші 160 секунд польоту на графіку) система забезпечує високу точність. Абсолютні значення похибок визначення координат у 95% випадків не перевищують 3 метри, а похибка визначення висоти становить не більше 1 метра. Для забезпечення такої точності критично важливим є етап юстування системи. Введення поправок у кутове положення баз дозволяє компенсувати систематичні похибки, викликані неточностями встановлення мікрофонів у польових умовах. Також застосовується фільтрація траєкторних даних алгоритмом Калмана для згладжування результатів.

Запропонована конфігурація пасивного содару з чотирьох мікрофонів дозволяє визначати просторові координати цілі, а використання різницево-далекомірною методу на базі кореляційної обробки забезпечує стійкість до шумів. Таким чином, акустичний метод є ефективним інструментом для пасивного виявлення та локалізації малорозмірних БПЛА, особливо в умовах, де застосування активних радарів неможливе або небажане.

Список використаних джерел:

1. Sedunov A., Sutin A., Salloum H., Sedunov N. Stevens drone detection acoustic system and experiments in acoustics UAV tracking // 2019 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST). Woburn, MA, USA. 2019. P. 1–7.
2. Oleynikov V., Zubkov O., Kartashov V., Koryttsev I., Sheiko S., Babkin S. Experimental estimation of direction finding to unmanned air vehicles algorithms efficiency by their acoustic emission // 2019 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications – Science and Technology. 2019. P.175 – 178.