

Виявлення малих літальних апаратів за акустичним випромінюванням

Козеруж С. О., Коржик О. В.

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

E-mail: skzrk@i.ua

Вступ. Виявлення малих літальних апаратів (МЛА) або дронів ускладнюється їх низькою помітністю, як в електромагнітному, так і в акустичному діапазонах довжин хвиль, а також особливістю траєкторії їх польоту. Висота польоту може змінюватися від одиниць до десятків метрів, а динаміка руху – від зависання до прискорення в довільному напрямку. Використання радіолокації дозволяє виявляти дрони на відкритих територіях на відстані до 1000 м. Акустичні методи спостереження забезпечують виявлення в умовах складного рельєфу і наявності зелених насаджень. Дальність виявлення залежить від обраного приймального пристрою, рівня випромінювання об'єкта і рівня акустичних перешкод в зоні спостереження. Розробка алгоритму розрахунку максимальної дальності виявлення за заданими характеристиками виявлення представляється актуальним завданням.

Теоретичні результати. Для виявлення літаючих об'єктів пропонується використовувати приймач, що забезпечує некогерентне оброблення акустичних сигналів – типовий тракт виявлення. Алгоритм розрахунку максимальної дальності виявлення МЛА заснований на статистичній теорії виявлення шумоподібних сигналів замаскованих перешкодами. Передбачається, що акустичні характеристики дрона як об'єкта випромінювання і перешкоди як акустичного шуму в районі застосування засоби виявлення відомі. Характеристики виявлення – ймовірності виявлення і хибної тривоги задаються довільно. Послідовність розрахунку максимальної дальності виявлення МЛА зводиться до встановлення типу, ефективної смуги частот і рівня сигналу випромінювання, визначення рівня перешкоди в зоні прийому, розрахунку параметра виявлення за характеристиками, розрахунку максимальної дальності виявлення.

Висновки. Для виявлення МЛА за акустичним випромінюванням запропоновано використовувати приймач – типовий тракт виявлення. Наведено алгоритм розрахунку ймовірності виявлення шумового сигналу і встановлено правило прийняття рішення. В роботі запропонований алгоритм розрахунку максимальної відстані виявлення МЛА за заданими характеристиками виявлення і акустичними характеристиками дрона і перешкод. Важливим фактором оцінки дальності є розподіл температури повітря за висотою і напрямком руху повітряних мас. Тому алгоритм слід удосконалити з урахуванням метеорологічної ситуації.

Ключові слова: малий літальний апарат; типовий канал виявлення; характеристики виявлення; максимальна відстань виявлення

DOI: [10.20535/RADAP.2019.76.15-20](https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.76.15-20)

Вступ

Проблема виявлення малих літальних апаратів (МЛА), інша назва дрони [1], пов'язана з їх низькою помітністю, як в електромагнітному, так і в акустичному діапазонах довжин хвиль. Виявлення ускладнюється особливістю траєкторії польоту, а саме висотою, яка може змінюватись від одиниць до десятків метрів, та динамікою руху – від зависання до прискорення в довільному напрямку. Використання радіолокації дозволяє виявляти дрони на відстані до 1000 м на відкритих територіях. Акустичні методи спостереження забезпечують виявлення в умовах складного рельєфу та наявності зелених насаджень. Вибір алгоритму детектування

залежить від характеристик звукового випромінювання МЛА. Результати дослідження акустичних сигнатур МЛА для трьох-, чотирьох- та шестиелектромоторних дронів приведені в роботах [2, 3]. Звук, що випромінюється дронами, має тональні складові випромінювання пропелерів та ширококутовий шум випромінювання механічного походження.

На рис. 1 приведено типовий спектр випромінювання, взятий з роботи [2], чотиримоторного дрона – квадрокоптера, з двома лопатями на осі кожного двигуна. Звук випромінювання пропелера залежить від частоти обертання ротора двигуна та кількості лопатей на його осі. Спектр випромінювання періодичний, має явно виражені дискрети, частота яких змінюється в залежності від кількості обертів двигуна.

на. Частоти f_i максимумів спектру можна оцінити знаючи частоту обертання електродвигуна f_0 та кількість лопатей N пропелера:

$$f_i = N f_0 i, \quad i = 1, 2, 3 \dots$$

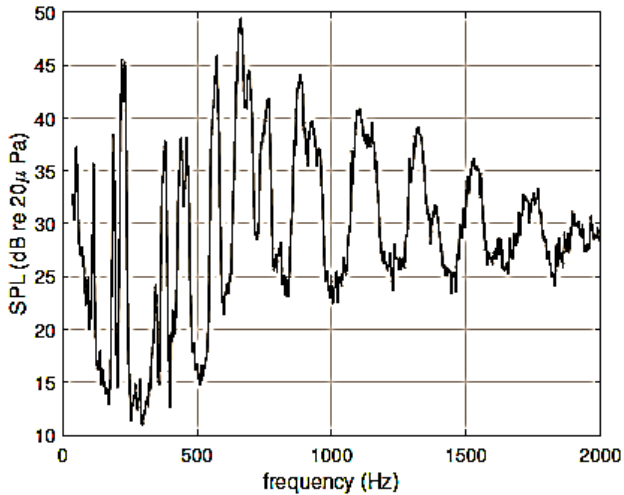


Рис. 1. Спектр випромінювання чотиримоторного дрона

Спектр дрона має декілька близьких дискрет, положення яких на осі частот змінюється у часі. Пояснюється це тим, що електродвигуни обертаються з різною швидкістю, яка залежить від режиму польоту та вітрового навантаження. У польоті вітрове навантаження на пропелери змінюється випадково. Величина та частота звукового випромінювання змінюються теж випадково та може розглядатись як широкопasmовий шумовий процес з гармонічними компонентами. Аеродинамічні шуми обтікання корпусу дрона мають низькочастотну та високочастотну складові. Шуми обтікання, як стверджується в роботі, мають низький рівень звукового тиску та суттєво залежать від аеродинаміки літального апарата, тому для виявлення дронів не використовуються. В результаті експериментальних досліджень акустичних характеристик квадрокоптера [4] було встановлено широкопasmову шумову складову і багатокомпонентну гармонійну структуру випромінювання в діапазоні частот до 10кГц. Значення амплітуди і фази гармонік змінюються випадково і при відсутності руху квадрокоптера. Це пояснюється деяким розходженням режимів роботи двигунів в процесі компенсації автоматикою безпілотної літального апарату вітрового впливу. Автори запропонували розглядати акустичне випромінювання як широкопasmовий випадковий процес з відповідним енергетичним спектром, а інформаційними параметрами вибрати його спектральні коефіцієнти. В залежності від вибраної моделі шуму випромінювання для детектування дронів використовують різні способи. В роботі [5] для локалізації МЛА запропоновано мікрофонний масив із чотирьох мікрофонів в формі тетраедра. Кутіві координати (азимут

та кут підвищення) визначались по часу затримки хвиль прийнятих мікрофонами. Час затримки встановлювався по піку взаємно-кореляційної функції (ВКФ) між сигналами мікрофонів. Недоліком способу локалізації є велика кількість операцій по обробці інформації.

Спосіб локалізації МЛА масивом з 24 мікрофонів, що розташовані на поверхні землі, приведені в роботі [6]. Алгоритм виявлення зводився до синтезування характеристики спрямованості з кутом розктиву 10 та огляду простору в секторі кутів ± 450 . Результат виводився на дисплей у вигляді траєкторії руху об'єкта в координатах: кут приходу хвилі – час. Недоліком пристрою є застосування лінійки мікрофонів, налаштованої на частоту 700 Гц, для просторової обробки широкопasmового акустичного випромінювання в діапазоні частот (450-3000) Гц. Цим пояснюється наявність інтерференційних смуг на зображенні траєкторії руху.

В роботі [7] представлено результати спостереження за польотом одномоторного МЛА, з добре вираженою гармонійною структурою спектра випромінювання. Застосування двох лінійних масивів з 8 мікрофонів кожний, розташованих ортогонально та налаштованих на прийом хвиль з частотою нижчою 500 Гц, дала змогу забезпечити круговий огляд простору на відстані до 2 км. Використавши некогерентну обробку декількох гармонійних складових в смугі частот (100–200) Гц, вдалось побудувати зображення траєкторії руху об'єкта з високою кутовою роздільною здатністю і малим спотворенням.

Реалізація приведених вище способів виявлення та локалізації МЛА потребує багатоелементних мікрофонних масивів, дорогого апаратного та програмного забезпечення. Більш простими є акустичні детектори з одним мікрофоном. Вони дають можливість виявити, але не локалізувати об'єкт. Незважаючи на невелику відстань виявлення детектора, розгортання декількох детекторів [1] дозволяє сформувати акустичний бар'єр і, таким чином, виявити і локалізувати дрон на основі обраної геометрії бар'єра.

Вдосконалення методів акустичного детектування і прогнозування максимальної відстані надійного виявлення МЛА є актуальною проблемою.

1 Алгоритм виявлення акустичного шумового сигналу

Проведені в роботах [2–4] дослідження акустичних сигнатур МЛА дають можливість розглядати звукове випромінювання як широкопasmовий випадковий процес з деяким енергетичним спектром. Визначившись з моделлю акустичного випромінювання перейдемо до розгляду задачі виявлення, а саме: визначення присутності шумового сигналу у прийнятому акустичному шумі з заданими ймовір-

ностями виявлення і хибної тривоги та розрахунку максимальної відстані виявлення. Для вирішення задачі виявлення скористаємось типовим каналом виявлення (ТКВ). ТКВ (рис. 2) відноситься до приймачів, які реалізують некогерентну обробку сигналу і, у разі правильного вибору параметрів схеми, можуть бути близьким до оптимального.

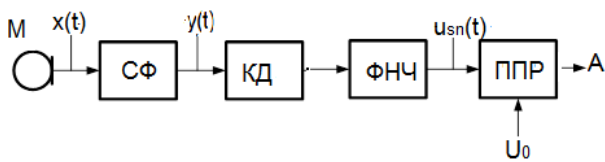


Рис. 2. Схема типового каналу виявлення

З мікрофона (М) на вхід смугового фільтра (СФ) поступає адитивна суміш $x(t) = s(t) + n(t)$ шумового сигналу випромінювання $s(t)$ та акустичної завади $n(t)$. Припустимо, що завада і сигнал є випадковими нормальними стаціонарними процесами з нульовими математичними очікуваннями. Процеси між собою некорельовані. Випадковий процес $y(t)$ на виході СФ теж стаціонарний та нормальний, характеризується нульовим математичним очікуванням і дисперсіями: $\sigma_n^2, \sigma_s^2, \sigma_{sn}^2$ — завади, сигналу та суміші відповідно. Враховуючи некорельованість сигналу та завади, запишемо дисперсію суміші на виході СФ: $\sigma_{sn}^2 = \sigma_s^2 + \sigma_n^2$. Після обробки $y(t)$ в КД і ФНЧ на виході останнього отримаємо низькочастотні напруги $u_n(t), u_{sn}(t)$ для ситуацій відсутності та наявності сигналу на вході ТКВ відповідно. Відношення сигналу до завади (С/З) q_2 на виході ФНЧ за час інтегрування T визначається приростом середнього значення $\Delta U_{sn}(T)$ до середньоквадратичного значення $U_\sigma(T)$ вихідної напруги $u_{sn}(t)$. У випадку використання ідеальних СФ із смугою частот Δf та ФНЧ з постійною інтегрування T , маємо:

$$q_2 = \frac{\Delta U_{sn}(T)}{U_\sigma(T)} = \frac{q_1^2}{1 + q_1^2} \sqrt{\Delta f T}, \Delta f T \gg 1, \quad (1)$$

$$q_1^2 = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2}, \quad (2)$$

де q_1^2 — відношення дисперсій сигналу до завади на виході СФ.

