

# Кореляційний пеленгатор малих літальних апаратів

Козеруж С. О., Коржик О. В.

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

E-mail: skzrk@i.ua

Актуальність досліджуваної проблеми обумовлена зростанням кількості малих безпілотних літальних апаратів, які можуть нести загрозу як державним так і приватним інтересам. Застосування радіолокації дозволяє виявити і локалізувати об'єкт на достатній відстані, але пристрої досить дорогі в реалізації. Оптичні засоби мають суттєвий недолік – обмеження відстані спостереження через погодні умови. Акустичні засоби використовують пасивні методи пеленгування, забезпечують скритність спостереження, але мають невелику дальність виявлення. Збільшення відстані виявлення дозволить підвищити ефективність акустичних пеленгаторів. Проаналізувавши опубліковані та власні експериментальні результати дослідження шумових характеристик малих літальних апаратів, була запропонована модель звукового випромінювання - ширококутовий випадковий процес з деяким енергетичним спектром. Враховуючи локальне походження шумового сигналу для виявлення та визначення кутової координати малих літальних апаратів було доцільно використати кореляційний метод пеленгування. Зроблено теоретичне порівняння характеристик виявлення та максимальної відстані виявлення кореляційного пеленгатора та квадратичного детектору. Встановлено, що вииграш корелятора при виявленні слабких шумових сигналів становить приблизно 6 дБ. Такий вииграш дає можливість збільшити максимальну відстань виявлення. Наведено результати натурних експериментів пеленгування квадрокоптеру Phantom 3 standard. Максимальна відстань виявлення кореляційним приймачем була близька до прогнозованої та становила 90 м замість 76 м отриманих квадратичним детектором. Кореляційний приймач має перевагу перед квадратичним завдяки можливості виявлення при меншому рівні прийнятого сигналу, тобто при менших величинах параметра виявлення. Рівень напруги завад на виході кореляційного приймача у відсутності сигналу був на 8 дБ нижчий за їх рівень на виході квадратичного детектору. Ця величина може бути ще більшою за умови збільшення тривалості часу інтегрування і застосування просторової обробки акустичних хвиль. Результати роботи можуть бути використані для прогнозування максимальної відстані виявлення малих безпілотних літальних апаратів і створення акустичних пеленгаторів шумових об'єктів.

*Ключові слова:* малий літальний апарат; кореляційний пеленгатор; характеристики виявлення; максимальна відстань виявлення

DOI: [10.20535/RADAP.2019.79.41-47](https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.79.41-47)

## Вступ

Малі літальні апарати (МЛА) використовуються у різних сферах діяльності суспільства, наприклад для інспекції сільського та лісного господарства, контролю за транспортними потоками, для транспортування невеликих вантажів. МЛА все частіше з'являються поблизу аеропортів, електростанцій, складів, приватних садиб та можуть нести небезпеку як державним, так і приватним інтересам. Виявлення МЛА [1] стає актуальною проблемою для вирішення якої застосовують методи радіолокації, акустичної локації і відеоспостереження. Детектування 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.

МЛА в польоті випромінюють звукові хвилі, характеристики яких залежать від його конструкції, умов та режимів польоту. Акустичні характеристики МЛА з трьома, чотирма та шістьма електромоторами приведені в роботах [2, 3]. У результаті експериментальних досліджень акустичних характеристик квадрокоптеру [4,5] було встановлено ширококутову шумову складову і багатокомпонентну гармонійну структуру випромінювання в діапазоні частот до 10 кГц. Значення амплітуди і фази гармонік змінюються випадково і при відсутності руху квадрокоптера. Це пояснюється розходженням режимів роботи двигунів в процесі компенсації автоматикою МЛА вітрового впливу. Автори запропонували розглядати акустичне випромінювання як ширококутовий випадковий процес з відповідним

