

623.746.8:534.8

DOI: 10.18664/ikszt.v30i2.335304

КАНЄВСЬКИЙ М. В., здобувач другого рівня вищої освіти кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту,
СЕМИКРАС А. І., здобувач першого рівня вищої освіти кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту,
ЗМІЙ С. О., доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту,
ЩЕБЛИКІНА О. В., доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, PhD, Український державний університет залізничного транспорту



Акустична система моніторингу повітряного простору: новий рівень виявлення безпілотних літальних апаратів

Анотація. У роботі подано комплексний проєкт пристрою на базі акустичної системи моніторингу повітряного простору, розроблений для розв'язання актуальної проблеми своєчасного виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА). В умовах швидкого розвитку технологій БПЛА стають усе більш поширеною загрозою для приватності, комерційної безпеки та громадського порядку. Особливу увагу в роботі приділено захисту комерційних і громадських об'єктів, що обумовлює специфічні вимоги до системи виявлення.

У рамках дослідження проаналізовано сучасні методи виявлення БПЛА, включаючи їхні сильні та слабкі сторони. Вибираючи систему виявлення, особливу увагу приділяли можливості виявлення малогабаритних БПЛА на невеликих відстанях, що є критично важливим для гарантування безпеки в умовах міської забудови та обмеженого простору. Акустичні системи завдяки своїй відносно низькій вартості, простоті інтеграції та можливості ефективного виявлення звукових сигнатур є перспективним рішенням для таких завдань.

Спроектована система виявлення використовує обертові направлені мікрофони для підвищення точності визначення джерела звуку. Описано принцип роботи системи, що базована на виявленні та аналізі акустичних сигналів, які видають БПЛА під час польоту.

Проведені детальні розрахунки точності та похибок позиціонування БПЛА з використанням кутових (AoA) і часових (TDoA) методів локації. Проаналізовано вплив різних факторів, таких як атмосферні умови (температура, вітер), на точність акустичного виявлення та запропоновані способи компенсації їхнього негативного впливу.

Крім того, розглянуто застосування сучасних методів машинного навчання, зокрема згорткових і рекурентних нейронних мереж, для виявлення та класифікації БПЛА за їхніми акустичними сигнатурами. Це дає змогу не тільки виявляти присутність БПЛА, але й ідентифікувати їхній тип і модель, що є важливим для реагування на потенційні загрози.

Результати дослідження демонструють можливість створення ефективної та надійної системи акустичного моніторингу повітряного простору, орієнтованої на захист комерційних і громадських об'єктів шляхом своєчасного виявлення малогабаритних БПЛА на невеликих відстанях.

Ключові слова: акустична система, моніторинг повітряного простору, безпілотні літальні апарати, кутова локалізація (AoA), часова локалізація (TDoA).

© КАНЄВСЬКИЙ М. В., СЕМИКРАС А. І., ЗМІЙ С. О., ЩЕБЛИКІНА О. В., 2025

Вступ

У сучасних умовах розвитку технологій зростає потреба у своєчасному виявленні безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що становлять потенційну загрозу для приватного простору, комерційної безпеки та громадського порядку. Особливе значення це питання має для запобігання комерційному шпигунству, захисту приватної власності та уникненню втручання в конфіденційні зони. Ефективний моніторинг повітряного простору стає критично важливим для цивільного сектору, де доступ до складних систем виявлення часто обмежений.

Перспективним рішенням для таких завдань є розроблення системи виявлення БПЛА на основі акустичних датчиків або спрямованих мікрофонів, які здатні фіксувати звуки, створювані двигунами або гвинтами літальних апаратів, і визначати їхнє місцезнаходження. Основний принцип роботи системи полягає у виявленні та аналізі акустичних сигналів, що виникають під час роботи БПЛА.

За допомогою спрямованих мікрофонів система здатна фіксувати специфічні шуми навіть на значних відстанях. Програмне забезпечення аналізує отримані сигнали та порівнює їх із зразками відомих типів літальних апаратів. