

DOI: 10.18372/2310-5461.57.17442

УДК 681.884

А. В. Козак, аспірант PhD
НТУУ «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»
orcid.org/0000-0002-4756-7931
e-mail: andrekaka1996@gmail.com;

О. В. Коржик, д-р техн. наук, професор
НТУУ «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»
orcid.org/0000-0001-6793-1676
e-mail: ov.korjik@aae.kpi.ua

МЕТОД ВЗАЄМНИХ СПЕКТРІВ В ЗАДАЧАХ ШУМОПЕЛЕНГУВАННЯ БПЛА

Вступ

У зв'язку зі зростаючими вимогами до систем повітряного спостереження та розвідки, а також можливість використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) широкими верствами населення та їх загальнодоступність сьогодні [1], це змінює систему охорони та безпеки будь-якого об'єкта. Крім того, що через необхідності вдосконалення існуючого парку БПЛА в частині зменшення радіолокаційної та акустичної помітності, зростає й потреба у розробці систем акустичного шумопеленгування малих літальних апаратів, так і окремих трактів боротьби з БПЛА.

В даний час, існують різні методи та системи виявлення БПЛА [1-10], але найбільш ефективними є мультисенсорні системи, тобто такі, що використовують акустичні, оптичні та радіолокаційні методи виявлення. Одним з можливих акустичних методів виявлення, є створення пристроїв шумопеленгування, що застосовують низькочастотний аналіз з використанням взаємних спектрів. Також виникає необхідність визначення прогнозованої дальності виявлення, що включатиме геометричну та енергетичну дальності.

Крім того, цікавим аспектом є використання не лише традиційного інструментарію, але й оригінальних, комбінованих пристроїв для виявлення БПЛА, а також створення віртуальних інструментів для пеленгування та виявлення, що можливо за допомогою лабораторного пакета програм, таких як LabView та Matlab [9,10].

Постановка завдання на дослідження

Фізичні поля, що можуть бути зареєстровані пристроєм виявлення БПЛА є дуже різноманітними: електромагнітні, оптичні та акустичні. В свою чергу акустичне поле характеризується низкою шумоподібних сигналів, які можуть бути розцінені як корисні та завади. До того ж широ-

кий парк БПЛА не завжди піддається виявленню. Тому хотілося б отримати такий акустичний пристрій, що міг би забезпечити мінливість сигналу з плином часу.

Мінливість сигналу з плином часу може бути взята за основу, як поява шумоподібного сигналу, при якому змінюється потужність акустичного поля або інтенсивність, що фіксується пристроєм виявлення. Крім того, до властивостей акустичного поля відносяться і просторова вибірковість – направленість приходу корисного сигналу. Також існують спектральні особливості, через те, що сигнал який ми розглядаємо є ширококутовим. Тому для збільшення надійності рекомендується паралельне використання декількох трактів виявлення, а саме: за потужністю (інтенсивність, за період спостереження), вузькосмуговим та взаємним спектром

Найбільш достовірним є сукупність ознак виявлення пов'язаних з просторовою вибірковістю та спектральними характеристиками [11]. Найменш стійким до зовнішніх завад та найменш помітним є короткотривале і монотонне збільшення потужності або інтенсивності. У зв'язку з цим, є доцільним розглядати пристрій, в якому реалізовані принципи паралельного і послідовного спектрального аналізу. Розрахунки дальності дії пристроїв мають виконуватись відповідно до основного рівня акустичної локації з подальшим корегуванням енергетичної дальності дії з особливостями атмосферного розподілення швидкості звуку. Отже, вище наведені положення і загальний стан розробок пристроїв шумопеленгування БПЛА вказують на те, що запропонована робота є корисною та актуальною в широкому діапазоні застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Актуальність теми виявлення БПЛА спонукає багатьох науковців працювати у даному напрямку.

В роботі [1] було визначено, що виявлення БПЛА є складною проблемою, яку неможливо вирішити одним методом виявлення для всіх потенційних цілей. Класифікація БПЛА, зокрема в умовах фонових завад (наприклад, в міських умовах) або інших не загрозливих цілей (наприклад, птахів), малодосліджена. Кожен з запропонованих (радіолокаційний, радіочастотний, оптичний, акустичний) методів має як переваги, так і недоліки. Наприклад акустичний метод виявлення серед недоліків має відносно не велику дальність локалізації, та залежить від рівня навколишніх акустичних завад, хоча при цьому є недорогим і відносно простим у впровадженні.

У роботі [2] при створенні акустичної системи Stevens DADS було застосовано фазові перетворення Steered-Response (SRP-PHAT), що використовувалося для визначення напрямків. Цей метод заснований на розрахунку з подальшим складанням вихідних даних GCC-PHAT (узагальнене крос-кореляційне фазове перетворення). Це еквівалентно знаходження керованої потужності відгуку (SRP) у широкій смузі традиційного формувача променя з фільтрами та суматорами. В результаті натурних експериментів було виявлено та знайдено напрямком на БПЛА Phantom 4 до 350 м із середньою точністю 4 градуси. Показано можливість відстеження маневруючого БПЛА з використанням декількох компактних акустичних вузлів. Також було продемонстровано метод тестування акустичних систем за допомогою випромінювання імітованих звуків БПЛА, що не потребує практичних польотів. Такий метод є швидким та економічним способом для вимірювання параметрів акустичної системи, який може бути застосований як для експериментальних, так і для сторонніх систем.

У роботі [3–5] були проведено лабораторні дослідження шумових характеристик різних БПЛА. Вимірювання акустичних характеристик відбувалися як в режимі зависання, так і в умовах статичної тяги. Аналіз даних заснований на компактному формулюванні рівняння The Ffowcs Williams–Hawkings (FW–H) та простої моделі для широко-смугового шуму. FW–H широко використовувалося для моделювання генерації звуку рухомими поверхнями, включаючи шум гвинтів літаків, роторів вертольотів і турбомашин.

У роботах [6–8] представлено алгоритм розрахунку максимальної дальності виявлення БПЛА. Приведено порівняння характеристик виявлення для кореляційного пеленгатора і квадратного детектора. Здійснено експериментальні дослідження пеленгування квадрокоптера Phantom 3 standard кореляційним приймачем. В

свою чергу у роботах [9–10] було розроблено вдосконалену систему шумопеленгування БПЛА, що може бути застосована у складі мультисенсорного комплексу виявлення БПЛА. В створеному пристрою виявлення є можливість відображати та аналізувати спектральні характеристики та інтенсивність шумового поля об'єкта і поля оточуючих шумів в програмному середовищі LabView. Також було представлено поетапний розрахунок енергетичної дальності та відмакетовано мультикомпонентну векторну акустичну антену, яка дозволяє ефективно працювати з приймачами різних типів, включаючи комбіновані та приймачі тиску. Було проведено експериментами з використанням БПЛА квадрокоптерного типу в лабораторних та натурних умовах.

Мета статті – поширення методів виявлення БПЛА з використанням засобів спектрального аналізу в умовах ширококугових завад і сигналів. А наукова новизна запропонованої роботи полягає в використанні методології акустичної локації на задачі шумопеленгування БПЛА в умовах ізотропних та анізотропних акустичних завад.

Викладення основного матеріалу

Моделі акустичних сигналів та завад

В задачах акустичної локації найчастіше використовують три моделі сигналів:

- сигнал з відомими параметрами;
- сигнал з фіксованою амплітудою та випадковою початковою фазою;
- сигнал з випадковою початковою фазою та флюктуючою амплітудою.

Скористаємось спрощеною моделлю шумоподібного сигналу, та вважаємо поле, що утворено в робочому просторі – ізотропним, а шумове поле, що утворюється носієм або іншими локалізованими джерелами – анізотропним. Для аналізу результатів визначення просторово-енергетичних характеристик акустичного поля (наприклад дальності дії) застосовується залежність імовірнісних ситуацій, а точніше розрахункових і заданих імовірностей [11, 12]. Заданими імовірностями характеристиками вважаємо імовірність правильного виявлення та імовірність хибної тривоги записаних з урахуванням критерію Неймана -Пірсона (див табл. 1).

Таблиця 1

Простір рішень та відповідних умовних ймовірностей

Рішення	Сигнал	
	Є	Немає
Так	Правильне виявлення $D_1(C_{11})$	Хибна тривога $F_1(C_{10})$
Ні	Пропуск сигналу $\bar{D}_1(C_{01})$	Правильне НЕ виявлення $\bar{F}_1(C_{00})$

У табл. 1 у кожній із чотирьох можливих ситуацій ставиться у відповідність міра ймовірнісної оцінки можливості їх появи. Кожна з ймовірностей D_1 ; $\bar{D}_1 = 1 - D_1$; F_1 ; $\bar{F}_1 = 1 - F_1$ є умовною ймовірністю.

Завдяки представленню акустичного поля шумів як ізотропним, це дає можливість вважати пошкодостійкість утвореної прийомної системи, як таку, що в розрахунковій ситуації відповідає коефіцієнту осьової концентрації. Поле акустичних шумів складається з шумів оточуючого середовища, вітрових чинників, температурних градієнтів, характеристики яких наведені в [19]. Акустичні шуми можуть бути стаціонарні або нестаціонарні [13]. Відсутність зв'язку може мати місце у тому випадку коли щільність ймовірності одного випадкового процесу не залежить від того яке значення прийме інший випадковий процес.

Використання взаємного спектру

У цьому розділі статті буде розглянуто використання методу взаємних спектрів для виявлення БПЛА. В основі лежить інтегральне подання теореми Вінера-Хінчина (1), за якою визначаються потужнісні характеристики дискретних компонентів. Цей підхід дає можливість переходити з часової області до частотної та навпаки. Одним зі способів виявлення БПЛА є порівняння кореляційної функції завади та кореляційної функції детермінованого сигналу [7, 12].

$$R_{12}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X_{12}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega. \quad (1)$$

Коли ми порівнюємо два сигнали, ми можемо використовувати взаємну кореляційну функцію (2), щоб знайти їх взаємний спектр. Взаємний спектр $X_{12}(\omega)$ – це взаємна спектральна густина потужності сигналів $x_1(t)$ та $x_2(t)$. Щоб знайти взаємний спектр, ми використовуємо перетворення Фур'є (3). Взаємний спектр (ВС) двох сигналів можна отримати, перемноживши спектр одного сигналу $X_1(\omega)$ на комплексно спряжену $X_2^*(\omega)$ величину спектра іншого (4). Якщо спектри двох сигналів не перекриваються, то їх взаємний спектр рівний нулю, що означає, що взаємна кореляційна функція також рівна нулю, тобто такі сигнали є некорельованими. Ми також можемо знайти енергетичний спектр одного сигналу (5), використовуючи його взаємний спектр [10, 13].

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t) \cdot x_2(t - \tau) dt; \quad (2)$$

$$X_{12}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{12}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau; \quad (3)$$

$$X_{12}(\omega) = X_1(\omega) X_2^*(\omega); \quad (4)$$

$$X_1(\omega) X_1^*(\omega) = |X_1(\omega)|^2. \quad (5)$$

Тракт спектрального аналізу є одним з трактів виявлення у складі пристрою виявлення та пеленгування БПЛА. В результаті експериментів в натурних і лабораторних умовах [9, 10] було визначено, що з виявлення за інтенсивністю, взаємним та вузькосмуговим спектром, найефективнішим та найпоказовішим є саме виявлення з використанням взаємного спектра.

Послідовність роботи даного тракту наступна: з приймача тиску сигнал поступає на широко-смуговий фільтр з заданою смугою частот, після чого подається у блок FFT послідовного типу, останнім кроком, сигнал відображається на блоці індикації, для візуального спостереження взаємного спектру. Кількість необхідних елементів антенного пристрою обумовлена вимогами технічного завдання на акустичні антени інтерференційного типу, у випадку пристрою виявлення мінімум два елементи, а для сумісної роботи з пристроєм пеленгування необхідна кількість – п'ять.

На рис. 1 зображений результат роботи програми виявлення та пеленгування під час натурального експерименту з використанням саморобного чотирьох гвинтового квадрокоптера з довжиною гвинта 46 см, типовою конструкцією та двигунами Rctimer 5010/14 360KV. Технічні характеристики подібного дрону описані в роботах [14, 15]. Було використано антенний комплекс з 5 мікрофонів, звукову карту та ПК. Квадрокоптер був встановлений на відхиленні у 145 градусів від акустичної вісі, на відстані 5 м. Мікрофони були встановлені на висоті 2 м над асфальтом. Антенна база становила 0,5 м. Вимірювання відбувалися відповідно до вимог [16, 17]. Була зафіксована характерну частоту квадрокоптера в 301 Гц. Отримана дискретна компонента показує, що виявлення БПЛА надійне, за показниками звукоряду.

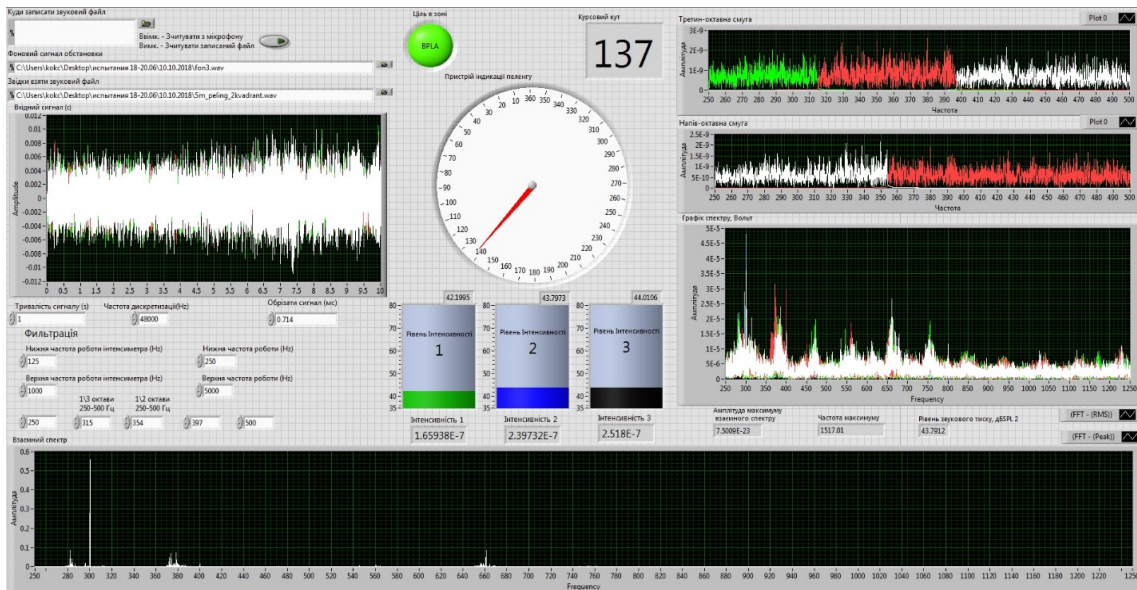


Рис. 1. Результат роботи програми виявлення та пеленгування під час натурального експерименту з саморобним квадрокоптером