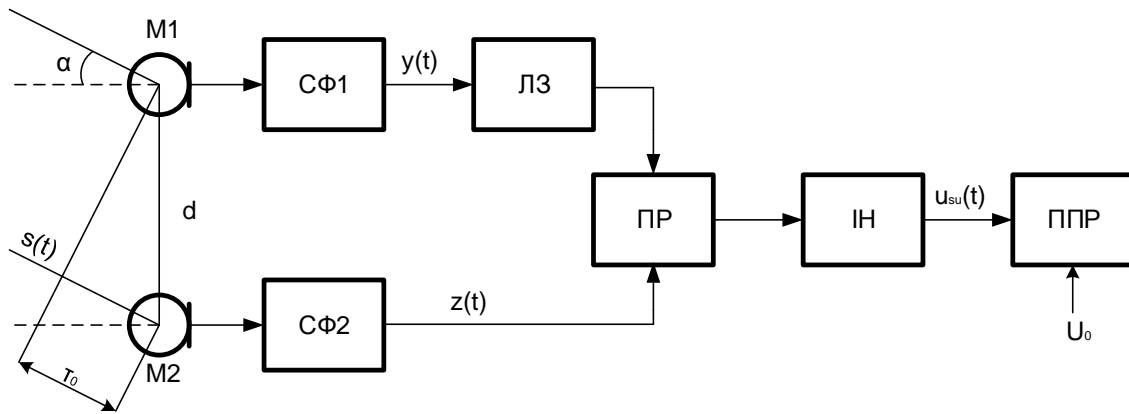


Рис. 1. Схема кореляційного пеленгатора.

енергетичним спектром, а інформаційними параметрами вибрати його спектральні коефіцієнти. В залежності від вибраної моделі шуму випромінювання для детектування МЛА використовують різні способи. Для виявлення застосовують як прості акустичні детектори, так і акустичні мікрофонні системи. У роботі [6] для детектування МЛА запропоновано використати приймач побудований по схемі типового каналу виявлення (ТКВ). Наведені в роботі розрахунки прогнозування максимальної відстані виявлення по заданим характеристикам виявлення та відомим акустичним характеристикам літаючого апарата і заводи дають підставу стверджувати про можливість детектування МЛА на відстані в декілька сотень метрів. Збільшити дальність виявлення та точність локалізації дозволяють мікрофонні масиви, які дають можливість реалізувати алгоритми просторової, часової та частотної обробки сигналів. У роботі [7] для локалізації МЛА використовують мікрофонний масив із чотирьох мікрофонів в формі піраміди. Кутіві координати визначались по часу затримки хвиль прийнятих мікрофонами. Час затримки встановлювався по максимальному значенню взаємної кореляційної функції. Хороші результати пеленгування МЛА, за оцінкою авторів [8], були досягнуті дискретним лінійним масивом з 24 мікрофонів. Алгоритм обробки зводився до синтезування характеристики спрямованості з кутом розкриття  $1^\circ$  та огляду простору в секторі кутів  $\pm 45^\circ$ . 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 ширококутового акустичного випромінювання в діапазоні частот (450-3000) Гц. Цим пояснюється наявність інтерференційних смуг на зображенні траєкторії руху. В роботі [9] представлено результати виявлення одномоторного МЛА, з добре вираженою гармонійною структурою спектра випромінювання. Застосування двох лінійних масивів мікрофонів, 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 смузі частот (100-200) Гц вдалось побудувати зображення траєкторії руху об'єкта з високою кутовою роздільною здатністю і малим спотворенням.

Розробка пристроїв пеленгування МЛА з заданими характеристиками виявлення і прогнозованою відстанню виявлення представляє практичний інтерес.

## 1 Застосування кореляційного методу пеленгування

Проведені в роботах [2-5] дослідження акустичних сигнатур МЛА дають можливість розглядати звукове випромінювання як ширококутовий випадковий процес з деяким енергетичним спектром. Враховуючи локальне походження шумового сигналу МЛА розглянемо задачу пеленгування, а саме:

- детектування сигналу у прийнятій акустичній хвилі з заданими ймовірностями виявлення і хибної тривоги;
- розрахунок кута приходу хвиль (КПХ) випромінювання МЛА.

Для вирішення задачі детектування МЛА можна скористатись типовим каналом виявлення (ТКВ). Але ТКВ [6] має незначну відстань виявлення і не дає можливості визначити КПХ випромінювання. В атмосферній акустиці [10] отримання інформації про присутність об'єкта випромінювання ведеться по прийнятим звуковим хвилям з використанням просторової, часової та спектральної обробки. Для вирішення поставленої задачі двома мікрофонами застосуємо кореляційний метод пеленгування.