Параметр q_2 не дає повної характеристики приймача як детектора сигналу. Тому крім енергетичного критерію завадостійкості використовують ще характеристики виявлення (ХВ). ХВ встановлюють зв'язок між ймовірністю виявлення сигналу D і відношенням С/З на вході приймача для заданої ймовірності хибної тривоги F . Знаючи закон розподілу щільності ймовірності за наявності і у відсутності сигналу на вході приймача, рішення про виявлення приймається по критерію правдоподібності [8, 9]. Для ТКВ виявлення, тобто прийняття рішення про присутність сигналу $A = 1$, визначається умовою

$u_{sn}(t) \geq U_0$ та реалізується в пристрої прийняття рішення (ППР). Значення U_0 розраховується по заданому значенню ймовірності хибної тривоги F та середньоквадратичного значення U_σ на виході ФНЧ:

$$U_0 = U_\sigma \cdot \Phi^{-1}(1 - F),$$

де $\Phi^{-1}(l)$ — функція обернена інтегралу ймовірностей (l).

Ймовірність виявлення D буде залежати від заданої ймовірності F та величини $u_{sn}(t)$ на виході ФНЧ:

$$D = \Phi\left(\frac{u_{sn}(t) - U_0}{U_\sigma}\right).$$

Ймовірність D для ТКВ розраховують як функцію відношення дисперсій сигналу до завади на виході СФ із смугою частот пропускання рівною ефективній смузі сигналу. Скористаємось для розрахунку D виразом отриманим в [9]:

$$D = \Phi\left(\frac{q_1^2 \sqrt{\Delta f T}}{1 + q_1^2} - \frac{\Phi^{-1}(1 - F)}{1 + q_1^2}\right). \quad (3)$$

Аналізуючи (3) можна зробити висновок про зростання D із збільшенням часу спостереження і смуги частот сигналу. На рис. 3, наприклад, приведено графіки ХВ квадрокоптера з ефективною смугою частот випромінювання $\Delta f = 1230$ в діапазоні (170–1400) Гц (рис. 1) та заданою ймовірністю хибної тривоги $F = 10^{-3}$.

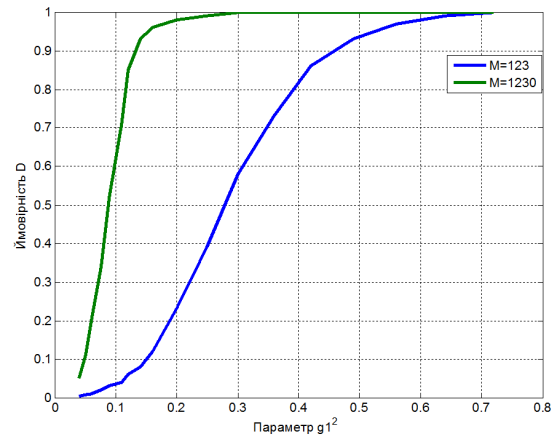


Рис. 3. Характеристики виявлення для заданих $F = 10^{-3}$ і параметра $M = \Delta f T$.

Отримані криві вказують на те, що для фіксованої смуги частот збільшення ймовірності D може досягатись збільшенням часу інтегрування з 0.1 с до 1 с.

Встановимо правило прийняття рішення для виявлення шумового сигналу. Вихідні значення напруг сигналу $U_s(T)$, завади $U_n(T)$ та їх суміші $U_{sn}(T)$ дорівнюють дисперсії цих процесів на виході СФ. Скориставшись виразом (2) отримаємо:

$$q_1^2 = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} = \frac{\sigma_{sn}^2}{\sigma_n^2} - 1 = \frac{U_{sn}(T)}{U_n(T)} - 1.$$

Звідки встановимо правило прийняття рішення:

$$U_{sn}(T) \geq (1 + q_1^2)U_n(T). \quad (4)$$

Згідно (4) сигнал вважаємо виявленим із заданими ймовірностями F, D за умови перевищення середнього значення напруги на виході ФНЧ його середнього значення, у відсутності сигналу, на величину $q_1^2 U_n(T)$.