На рис. 2 зображено результат роботи програми виявлення та пеленгування, де під час натурального експерименту використано квадрокоптер Phantom 3 standard [18]. Вимірювання проводилися за межами міста, в полі. Вимірвальний комплекс складався з двох мікрофонів, звукової карти та комп'ютера. Мікрофони були

розташовані на висоті 1,5 метра над землею, яка була вкрита травою. Акустична база становила 2 метри. Робота програми відбувалася при відстані до квадрокоптера 150 м і висотою над землею в 10 м. Політ відбувався по осі до акустичної бази. В результаті отримано характерну частоту квадрокоптера в 394 Гц.

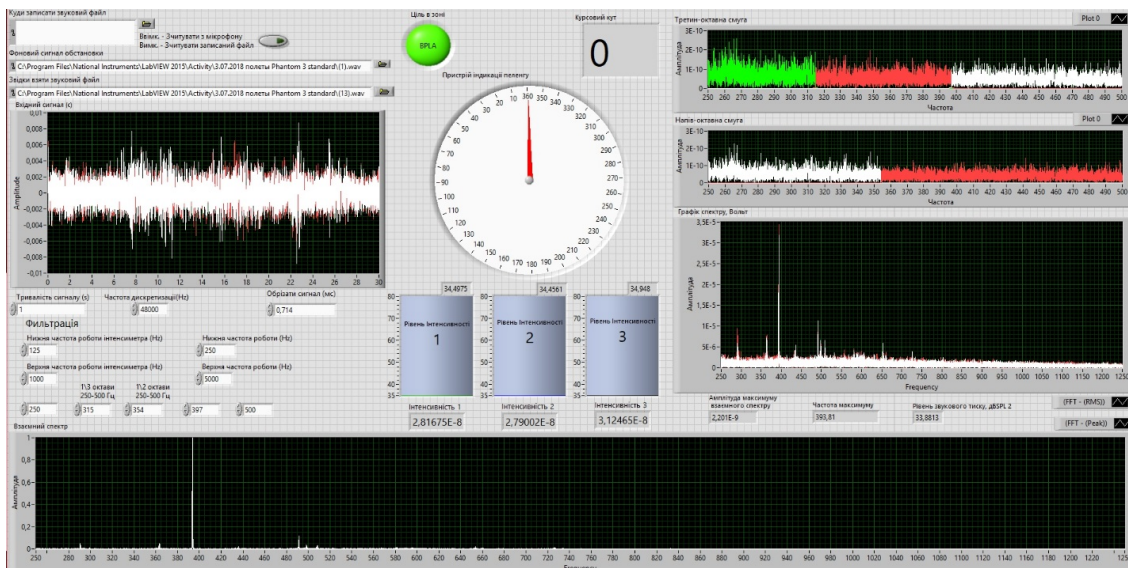


Рис. 2 Результат роботи програми виявлення та пеленгування під час натурального експерименту з квадрокоптером Phantom 3 standard

У обох експериментах, характерні частоти квадрокоптерів були зафіксовані на двох з трьох трактів виявлення, саме тому використовуються три різних за фізикою тракти, кожен з яких базується на реєстрації особливостей акустичного поля. Ці дублюючі принципи виявлення покращують ефективність та надійність роботи пристрою. Хочеться зазначити, що відношення

сигнал-завада є кращим саме при використанні взаємного спектру.

Розрахунок дальності дії

У акустиці при збільшенні дистанції від об'єкта енергія сигналу зменшується і падає якість виявлення. Відбувається це внаслідок розширення хвильового фронту та втрат, зумовле-

них згасанням звуку у середовищі. Максимальне значення дистанції, коли якість виявлення знижується до допустимого рівня, називається енергетичною дальністю дії.

При рефракції звукових променів у повітрі вводиться також поняття геометричної дальності дії, що визначається межею зон освітлення та звукової тіні.

Розрахунок прогнозованої дальності виявлення БПЛА з урахуванням класичних уявлень [8, 11, 12, 19] будемо проводити спираючись на акустичні властивості шумлячого об'єкта та ситуацію з завадами в районі застосування засобу виявлення. Отже, прогнозована дальність поєднає результати визначення енергетичної та геометричної дальності.

Геометрична і прогнозована дальність виявлення БПЛА різного типу

В статтях [8, 9] було представлено результати розрахунку енергетичної дальності для різних БПЛА, а в даній статті розглянемо розрахунки геометричної дальності і як результат, визначено прогнозовану дальність для реальної ситуації, враховуючи значення енергетичної дальності [9, 10]. Поняття геометричної дальності виявлення передбачає відстань джерела звуку до межі акустичної тіні.

Розглянемо три ситуації:

- 1) Від'ємно стійкий градієнт $g_c < 0$.
- 2) Позитивно стійкий градієнт $g_c > 0$.
- 3) Реальна ситуація.

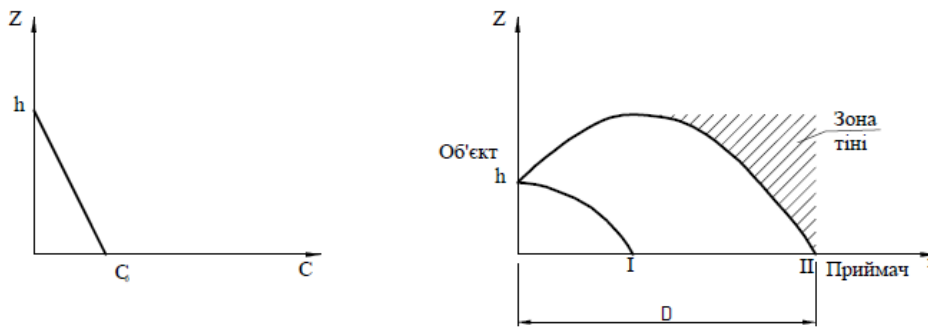


Рис. 3 Геометричною дальністю дії при $g_c < 0$

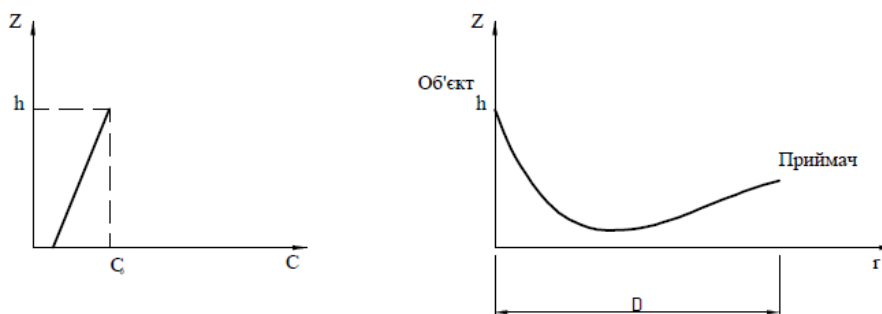


Рис. 4. Геометричною дальністю дії при $g_c > 0$

1. Від'ємно стійкий градієнт $g_c < 0$

Швидкість акустичних хвиль зменшується з висотою. Траєкторія акустичного променя представляє дугу кола радіусом $R = c_0 / g_c$. У сприятливих рефракційних умовах, що відповідають ситуації негативної рефракції, геометрична дальність D_r являє собою горизонтальну відстань від джерела до місця зустрічі променя, випущеного під кутом θ з джерела, до зустрічі з приймачем, який знаходиться на землі. При цьому:

$$D_r = \sqrt{2 \frac{c_0}{\Delta c / \Delta h} \cdot h}, \quad (6)$$

де c_0 – швидкість звуку на рівні джерела; $\Delta c / \Delta h$ – градієнт швидкості звуку

Геометричною дальністю дії буде горизонтальна відстань від джерела до місця зустрічі променя з приймачем, що знаходиться на висоті h (рис. 3). Область акустичної тіні на малюнку заштрихована.

2. Позитивно стійкий градієнт $g_c > 0$

Швидкість акустичних хвиль зростає з висотою. У цьому випадку найбільша дальність виявлення забезпечується променем, що вийшов з джерела під кутом φ і зазнає повного внутрішнього відбиття від шару, що лежить на висоті h (рис. 4).

Геометрична дальність виявлення визначається за формулою:

$$D_r = \sqrt{2 \frac{c_0}{\Delta c / \Delta h} (\sqrt{H-h_1}) + (\sqrt{H-h_2})}, \quad (7)$$

В першому і другому випадку визначення геометричної дальності за формулами 6 та 7 є спрощеними варіантами розрахунку дальності. Геометрична дальність виявлення залежить від градієнта швидкості, характеру зміни швидкості акустичних хвиль з висотою та кута, під яким акустичні промені виходять із джерела. Зауважимо, що градієнт швидкості звуку має температурну і вітрову природу, що вимагає додаткових модельних і розрахункових уявлень, що розглянемо в третьому пункті.

3. Реальна ситуація

У реальних умовах температурні та вітрові чинники діють одночасно, тому реальна картина поширення звуку в атмосфері землі є досить складною. У разі існування інверсійних шарів в атмосфері можуть спостерігатися аномальні закономірності поширення звуку через хвилеводні ефекти [10].