Нехай на входи мікрофонів (рис. 1), розташованих на відстані  $d$  один від одного, під кутом  $\alpha$  падає акустична плоска хвиля  $s(t)$ . У зоні розташування мікрофонів діють акустичні завади  $n(t), m(t)$ . Завади відносяться до стаціонарних ізотропних процесів

з нульовим математичним очікуванням. Шумовий сигнал, що випромінюється МЛА, розглядається як стаціонарний анізотропний процес з нульовим математичним очікуванням і дисперсією  $\sigma_s^2$ . Шумовий сигнал і завади статистично незалежні. Прийняті мікрофонами хвилі  $y(t), z(t)$  є випадковими процесами записаними у вигляді:

$$\begin{aligned} y(t) &= s(t) + n(t), \\ z(t) &= s(t - \tau_0) + m(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Відносна часова затримка  $\tau_0$  визначається по максимуму взаємної кореляційної функції (ВКФ)  $R_{yz}(\tau)$  між прийнятими хвилями (1) на деякому часовому проміжку спостереження  $T$ :

$$\begin{aligned} R_{yz}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T [s(t) + n(t)][s(t - \tau_0 + \tau) + m(t + \tau)] dt = \\ &= R_{ss}(\tau - \tau_0) + R_{sm}(\tau) + R_{ns}(\tau - \tau_0) + R_{nm}(\tau), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $R_{ss}(\tau - \tau_0)$  – кореляційна функція (КФ) вхідного сигналу із затримкою  $\tau_0$ ;  $R_{sm}(\tau), R_{ns}(\tau - \tau_0), R_{nm}(\tau)$  – ВКФ процесів, які діють на входи приймачів, наближаються до нуля із збільшенням часу спостереження  $T$ . КФ шумового сигналу визначається співвідношенням:

$$R_{ss}(\tau - \tau_0) = \sigma_s^2 \frac{\sin(2\pi\Delta f(\tau - \tau_0))}{2\pi\Delta f(\tau - \tau_0)} \cos(2\pi f_0(\tau - \tau_0)), \quad (3)$$

де  $\sigma_s^2 = N_s \Delta f$ ;  $N_s$  – спектральна густина потужності шумового сигналу;  $f_0, \Delta f$  – центральна частота та ефективна смуга спектру випромінювання.

Реалізацію алгоритму кореляційної обробки (2) забезпечує кореляційний пеленгатор (КП), побудований за схемою, зображеною на рис. 1. Прийняті мікрофонами (М1, М2) звукові коливання трансформуються в електричні, проходять через смугові фільтри (СФ1, СФ2) налаштовані на смугу частот випромінювання МЛА. На виході СФ електричні коливання  $y(t), z(t)$  можна розглядати як стаціонарні нормальні процеси з нульовим математичним очікуванням і дисперсіями:  $\sigma_n^2 = \sigma_m^2, \sigma_s^2, \sigma_{sn}^2 = \sigma_{sm}^2$  – завад, сигналу та суміші відповідно. Один із процесів, пройшовши по ланцюгу затримки (ЛЗ), подається на вхід перемножувача (ПР). На інший вхід перемножувача надходить другий процес. Результат перемноження надходить в інтегратор (ІН). На виході останнього формуються низькочастотні напруги  $u_n(T), u_{sn}(T)$  для ситуацій відсутності та наявності сигналу на вході приймача відповідно. Прийняття рішення про присутність сигналу 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 середньоквадратичному значенню  $U_\sigma$  напруги  $u_{sn}(t)$  на виході інтегратора:

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

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

Змінюючи час затримки в ЛЗ знаходять максимум вихідної напруги  $u_{sn}(t)$ , визначають  $\tau_0$  і розраховують КПХ:

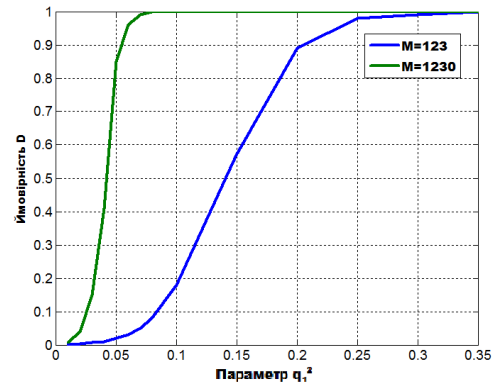
$$\alpha = \arcsin \frac{\tau_0 c}{d}, \quad (4)$$

де  $c$  – швидкість звуку у повітрі.