2 Розрахунок максимальної відстані виявлення

МЛА у вибраному діапазоні частот випромінює акустичні хвилі у всі сторони та може розглядатись як джерело сферичних хвиль. Сферичні хвилі розповсюджуючись ослаблюються за рахунок поглинання в повітрі та розходження хвильового фронту. Звуковий тиск p_r та інтенсивність I_r на вході приймача, що розташований на відстані r від випромінювача, визначаються відомими співвідношеннями [8, 10]:

$$p_r = p_s e^{-\alpha r} \frac{r_s}{r}, \quad I_r = \frac{p_s^2}{\rho c} e^{-2\alpha r} \left(\frac{r_s}{r}\right)^2, \quad (5)$$

де r_s — відстань, для якої визначено звуковий тиск випромінювання p_s ; ρc — питомий хвильовий опір повітря; α — коефіцієнт поглинання звуку в повітрі.

Акустична завада в зоні прийому характеризується тиском p_n та інтенсивністю I_n . Відношення $C/3$ по тиску q та інтенсивності q^2 (параметр виявлення) в зоні прийому визначається співвідношеннями:

$$q = \frac{p_r}{p_n}, \quad q^2 = \left(\frac{p_r}{p_n}\right)^2 = \frac{I_r}{I_n}. \quad (6)$$

Величина коефіцієнта поглинання α для частот нижчих 2кГц не перевищує 0.01 дБ/м [11], тому для вибраного діапазону частот випромінювання його не враховуємо. Максимальну відстань виявлення (МВВ), для зручності використання в подальшому, знайдемо з (5) як функцію параметра виявлення (6):

$$r = \sqrt{\frac{I_s}{q^2 I_n}} r_s. \quad (7)$$

На рис. 4 представлені графіки залежності МВВ від q^2 для різниці рівнів $L = 10 \lg \frac{I_s}{I_n} = L_s - L_n$ випромінювання об'єкту L_s і завади L_n за умови $r_s = 1$. Аналізуючи графіки можна зробити висновок, що МВВ визначається відношенням $C/3$ в зоні прийому. Чим менше величина сигналу, який впевнено реєструє приймач, тим більша відстань виявлення джерела випромінювання.

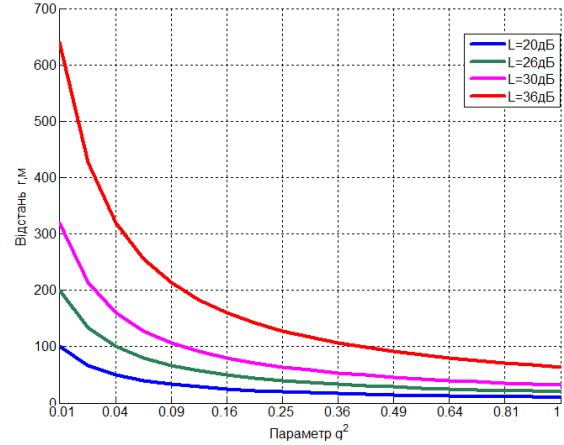


Рис. 4. Залежність максимальної відстані виявлення від параметра виявлення

Враховуючи розглянутий вище алгоритм обробки шумового сигналу і акустичної завади ТКВ та поклавши коефіцієнт трансформації мікрофоном акустичних хвиль в електричні рівні одиниці, можна записати рівність:

$$q_1^2 = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} = \frac{p_s^2}{p_n^2} = q^2. \quad (8)$$

Співвідношення (8) дає можливість встановити зв'язок параметра виявлення з заданими ХВ та налаштуванням схеми ТКВ і прогнозувати МВВ.

