УДК 621.396.963.5:623.746-519

МОДЕЛЮВАННЯ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ У СИСТЕМАХ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА

Шафроненко Є.О.
e-mail: yevhenii.shafronenko@nure.ua
Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МІРЕС
м. Харків, Україна

Modern conditions, particularly combat operations in Ukraine, have elevated unmanned aerial vehicles to a level of critical threat. Drones, from small copters to Shahed-type devices, are actively used for reconnaissance and strike operations. Due to their small size and maneuverability, traditional surveillance methods are often ineffective. In this context, acoustic detection methods are particularly important. They are based on the analysis of a specific sound “signature” created by UAV engines and propellers. The main advantage of such systems is their ability to operate in complete darkness, fog, or smoke, as well as their complete independence from radio-electronic radiation.

Сучасні умови, зокрема досвід бойових дій в Україні, вивели безпілотні літальні апарати на рівень критичних загроз. Дрони, від малих коптерів до апаратів типу «Шахед», активно використовуються для розвідки та ударних операцій. Через їхні малі розміри та маневреність традиційні методи спостереження часто виявляються недостатньо ефективними. У цьому контексті особливого значення набувають акустичні методи виявлення. Вони базуються на аналізі специфічного звукового «підпису», який створюють двигуни та пропелери БПЛА. Головною перевагою таких систем є їхня здатність працювати в умовах повної темряви, туману чи задимлення, а також повна незалежність від радіоелектронного випромінювання.

Процес виявлення базується на реєстрації звуку системою рознесених у просторі мікрофонів. Основна ідея полягає у вимірюванні різниці в часі приходу сигналу до кожного з сенсорів. Оскільки швидкість звуку відома, ці затримки дозволяють обчислити просторові координати об’єкта. Проте реальний сигнал не є ідеальним - на нього впливають шум приймача, сторонні джерела звуку та атмосферні умови. Моделювання такої системи вимагає врахування коефіцієнтів ослаблення звуку в повітрі та параметрів навколишнього середовища, таких як температура, вологість і атмосферний тиск.

Звукова хвиля на шляху від дрона до мікрофона зазнає значних змін. Вона втрачає енергію через поглинання атмосферою, що залежить від частоти звуку: вищі частоти згасають швидше. Окрім прямого шляху, звук також відбивається від земної поверхні. Це створює ефект інтерференції, коли пряма та відбита хвилі накладаються одна на одну. Залежно від типу поверхні (наприклад, твердий бетон чи м’яка трава) та фазового зсуву, певні частоти в спектрі сигналу можуть значно послаблюватися. Врахування

таких «дзеркальних» джерел звуку є критично важливим для створення реалістичної моделі виявлення.

Для перевірки теоретичних положень було створено модель руху БПЛА у тривимірному просторі. Процес аналізу включав використання коротких часових інтервалів для обчислення крос-кореляції сигналів, що дозволяє виділити корисний сигнал на фоні шуму. На спектрограмах чітко простежуються характерні провали амплітуди, які підтверджують вплив відбиття звуку від землі.

Моделювання показало, що система з чотирьох мікрофонів здатна успішно відтворювати траєкторію руху дрона. Проте точність визначення координат залежить від геометрії розміщення датчиків. Зокрема, було встановлено, що похибка у визначенні висоти (кута місця) зазвичай вища, ніж при визначенні азимута. Це зумовлено тим, що вертикальна база розташування мікрофонів часто є меншою за горизонтальну. Також точність знижується при значному віддаленні об'єкта або поблизу зон із високим рівнем сторонніх шумів.

Розроблена модель підтверджує перспективність акустичного моніторингу як засобу захисту об’єктів від дронів. Врахування фізичних процесів у атмосфері та ефектів відбиття дозволяє створити алгоритми, які максимально наближені до реальних умов експлуатації. Незважаючи на чутливість до метеоумов та рельєфу, інтеграція таких систем з іншими типами сенсорів та використання методів машинного навчання для розпізнавання звукових образів є ключовим шляхом до підвищення надійності виявлення БПЛА.

Список використаних джерел:

1. Методи і засоби виявлення безпілотних літальних апаратів системи захисту військових і критично важливих об'єктів інфратсруктури: звіт про НДР (заключ.): 335 / Харків. нац. ун-т радіоелектроніки; керівник д.т.н. проф. В. М. Карташов. – Харків, 2022. – 348 с.

2. Розроблення системи комплексної обробки оптичних, інфрачервоних, акустичних і радіолокаційних сигналів для виявлення безпілотних літальних апаратів, визначення їх координат та параметрів руху: звіт про НДР (заключ.): 327 / Харків. нац. ун-т радіоелектроніки; керівник В.М. Карташов. – Харків, 2020. – 323 с.

3. Kreuzer, M., & Müller, M. Acoustic drone detection: A survey of the state-of-the-art. Applied Acoustics, 2020, 170, 107520.

4. Petridis, V., & Koukoulas, T. Detection of UAVs using audio sensors: Experimental results on a machine learning approach. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2017, 2761–2765.