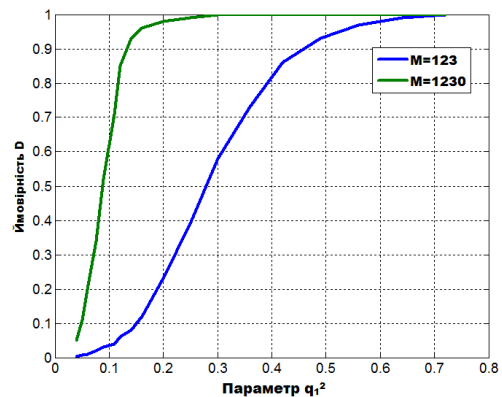
Ймовірність виявлення  $D$  для КП розраховують як функцію відношення дисперсії сигналу до дисперсії завади  $q_1^2 = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_m^2}$  на виході СФ із смугою частот пропускання рівною ефективній смузі сигналу. Skorистаємось для розрахунку  $D$  виразом отриманим в [11]:

$$D = \Phi\left(\frac{2q_1^2 \sqrt{\Delta f T}}{\sqrt{1 + 2q_1^4}} - \frac{\Phi^{-1}(1 - F)}{\sqrt{1 + 2q_1^4}}\right). \quad (5)$$

По (5) були розраховані характеристики виявлення (ХВ) КП для сигналу випромінювання МЛА з характеристиками взятими з роботи [6], а саме: ефективна смуга частот випромінювання  $\Delta f = 1230$  Гц в діапазоні (170–1400) Гц. Параметри налаштування приймачів  $M = \Delta f T$ : смуга частот СФ  $\Delta f = 1230$  Гц; час інтегрування  $T = 0.1$  с та 1 с. На рис. 2 приведено графіки ХВ приймачів побудованих по схемі КП і квадратичного детектора (КД) [6] для заданої ймовірності хибної тривоги  $F = 10^{-3}$ .



(а)



(б)

Рис. 2. Характеристики виявлення приймачів: а) кореляційний пеленгатор; б) квадратичний детектор.

Порівнюючи ХВ для КП і КД можна оцінити вигравш корелятора при виявленні слабких шумових сигналів приблизно в 6 дБ. Такий вигравш дає можливість збільшити максимальну відстань виявлення (МВВ). Наведена в [6] оцінка МВВ квадратичним детектором з заданими ймовірностями  $D = 0.90$  і  $F = 10^{-3}$ , параметром виявлення (ПВ)  $q^2 = q_1^2 = 0.13$  та різницею рівнів випромінювання і завади  $L = 26$  дБ, становила приблизно 60 м. Застосування КП з тими ж ХВ, характеристиками випромінювача і завад дає можливість отримати  $q_1^2 = 0.06$ . При цьому МВВ зростає до 80 м.

Правило прийняття рішення візьмемо з [6]:

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

розуміючи під  $U_n(T)$  напругу на виході інтегратора за відсутності сигналу.

## 2 Експеримент

Був проведений натурний експеримент по визначенню максимальної дальності виявлення квадрокоптеру Phantom 3 standard [12] КД та КП з однаковими налаштуваннями. Випробування проводились в полі, в теплу вологу погоду з температурою повітря  $20^\circ\text{C}$ . Відчувались пориви вітру, шуми дерев та рух транспорту по автомагістралі на відстані приблизно 1 км.