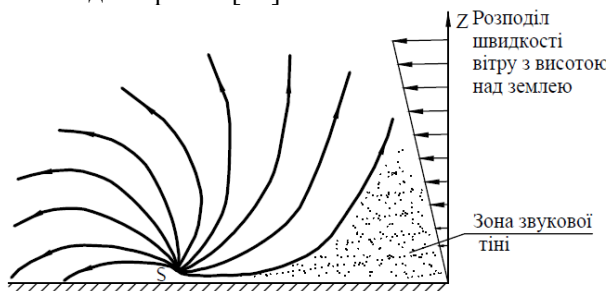


Рис. 5. Поширення звукових променів при впливі вітру

Якщо вплив градієнтів вітру і температури впливають одночасно (поширення звуку відбувається проти вітру, температура повітря з висотою меншає, а величина розглянутих градієнтів є приблизно сталою), відстань від джерела до межі акустичної тіні визначається за формулою:

$$D_r = \sqrt{\frac{2}{\frac{\partial v}{\partial z} \cos \varphi - \frac{\partial T}{\partial z}} \cdot (\sqrt{z_s} + \sqrt{z_r})}, \quad (8)$$

де $\frac{\partial v}{\partial z}$, $\frac{\partial T}{\partial z}$ – відповідно градієнти швидкості вітру і температури; T_0 – температура повітря біля поверхні землі; (φ – кут між напрямком вітру і напрямком приймач – джерело, z_s , z_r – відповідно висоти над поверхнею землі джерела і приймача звука.

Для розрахунку впливу метеорологічних чинників на поширення звуку в атмосфері використовуються емпіричні дані. Для БПЛА типу крило на висоті 400 м: $D_r \approx 2400$ м. Для БПЛА типу квадрокоптер на висоті 120 м: $D_r \approx 748$ м. В практичній ситуації геометрична дальність може обмежувати значення енергетичної.

Дальність виявлення є складною характеристикою приймальної системи якої залежить від багатьох параметрів: акустичної потужності P_{AK} , коефіцієнту осьової концентрації Ω (він же завадостійкість), часу, відстані, аномалії поширення $A(r)$.

При відомих акустичній потужності та спрямованих властивостях випромінюючої антени, заданих величинами P_{AK} , $R_1(\theta, \varphi)$, Ω інтенсивність сигналу на відстані r визначається рівністю:

$$I_1 = \frac{P_{AK} \cdot \Omega_1 \cdot R_1^2(\theta, \varphi)}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot 10^{-0,1A(r)}, \quad (9)$$

де $A(r)$ – аномалія поширення, що виражає в децибелах відмінність закону поширення хвилі від сферичного. Надалі будемо вважати, що відбиваючий об'єкт перебуває у напрямі акустичної осі антени.

Інтенсивність відбитого сигналу у місці розташування приймальної антени визначається рівністю:

$$I_2 = \frac{P_{AK} \cdot \Omega_1 \cdot R_e^2}{16 \cdot \pi \cdot r^4} \cdot 10^{-0,2A(r)}, \quad (10)$$

яке являє собою одну з простіших форм рівняння гідролокації.

Складемо на його основі рівняння для параметра виявлення q^2 . Енергія сигналу визначається добутком тривалості сигналу T на його інтенсивність I_2 . Спектральна густина потужності завади з врахування просторової вибіркості приймальної антени визначається відношенням N_0 / Ω_e . При цьому отримаємо:

$$q_0^2 = \frac{P_{AK} \cdot \Omega_1 \cdot T_s \cdot \Omega_e \cdot R_e^2}{16 \cdot \pi \cdot r^4 \cdot N_0} \cdot 10^{-0,2\beta r}, \quad (11)$$

де $R_e^2 = 4 \cdot 10^{0,1T}$, а $A(r) = a(r) - \beta r$ (βr – втрати на затухання).

Рефракційна аномалія $A(r)$ може приймати як додатні, так від'ємні значення. Її вважають додатною, якщо вона посилює сигнал, і від'ємною – якщо вона його послаблює [11].

В результаті розрахунку енергетичної дальності встановлено: при ймовірності правильного виявлення 0,75 і ймовірності помилкової тривоги 0,01, в обраній смузі частот при роботі в нормальних рефракційних умовах по

об'єкту, шуми якого визначені згідно з [19], з врахуванням обставин, відповідних стандартним рівням шуму навколишнього середовища та АА на основі pv зондів, дальність для БПЛА типу крило 1000 м є досяжною.

В свою чергу для БПЛА типу квадрокоптер при ймовірності правильного виявлення 0,75 і ймовірності помилкової тривоги 0,01, в обрній смузі частот при роботі в нормальних рефракційних умовах по об'єкту дальність у 200 м є досяжною.

В нашому випадку геометрична дальність забезпечує значення енергетичної. А отже, прогнозована дальність для використаних вихідних умов – не гірше розрахункової енергетичної. Більш детально з алгоритмом і результатами розрахунку саме енергетичної дальності для різних БПЛА можна ознайомитись в роботах [8, 9].