3 Приклад розрахунку максимальної відстані виявлення квадрокоптера

Використаємо отримані результати для прогнозу МВВ по заданим D і F та відомим акустичним характеристикам квадрокоптера і завади. Спочатку визначимо енергетичні характеристики завади. В роботі [2] була визначена ефективна смуга частот випромінювання $\Delta f = 1230$, що перекриває три нормовані октавні смуги з середніми частотами [10]: $f_{cp1} = 250$; $f_{cp2} = 500$; $f_{cp3} = 1000$. Рівень завади задаємо довільно. Наприклад, для приміських територій по нормативам [12] він становить $L_1 = 40$; $L_2 = 34$; $L_3 = 30$ у визначених смугах частот, відповідно. Розрахуємо потужність N_n та рівень потужності L_n акустичних завад в смузі частот випромінювання:

$$N_n = \sum_{i=1}^3 n_0 10^{0.1L_i}; \quad n_0 = 10^{-12}; \quad (9)$$

$$N_n \approx 13.5 \cdot 10^{-9}; \quad L_n = 10 \lg \left(\frac{N_n}{n_0}\right) = 41, 3.$$

Рівень випромінювання квадрокоптера [2] на відстані $r_s = 6$ від мікрофона, скорегований по шкалі А, становить $L_s = 72$. Знайдемо рівень звука в

вибраній смузі частот випромінювання. Для цього спочатку розрахуємо середню спектральну густину потужності (СГП) N випромінювання скориговану по шкалі А в діапазоні частот $\Delta f_A = (8000 - 18) = 7982$:

$$N = \frac{n_0 10^{0.1L_s}}{\Delta f_A}; N \approx 2 \cdot 10^{-9}.$$

Перейдемо до СГП N_{si} в октавних смугах Δf_i з середніми частотами $f_{cp1} = 250; f_{cp2} = 500; f_{cp3} = 1000$, взявши з [10] коефіцієнти корекції $\Delta L_1 = 8.6; \Delta L_2 = 3.2; \Delta L_3 = 0$, відповідно:

$$\begin{aligned} N_{si} &= N 10^{0.1\Delta L_i}; i = 1, 2, 3; \\ N_{s1} &\approx 14.5 \cdot 10^{-9} \text{ Вт/Гц}; \\ N_{s2} &\approx 4.2 \cdot 10^{-9} \text{ Вт/Гц}; \\ N_{s3} &\approx 2 \cdot 10^{-9} \text{ Вт/Гц}. \end{aligned} \quad (10)$$

По результатам (10) розрахуємо акустичну потужність N_s та рівень L_s в смузі частот випромінювання:

$$\begin{aligned} N_s &= \sum_{i=1}^3 N_{si} \Delta f_i = 5.41 \cdot 10^{-6}; \\ L_s &= 10 \lg \left(\frac{N_s}{n_0} \right) = 67.3. \end{aligned} \quad (11)$$

Сформулюємо алгоритм прогнозу максимальної відстані виявлення. Для заданих ймовірностей D і F та вибраного параметра $M = \Delta f T$ по графікам ХВ приведеним на рис. 3 знаходимо q_1^2 . Враховуючи рівність $q^2 = q_1^2$ та знаючи різницю рівнів випромінювання і завади L визначаємо МВВ за відповідною кривою, що приведена на рис. 4.

Наприклад, по заданим ймовірностям $D = 0.90$ і $F = 10^{-3}$, параметром виявлення $q^2 = 0.13$ та різницею рівнів $L = 26$, МВВ квадрокоптера приймачем з параметрами налаштування $\Delta f T = 1230$ становить приблизно 60 м.

Висновки

1. Для виявлення малих літальних апаратів по акустичному випромінюванню використано приймач за схемою типового каналу виявлення. Приведено алгоритм розрахунку ХВ шумового сигналу ТКВ в залежності від параметрів налаштування приймача. Для прикладу наведено графіки ХВ для наперед заданої ймовірності хибної тривоги $F = 10^{-3}$ та двох налаштувань ТКВ. Встановлено правило прийняття рішення виявлення сигналу.