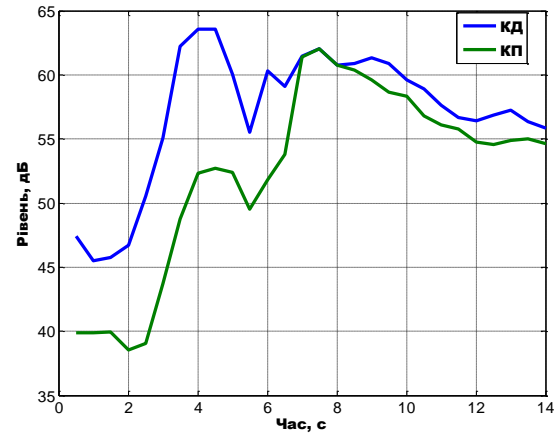
Вимірювальний комплекс мав два мікрофони, звукову карту та ПК. Мікрофони були встановлені на висоті 1.5 м над землею покритою травою. Акустична база становила 2 м. Перед проведенням експерименту приймальні канали були калібровані еталонним джерелом звуку. Звукова карта дозволяла вести запис із частотою дискретизації 48 кГц аудіо файлів з двох мікрофонів на ПК.

Експеримент проводився в декілька етапів. На першому вівся запис акустичних завад. На другому записувались сумарні шуми квадрокоптеру і завад в режимі зльоту та зависання над мікрофонами. Треба зауважити, що квадрокоптер рискав у вертикальному та горизонтальному напрямку від заданого положення під впливом вітру. При цьому були чутні зміни режиму роботи електричних двигунів. У подальшому проводились записи різних режимів польоту квадрокоптеру.

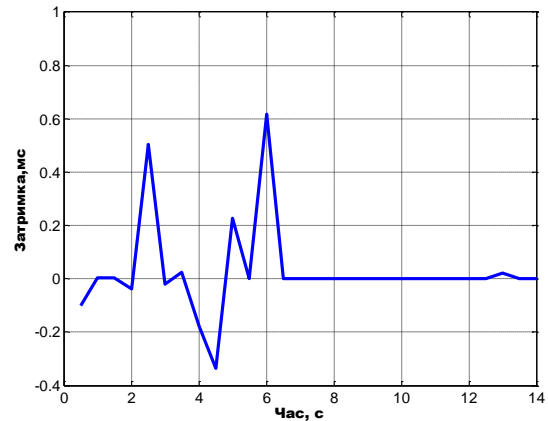
Обробка записів аудіо файлів була реалізована на ПК із застосуванням бібліотеки програм МАТЛАВ. Запис розбивався на окремі сегменти тривалістю 1 с, з перекриттям в 0.5 с, які в подальшому оброблялись алгоритмами КД і КП. Результати розрахунків рівня звукового тиску виводились у вигляді графіків.

На рис. 3 наведені криві рівня звукового тиску та відносної часової затримки  $\tau_0$  в режимі тиші (0–2.5) с, зльоту (2.5–7) с та зависання квадрокоптеру на відстані приблизно  $r_s = 6$  м по нормалі до бази

мікрофонів. Середнє значення рівня випромінювання квадрокоптеру в режимі зависання визначено по кривій КП (рис. 3,а) і становило приблизно  $L_s = 58$  дБ. Розрахований по записам акустичних шумів середній рівень завад в смузі випромінювання був  $L_n = 46$  дБ. Часова затримка (рис. 3,б) змінювалась під час зльоту і стабілізувалась в режимі зависання. Пеленг розрахований по (4) близький до  $\alpha = 0^\circ$ , що відповідав режиму зависання МЛА.



(а)



(б)

Рис. 3. Режим зльоту та зависання квадрокоптеру: а) оцінка рівня звуку на виході каналів обробки КД і КП; б) відносна часова затримка.

По отриманим експериментально рівням випромінювання  $L_s$  і завад  $L_n$ , заданим ймовірностям  $D = 0.90$  і  $F = 10^{-3}$  та знайденим ПВ (рис. 2 а,б)  $q_1^2 = 0.13$  і  $q_1^2 = 0.06$  була розрахована МВВ [6] квадрокоптеру приймачами КД і КП:

$$r = \frac{10^{0.05(L_s - L_n)}}{\sqrt{q_1^2}} r_s.$$

Прогноз МВВ квадрокоптеру приймачами КД і КП становив 67 м і 98 м відповідно.