Заявлена дальність може коригуватися за рахунок наявності зелених насаджень та інженерних споруд. Також слід зауважити, що при високому рівні зашумленості, а саме у містах, системи акустичного детектування є менш ефективними і частіше їх застосовувати на замських територіях. Перелік і аналіз основних джерел шуму, спричинених повсякденною діяльністю людини, що можуть впливати на роботу тракту шумопеленгування БПЛА представлені в роботі [20].

Висновки

В результаті роботи:

- досліджено існуючі методи та алгоритми обробки та аналізу шумів навколишнього повітряного середовища;
- запропоновано тракт спектрального аналізу, як перспективний засіб виявлення;
- визначено прогнозовану дальність виявлення БПЛА, що включає геометричну та енергетичну дальності. Прогнозована дальність в 1000 м для БПЛА типу крило і 200 м для БПЛА типу квадрокоптер є досяжними;
- з'ясовано можливість впровадження тракту спектрального аналізу у склад мультисенсорного комплексу виявлення та пеленгування БПЛА

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Birch, Gabriel Carisle, Griffin, John Clark, & Erdman, Matthew Kelly. UAS Detection Classification and Neutralization: Market Survey 2015. United States, <https://doi.org/10.2172/1222445>.
- [2] İ. Güvenç, O. Ozdemir, Y. Yapıcı, H. Mehrpouyan and D. Matolak, "Detection, localization, and tracking of unauthorized UAS and Jammers", 2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC), St. Petersburg, FL, USA, 2017, pp. 1–10, <https://doi.org/10.1109/DASC.2017.8102043>.
- [3] L. Marino, "Experimental analysis of UAV-propellers noise," in *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2010, <https://doi.org/10.2514/6.2010-3854>.
- [4] G. Sinibaldi, L. Marino, "Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV", *Appl. Acoust.*, vol. 74, pp. 79–88, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.03.006>.
- [5] N. Intaratep, W. N. Alexander, W. J. Devenport, "Experimental Study of Quadcopter Acoustics and Performance at Static Thrust Conditions", in *22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2016, <https://doi.org/10.2514/6.2016-2873>.
- [6] S. O. Kozheruk, O. V. Korzhyk, D. I. Volovik and G. S. Pukha 2020. Acoustic Module for Direction Finding of Small Aircraft. *Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*. 82 (Sep. 2020), 25-34. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.82.25-34>.
- [7] S. O. Kozheruk, O. V. Korzhyk "Correlation direction finder for small aircraft", *Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, vol 79, pp. 41-47, 2019, <https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.79.41-47>.
- [8] S. O. Kozheruk, O. V. Korzhyk 2019. Detection Small Aircraft by Acoustic Radiation. *Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*. 76 (Mar. 2019), 15-20, <https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.76.15-20>
- [9] O. Korzhyk, A. Kozak, V. Didkovskiy, and S. Naida, "Construction the Device of Acoustic Noise Air Bearing," in *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2020, pp. 683–687, <https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088899>.
- [10] Kozak, A. V. "Improved Unmanned Aerial Vehicle Noise Direction Finding System". *Electronic and Acoustic Engineering*, vol. 4, no. 1, July 2021, pp. 228902-1, <https://doi.org/10.20535/2617-0965.eae.228902>.
- [11] B.I. Shotsky, Methodical instructions for course design in the discipline "Hydroacoustic devices". Part 1, 1986. 60 p.
- [12] V. T. Grinchenko, I. V. Vovk, and V. T. Matsypura, *Basics of acoustics*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 2007. 867 p., ISBN: 978-966-00-1022-2.
- [13] S. O. Kozheruk, *Acoustic information systems*. Kyiv: Igor Sikorsky KPI, 2018, URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/22800>.
- [14] A. Hassanalian, M. and Abdelkefi, "Classifications, applications, and design challenges of drones: A review," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 91, pp. 99–131, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>.

- [15]M. Bangura, Aerodynamics and Control of Quadrotors. The Australian National University, 2017, <https://doi.org/10.25911/5d74e84ce3976>.
- [16]ISO stage 3745: 2012 (en) Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms, 2007-08-16, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [17]ISO 9613-1:1993(en) Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.
- [18]PHANTOM 4 PRO. User's Manual, [Electronic resource]: [Website]. URL: https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_pro/20180508/Phantom_4_Pro_Pro_Plus_Series_User_Manual_EN.pdf
- [19]Handbook of Technical Acoustics Manfred Heckl, Gerhard Müller. - Verlag. Berlin - Heildelberg - New York, 1980 - 436 p.
- [20]V. S. Didkovskiy, V. Y. Akimenko, O. I. Zaporozhets, V. G. Savin and V. I. Tokarev, Fundamentals of Acoustic Ecology: Textbook, Kirovograd: Imeks LTD, 2002, p. 515.