2. Запропоновано алгоритм оцінки МВВ малих літальних апаратів за заданими ймовірностями виявлення і хибної тривоги та відомим акустичним характеристикам літального апарата і завади. Наведено приклад прогнозу МВВ квадрокоптера.

3. Прогноз МВВ суттєво залежить від рівня випромінювання МЛА та акустичних завад в зоні прийому. Важливим фактором оцінки відстані є

метеорологічна ситуація [11], а саме розподіл температури повітря з висотою та напрям руху повітряних мас. Тому алгоритм слід вдосконалити з урахуванням метеорологічної ситуації.

4. Розроблений підхід може застосовуватись для прогнозування МВВ літальних апаратів та створення акустичних детекторів шумових об'єктів випромінювання.

Перелік посилань

1. Drone Labs [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.drone-detector.com>
2. Cabell R. Measured Noise from Small Unmanned Aerial Vehicles / R. Cabell, F. Grosveld, R. McSwain // INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, NoiseCon16. – pp. 345-354.
3. Sadasivan S. Acoustic Signature of an Unmanned Air Vehicle – Exploitation for Aircraft Localisation and Parameter Estimation / S. Sadasivan, M. Gurubasavaraj, S. Ravi Sekar // Defence Science Journal – 2001. – Vol 51, No 3. – p. 279–284.
4. Карташов В. М. Информационные характеристики звукового излучения малых беспилотных летательных аппаратов / В.М. Карташов, С.А. Шейко, С.И. Бабкин, И.В. Корытцев, О.В. Зубков // Радиотехника ХНУРЭ. – 2017. – Вып. 191. – с. 181-187.
5. Finn A. Acoustic Sense & Avoid for UAV's / A. Finn, S. Franklin // 2011 Seventh International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, Adelaide, SA. – 2011. – pp. 586-589.
6. Case E.E. Low-Cost Acoustic Array for Small UAV Detection and Tracking / E.E. Case, A.M. Zelnio, B.D. Rigling // 2008 IEEE National Aerospace and Electronics Conference. – 2008.
7. Pham T. Acoustic Data Collection of Tactical Unmanned Air Vehicles (TUAVs) / T. Pham, L. Sim. – 2002.
8. Damarla T. Battlefield Acoustics / T. Damarla // Springer International Publishing. – 2015. – 262p.
9. Евтютов А.П. Примеры инженерных расчетов в гидроакустике / А.П. Евтютов, В.Б. Митько. – Л. : Судостроение, 1981. – 256 с.
10. Дідковський В.С. Шуми і вібрації / В.С. Дідковський, О.В. Коржик, А.Г. Лейко. – К. : ТОВ Імекс-ЛТД, 2010. – 336 с.
11. Massey K. Noise Measurements of Tactical UAVs / K. Massey, R. Gaeta // 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, p. 391.
12. ДБН В.1.1-31:2013 Захист територій, будинків і споруд від шуму.

References

- [1] Drone Labs. Available at: <http://www.drone-detector.com>
- [2] Cabell R., Grosveld F. and McSwain R. (2016) Measured Noise from Small Unmanned Aerial Vehicles. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, NoiseCon16*, pp. 345-354.