Правильність прогнозу було перевірено по результатам обробки записів польоту МЛА. Квадрокоптер летів на мікрофони орієнтуючись по норма-

лі до акустичної бази. Горизонтальна відстань до місця старту була визначена вимірювальною рулеткою і становила 100 м, висота польоту визначалась навігаційним приладом квадрокоптеру і становила приблизно 30 м. Горизонтальна швидкість руху підтримувалась по можливості постійною, близько 3 м/с.

Обробка результатів велась по алгоритму, застосованому для записів зльоту і зависання квадрокоптеру. Результати розрахунків рівня звукового тиску – криві проходу, виводились у вигляді графіків. Момент виявлення визначався часом, для якого виконувалось правило виявлення. Горизонтальна відстань виявлення оцінювалась як різниця між початковою та пройденою. Пройдена відстань дорівнювала горизонтальній швидкості помноженій на тривалість польоту до прийняття рішення про виявлення. Крім того аудіо записи прослуховувались і давалась суб'єктивна оцінка виявлення.

### 3 Обговорення

Графіки результатів розрахунку рівня звуку на виході каналів обробки КД і КП, по мірі наближення квадрокоптеру, наведено на рис. 4. По осі ординат відкладено оцінку рівня звуку, а по осі абсцис – час польоту.

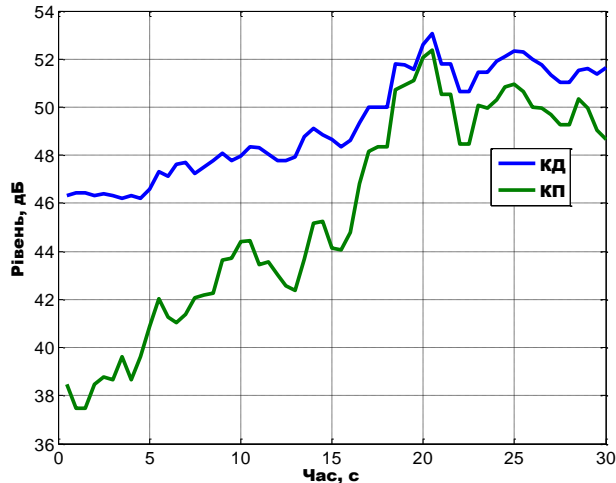


Рис. 4. Оціночна крива рівня звуку на виході каналів обробки КД і КП по мірі наближення квадрокоптеру.

Нерівномірне наростання рівня звуку пояснюється нестабільністю випромінювання квадрокоптеру під дією поривів вітру та флуктуацією акустичних завад. Правило виявлення встановимо виходячи з умови надійного фіксування виявлення, а саме перевищення рівня завад на виході інтеграторів на 2 дБ. Момент виявлення (рис. 4) становив 5 с і 10 с для КП і КД відповідно. Горизонтальна відстань виявлення оцінювалась відповідно в 85 м і 70 м. МВВ квадрокоптеру для КП і КД, розрахована із гео-

метричних міркувань, дорівнювала приблизно 90 м і 76 м. Треба зауважити, що прослуховування записів встановило присутність квадрокоптера на 5 с польоту.

Прогнозовані МВВ не співпадають з експериментальними. Частково це пояснюється відмінністю прийнятих в розрахунках і аналізі результатів значень параметра виявлення  $q_1^2$ , частково не стаціонарністю акустичних процесів в експерименті.

### Висновки

1. Для виявлення малих літальних апаратів по акустичному випромінюванню використано кореляційний пеленгатор. Наведено алгоритм розрахунку ХВ шумового сигналу КП в залежності від параметрів налаштування приймача. Для прикладу наведено графіки ХВ для наперед заданої ймовірності хибної тривоги  $F = 10^{-3}$  та двох налаштувань КП.

2. Проведено теоретичне порівняння характеристик КД і КП. Встановлено вигреш КП при виявленні слабких шумових сигналів приблизно в 6 дБ, який приводить до збільшення МВВ.

3. Експериментальні дослідження пеленгування квадрокоптеру типу Phantom 3 standard кореляційним приймачем підтвердили теоретичний прогноз. МВВ КП становила 90 м замість 76 м, отриманої КД. КП має перевагу завдяки можливості виявлення при меншому рівні прийнятого сигналу, тобто при менших величинах ПВ.