Козак А. В., О. В. Коржик

МЕТОД ВЗАЄМНИХ СПЕКТРІВ В ЗАДАЧАХ ШУМОПЕЛЕНГУВАННЯ БПЛА

Стаття присвячена актуальному напрямку акустичного виявлення БПЛА, у зв'язку зі зростаючими вимогами до систем повітряного спостереження та розвідки. Фізичні поля, що можуть бути зареєстровані пристроєм виявлення БПЛА є дуже різноманітними: електромагнітні, оптичні та акустичні. В свою чергу акустичне поле характеризується низкою шумоподібних сигналів, які можуть бути розцінені як корисні та завади. До того ж широкий парк БПЛА не завжди піддається виявленню. Тому хотілося б отримати такий акустичний пристрій, що міг би забезпечити мінливість сигналу з плином часу. Крім того, до властивостей акустичного поля відносяться і просторова вибірковість – направленість приходу корисного сигналу. Також існують спектральні особливості, через те, що сигнал який ми розглядаємо є широкосмуговим. Тому для збільшення надійності рекомендується паралельне використання декількох трактів виявлення. У зв'язку з цим, є доцільним розглядати пристрій, в якому реалізовані принципи паралельного і послідовного спектрального аналізу. Розрахунки дальності дії пристроїв мають виконуватись відповідно до основного рівня акустичної локації з подальшим корегуванням енергетичної дальності дії з особливостями атмосферного розподілення швидкості звуку. Отже, вище наведені положення і загальний стан розробок пристроїв шумопеленгування БПЛА вказують на те, що запропонована робота є корисною і актуальною в широкому діапазоні застосування.

Мета статті – поширення методів виявлення БПЛА з використанням засобів спектрального аналізу в умовах широкосмугових завад і сигналів. А наукова новизна запропонованої роботи полягає в використанні методології акустичної локації на задачі шумопеленгування БПЛА в умовах ізотропних та анізотропних акустичних завад. В результаті експериментів в натурних і лабораторних умовах було визначено, що з трактів виявлення за інтенсивністю, взаємним та вузькосмуговим спектром, найефективнішим та найпоказовішим виявився саме тракт виявлення за взаємним спектром. При цьому розраховано прогнозовану дальність виявлення БПЛА, що включає геометричну і енергетичну дальності. Структура, принцип дії та відображення результатів вимірювань експериментів в лабораторних та натурних умовах реалізовано за допомогою інструментального лабораторного пакета LabView. Результати даної роботи можуть допомогти у створенні акустичної системи повітряного шумопеленгування, що реалізує принципи виявлення шумоподібних сигналів із залучення спектральних та кореляційних методів, і яка може бути застосована у складі мультисенсорного комплексу виявлення та пеленгування БПЛА.

Ключові слова: виявлення; пеленгування; БПЛА; методи пеленгування; пристрої виявлення; взаємний спектр; спектральні характеристики; дальність виявлення; акустичні шуми.

Kozak A., Korzyk O.

THE METHOD OF MUTUAL SPECTRA IN UAV NOISE DETECTION PROBLEMS

The article is devoted to the relevant direction of acoustic detection of UAVs, in connection with the increasing demands on aerial surveillance and reconnaissance systems. The physical fields that can be detected by a UAV detection device are very diverse: electromagnetic, optical, and acoustic. In turn, the acoustic field is characterized by a band of noise-like signals that can be interpreted as useful and interfering. Moreover, a wide range of UAVs is not always subject to detection. Therefore, it would be desirable to obtain an acoustic device that could provide signal variability over time. In addition, the properties of the acoustic field include spatial selectivity - the direction of arrival of the useful signal. There are also spectral features due to the fact that the signal we are considering is broadband. Therefore, parallel use of several detection paths is recommended to increase reliability. In this regard, it is expedient to consider a device that implements the principles of parallel and sequential spectral analysis. The range calculations should be carried out according to the main level of acoustic localization with subsequent correction of the energy range of action with the features of atmospheric distribution of sound velocity. Thus, the above provisions and the

general state of development of UAV noise direction finding devices indicate that the proposed work is useful and relevant in a wide range of applications.

The purpose of the article is to expand methods of UAV detection using spectral analysis tools in conditions of broadband interference and signals. The scientific novelty of the proposed work lies in the use of acoustic localization methodology for the task of UAV noise direction finding in conditions of isotropic and anisotropic acoustic interference. As a result of experiments conducted in natural and laboratory conditions, it was determined that the detection path based on mutual spectrum was the most efficient and informative among the detection paths based on intensity, mutual spectrum, and narrowband spectrum. The predicted detection range of UAVs was calculated, which includes both geometric and energetic distances. The structure, operating principle, and display of measurement results in laboratory and natural conditions were implemented using the LabView software package. The results of this work may help in the development of an acoustic air noise localization system that implements the principles of detecting noise-like signals using spectral and correlation methods and can be applied as part of a multisensor complex for detecting and direction finding of UAVs.

Keywords: detection; direction finding; UAV; direction finding methods; detection devices; mutual spectrum; spectral characteristics; detection range; acoustic noise.

Стаття надійшла до редакції 19.02.2023 р.

Прийнято до друку 22.03.2023 р.