- [3] Sadasivan S., Gurubasavaraj M. and Sekar S.R. (2001) Acoustic signature of an unmanned air vehicle exploitation for aircraft localisation and parameter estimation. *Defence Science Journal*, Vol. 51, Iss. 3, pp. 279-284. DOI: 10.14429/dsj.51.2238
- [4] Kartashov V. M., Sheiko S.A., Babkin S.I., Koryttsev I.V. and Zubkov O.V. (2017) Informatsionnye kharakteristiki zvukovogo izlucheniya malykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Information characteristics of the sound radiation of small unmanned aerial vehicles]. *Radiotekhnika KhNURE*, Iss. 191, pp. 181-187.
- [5] Finn A. and Franklin S. (2011) Acoustic Sense & Avoid for UAV's, *2011 Seventh International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, pp. 586-589. DOI: 10.1109/ISSNIP.2011.6146555
- [6] Case E.E., Zelnio A.M. and Rigling B.D. (2008) Low-Cost Acoustic Array for Small UAV Detection and Tracking. *2008 IEEE National Aerospace and Electronics Conference*. DOI: 10.1109/naecon.2008.4806528
- [7] Pham T. and Sim L. (2002) *Acoustic Data Collection of Tactical Unmanned Air Vehicles (TUAVs)*. DOI: 10.21236/ada410088
- [8] Damarla T. (2015) *Battlefield Acoustics*, 262 p. DOI: 10.1007/978-3-319-16036-8
- [9] Evtyutov A.P. and Mit'ko V.B. (1981) *Primery inzhenernykh raschetov v gidroakustike* [Examples of engineering calculations in hydroacoustics], Leningrad, Sudostroenie, 256 p.
- [10] Didkovskiy V.S., Korzhyk O.V. and Leiko A.H. (2010) *Shumy i vibratsii* [Noises and vibrations], Kuiv, TOV Imeks-LTD, 336 p.
- [11] Massey K. and Gaeta R. (2010) Noise Measurements of Tactical UAVs. *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. DOI: 10.2514/6.2010-3911
- [12] DBN V.1.1-31:2013 Protection of territories, buildings and structures from noise. State Construction Standards of Ukraine. Available at: dbn.co.ua/load/normativy/dbn/zakhist_vid_shumu/1-1-0-1814

Обнаружение малых летательных аппаратов по акустическому излучению

Козерук С. А., Коржик А. В.

Актуальность исследуемой проблемы обусловлена ростом числа малых летательных аппаратов, которые могут нести угрозу как государственным, так и частным интересам. В работе предложен алгоритм расчета максимального расстояния обнаружения малого летательного аппарата по заданным характеристикам обнаружения и известным акустическим характеристикам летательного аппарата и помехи. Алгоритм проверено экспериментально на примере выявления квадрокоптера. Предложенный подход может применяться для

прогнозирования дальности обнаружения малых летательных аппаратов и создания акустических детекторов шумящих объектов.

Ключевые слова: малый летательный аппарат; типовой канал обнаружения; характеристики обнаружения; максимальная дальность обнаружения

Detection Small Aircraft by Acoustic Radiation

Kozeruk S. O., Korzhyk O. V.

Introduction. The problem of detecting small aircraft (SA) gave impetus to the creation of devices and systems for detecting different principles of operation. The detection of drones is complicated by their low visibility, both in the electromagnetic and acoustic ranges of the wavelengths and the feature of the flight path. Flight altitude can vary from units to tens of meters, and the dynamics of movement, from lagging to acceleration in an arbitrary direction. The use of radar allows detect drones in open areas at a distance of up to 1000m. Acoustic observation methods provide detection in complex terrain and the presence of green spaces. The detection range depends on the selected receiver, the radiation level of the object and the level of acoustic noise in the observation area. The development of the algorithm for calculating the detection range for the given detection characteristics seems to be relevant.

Theoretical results. For the detection of flying objects it is proposed to use a receiver that provides non-coherent processing of acoustic signals — typical detection channel. The algorithm for calculating the maximum range of detection of SA is based on the statistical theory of detecting a noise-like signal disguised by interference. The algorithm for calculating the maximum detection range of SA is based on the statistical theory of detection of a noise-like signal. The sequence of calculating the maximum range of detection of LLA is reduced to establishing the type, effective frequency band and level of the radiation signal, determining the level of interference in the reception area, calculating the CW detection parameter, calculating the maximum detection range.

Conclusions. To detect SA by acoustic radiation, it is proposed to use a detector according to the scheme of a typical detection channel. An algorithm for calculating the probability of detecting a noise signal is presented and a decision rule is established. The paper proposes an algorithm for calculating the maximum distance for detection of SA. An important factor in assessing the range is the distribution of air temperature with altitude and the direction of movement of air masses. Therefore, the algorithm should be improved taking into account the meteorological situation.

Key words: small aircraft; typical detection channel; detection characteristics; maximum detection range