4. Рівень напруги завад на виході КП у відсутності сигналу на 8 дБ нижчий за рівень на виході КД. Ця величина може бути ще більшою за умови збільшення часу інтегрування і введення просторової обробки акустичних хвиль.

5. КП дає можливість визначити кут приходу хвилі як в горизонтальній так і вертикальній площині. У межах експерименту було визначено, КПХ в режимі зависання на відстані 6 м по нормалі до акустичної бази. Розрахований КПХ був близький до  $0^\circ$  та відповідав режиму зависання МЛА.

6. Відсутність необхідного обладнання для відслідковування траєкторії польоту МЛА не дала можливості встановити точно МВВ і КПХ. Тому отримані експериментальні результати треба розглядати як наближені.

### Перелік посилань

1. DroneLabs. Available at: <http://www.drone-detector.com>
2. Cabell R. Measured Noise from Small Unmanned Aerial Vehicles / R. Cabell, R. M. Swain. NoiseCon16, Providence, Rhode Island, 871 p. Available at: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/ince/incep/2016/00000252/00000002/art00041#expand/collapse>

3. Sadasivan S. Acoustic Signature of an Unmanned Air Vehicle – Exploitation for Aircraft Localisation and Parameter Estimation / S.Sadasivan, M.Gurubasavaraj, S. RaviSekar // *Eronautical DEF SCI J.* – 2001. – Vol 51, No 3. – p. 279-283.
4. Карташов В. М. Информационные характеристики звукового излучения малых беспилотных летательных аппаратов / В. М. Карташов, В. Н. Олейников, С. А. Шейко, С. И. Бабкин, И. В. Корытцев, О. В. Зубков, М. А. Анохин // *Радиотехника.* - 2017. - Вып. 191. - С. 181-187.
5. Massey K. Noise measurements of tactical UAVs // 16th AIAA/CEAS aeroacoustics conference. - p. 391.
6. Козерук С.О. Выявления малых летательных аппаратов за акустичним випромінюванням / С.О. Козерук, О.В. Коржик // *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радиотехніка, Радіоапаратобудування.* – 2019. – №. 76. – С. 15-20.
7. Finn A. Acoustic Sense & Avoid for UAV's / A. Finn, S. Franklin, // 2011 Seventh International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing. - 2011. - pp. 586-589.
8. Case E. E. Low-cost acoustic array for small UAV detection and tracking / E. E. Case, A. M. Zelnio, B. D. Rigling // *Aerospace and Electronics Conference.* - 2008. - Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4806528>
9. Pham T. Acoustic detection and tracking of small low-flying threataircraft / T. Pham, L. Sim, // 23rd Army Science Conference. - 2002.
10. Damarla T. Battlefield Acoustics / T. Damarla // Springer International Publishing – 2015. – 262p.
11. Ольшевский В.В. Статистические методы в гидролокации / В.В. Ольшевский. - Л. : Судостроение, 1973. - 184 с.
12. Phantom 3 standard. Available at: <https://www.dji.com/phantom-3-standard/info/>
- 6] Kozeruk S. O. and Korzyk O. V. (2019) Detection Small Aircraft by Acoustic Radiation, *Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaпаратobuduvannia*, Iss. 76, pp. 15-20. DOI: 10.20535/RADAP.2019.76.15-20
- 7] Finn A. and Franklin S. (2011) Acoustic sense. *2011 Seventh International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing.* DOI: 10.1109/issnip.2011.6146555
- 8] 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
- 9] Pham T. and Sim L. (2002) *Acoustic Data Collection of Tactical Unmanned Air Vehicles (TUAVs).* DOI: 10.21236/ada410088
- 10] Damarla T. (2015) *Battlefield Acoustics.* DOI: 10.1007/978-3-319-16036-8
- 11] Olshevskiy V.V. (1973) *Statisticheskie metody v gidrolokatsii* [Statistical methods in sonar]. Leningrad, Sudostroenie, 184 p.
- 12] Phantom 3 standard. Available at: <https://www.dji.com/phantom-3-standard/info/>

