

АКУСТИЧНИЙ ДЕТЕКТОР FPV-ДРОНІВ

Машура А.П., Патлан Є.О.

e-mail: andrii.mashura@nure.ua, yehor.patlan@nure.ua

Науковий керівник – доцент Ликов Ю.В.

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

The increasing use of FPV (First Person View) drones creates challenges for traditional radar, radio-frequency, and optical detection systems due to their small size and low-altitude flight. This paper considers the principles of acoustic detection of FPV drones based on analysis of the noise generated by propellers and electric motors. A detection approach using a microphone array is proposed. Signal processing includes spectral analysis and time-difference-of-arrival (TDOA) methods for estimating the direction of the sound source and enabling early drone detection.

Розвиток безпілотних літальних апаратів малого класу, зокрема FPV-дронів (First Person View), суттєво змінив характер сучасних технічних та військових загроз. Завдяки невеликим габаритам, високій маневреності та можливості польоту на малих висотах такі апарати є складними для виявлення традиційними засобами контролю повітряного простору. Радіолокаційні системи мають обмежену ефективність через малу ефективну поверхню розсіювання безпілотних апаратів, а також через завади від підстилаючої поверхні та елементів забудови. Радіотехнічні методи виявлення базуються на перехопленні радіосигналів керування або передачі даних, однак їх ефективність суттєво знижується у випадку автономного режиму польоту або використання нестандартних каналів зв'язку. Оптико-електронні системи значною мірою залежать від метеорологічних умов, рівня освітленості та прямої видимості цілі. У зв'язку з цим актуальним напрямом є використання акустичних методів виявлення безпілотних літальних апаратів, які базуються на аналізі шуму силової установки та пропелерів. Перевагами акустичних систем є пасивний характер роботи, відсутність електромагнітного випромінювання, відносно низька вартість апаратної реалізації та можливість функціонування в умовах обмеженої видимості.

Акустичне випромінювання FPV-дронів формується переважно внаслідок обертання пропелерів та роботи електродвигунів. Основний внесок у формування акустичного сигналу роблять пропелери, оскільки їх обертання супроводжується періодичними змінами тиску у повітрі. Основна частота акустичного сигналу пов'язана з частотою обертання пропелера і може бути визначена за співвідношенням:

$$f_0 = \frac{n_b \cdot RPM}{60},$$

де n_b — кількість лопатей пропелера, RPM — частота обертання двигуна, об/хв.

У спектрі акустичного сигналу присутні також гармонічні складові, частоти яких визначаються виразом:

$$f_k = k f_0,$$

де k — номер гармоніки.

Для більшості мультироторних FPV-дронів основна енергія акустичного сигналу знаходиться у діапазоні приблизно 200–3000 Гц. Наявність виражених гармонічних компонентів у цьому частотному діапазоні дозволяє використовувати методи спектрального аналізу для виявлення безпілотних літальних апаратів на фоні шумів навколишнього середовища.

Під час поширення в атмосфері рівень акустичного сигналу поступово зменшується внаслідок геометричного розходження хвиль та атмосферного поглинання. Залежність рівня звукового тиску від відстані до джерела може бути описана виразом:

$$L(r) = L_0 - 20 \log_{10} \left(\frac{r}{r_0} \right) - \alpha r,$$

де L_0 — рівень звуку на опорній відстані r_0 , r — відстань до джерела звуку, α — коефіцієнт атмосферного поглинання.

Унаслідок загасання сигналу дальність ефективного акустичного виявлення FPV-дронів у більшості практичних умов становить від кількох сотень метрів до приблизно одного кілометра залежно від рівня фонового шуму та метеорологічних факторів.

Для підвищення ефективності виявлення доцільно використовувати мікрофонні масиви, які забезпечують можливість просторової обробки акустичних сигналів. Принцип визначення напрямку на джерело звуку базується на аналізі різниці часу приходу акустичної хвилі до різних мікрофонів масиву. Для двох просторово рознесених мікрофонів різниця часу приходу сигналу може бути описана співвідношенням:

$$\tau = \frac{d \sin \theta}{c},$$

де d — відстань між мікрофонами, c — швидкість поширення звуку в повітрі, θ — кут приходу акустичної хвилі.

Відповідно кут на джерело звуку визначається як:

$$\theta = \arcsin \left(\frac{c\tau}{d} \right).$$

Оцінка різниці часу приходу сигналу може виконуватися за допомогою взаємної кореляційної функції сигналів:

$$R_{xy}(\tau) = \int x(t)y(t + \tau)dt.$$

Для підвищення точності в умовах шуму застосовується узагальнений кореляційний метод з фазовим зважуванням (GCC-PHAT).

Типова структура акустичного детектора FPV-дронів включає мікрофонний масив, багатоканальний аудіоінтерфейс, обчислювальний

модуль обробки сигналів та програмний модуль прийняття рішень.

Мікрофонний масив призначений для прийому акустичних сигналів у заданому частотному діапазоні та забезпечує можливість визначення напрямку на джерело звуку. Багатоканальний аудіоінтерфейс виконує функцію синхронної оцифровки сигналів з усіх мікрофонів з єдиною частотою дискретизації, що є необхідною умовою для коректного визначення часових зсувів між каналами. Для практичної реалізації системи може використовуватися конфігурація з восьми всепрямованих мікрофонів, об'єднаних у мікрофонний масив. Типовими параметрами оцифрування сигналів є частота дискретизації 48 кГц та розрядність 24 біти, що забезпечує достатню точність для аналізу спектральних характеристик акустичних сигналів FPV-дронів.

Акустичний детектор FPV-дронів реалізує послідовну обробку сигналів, що включає прийом акустичних коливань мікрофонним масивом, попередню фільтрацію та нормалізацію сигналів, спектральний аналіз за допомогою швидкого перетворення Фур'є і виявлення характерних гармонічних компонентів шуму пропелерів. Після підтвердження наявності акустичних ознак безпілотного літального апарата виконується оцінка напрямку на джерело звуку на основі аналізу різниці часу приходу сигналів до мікрофонів масиву. Отримані результати використовуються для формування рішення про наявність FPV-дрона та можуть бути застосовані для подальшої просторової локалізації об'єкта у багатопостових акустичних системах. Акустичний метод забезпечує пасивне виявлення малорозмірних БПЛА та може використовуватися як самостійний засіб раннього попередження або як елемент комплексних систем протидії безпілотним літальним апаратам.

Список використаних джерел:

1. Олейніков А. М., Бородавка А. В. Основні напрями вдосконалення засобів акустичної розвідки // Радіотехніка : Всеукр. міжвідомчий наук.-техн. збірник. – 2017. – Вип. 189. – С. 189–194.
2. Brandstein M., Ward D. Microphone Arrays: Signal Processing Techniques and Applications. – Berlin: Springer, 2001.