## References

- [1] DroneLabs. Available at: <http://www.drone-detector.com>
- [2] Cabell R. and Swain R. M. (2016) Measured Noise from Small Unmanned Aerial Vehicles, *NoiseCon16*, Providence, Rhode Island, 871 p.
- [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., Oleynikov V. N., Sheyko S. A., Babkin S. I., Koryttsev I. V., Zubkov O. V. and Anokhin M. A. (2017) Informatsionnye kharakteristiki zvukovogo izlucheniya malykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Information Characteristics of the Sound Emission of Small Unmanned Aerial Vehicles]. *Radiotekhnika*, Iss. 191, pp. 181-187.
- [5] Massey K. and Gaeta R. (2010) Noise Measurements of Tactical UAVs. *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference.* DOI: 10.2514/6.2010-3911

## Корреляционный пеленгатор малых летательных аппаратов

Козерук С. А., Коржик А. В.

**Введение.** Малые летательные аппараты (МЛА) используются в различных сферах деятельности общества, например для инспекции сельского и лесного хозяйства, контроля за транспортными потоками, для транспортировки небольших грузов. МЛА все чаще появляются вблизи аэропортов, электростанций, складов, частных усадеб и могут представлять опасность как государственным, так и частным интересам. Обнаружение МЛА становится актуальной проблемой. Разработка устройств пеленгования МЛА с заданными характеристиками обнаружения и прогнозируемым расстоянием обнаружения представляет практический интерес.

**Теоретические результаты.** Для обнаружения МЛА предлагается использовать метод корреляционного пеленгования. Акустическое излучение рассматривается как локализованный широкополосный шумовой процесс. Помеха – акустический шум в районе применения средства обнаружения, рассматривается как изотропный нормальный процесс. Приведено сравнение характеристик обнаружения (ХО) для корреляционного пеленгатора (КП) и квадратичного детектора (КД). Рассчитанные параметры обнаружения (ПО) демонстрируют преимущество КП по обнаружению сигнала в 6 дБ, что приводит к увеличению дальности обнаружения МЛА.

**Выводы.** Для обнаружения МЛА по акустическому излучению использован корреляционный пеленгатор. Приведен алгоритм расчета ХО шумового сигнала КП в зависимости от параметров настройки приемника. Дано теоретическое сравнение характеристик обнаружения КД и КП. Установлен выигрыш КП при выявлении слабых шумовых сигналов примерно в 6 дБ, что приводит к увеличению дальности обнаружения. Экспериментальные исследования пеленгования квадрокоптера Phantom 3 standard корреляционным приемником

подтвердили теоретический прогноз. КП имеет преимущество по дальности обнаружения благодаря меньшему уровню принятого сигнала при тех же уровнях помехи.

*Ключевые слова:* малый летательный аппарат; корреляционный пеленгатор; характеристики обнаружения; максимальная дальность обнаружения

## Correlation direction finder for small aircraft

*Kozeruk S. O., Korzhyk O. V.*

**Introduction.** Small aircraft (SA), or drones, are used in various areas of society, for example, to inspect agriculture and forestry, monitor traffic, and transport small loads. SA are increasingly appearing near airports, power stations, warehouses, and private estates, and may pose a danger to both public and private interests. Detection of SA becomes an urgent problem. The development of SA direction finding devices with given detection characteristics and the predicted detection distance is of practical interest.

**Theoretical results.** For the detection of SA is proposed to use the method of correlation direction finding. Acoustic radiation of a drone is considered as a

localized broadband noise process. Interference - acoustic noise in the area of application of the detection means is considered as an isotropic normal process. A comparison of detection characteristics (DC) for the correlation direction finder (CDF) and quadratic detector (QD) is given. The calculated detection parameters demonstrate the advantage of the CDF in signal detection of 6 dB, which leads to an increase in the detection range of the SA.

**Conclusions.** For the detection of drones using acoustic radiation, a correlation direction finder was used. The algorithm for calculating the characteristics of the detection of the noise signal by a correlation direction finder depending on the receiver settings is given. A theoretical comparison of the characteristics of the CDF and QD is given. The gain of the correlation direction finder is established when detecting weak noise signals of approximately 6 dB, which leads to an increase in the detection range. Experimental studies of the direction finding quadcopter Phantom 3 standard correlation receiver confirmed the theoretical prediction.

*Key words:* small aircraft; correlation direction finder; detection characteristics; maximum detection range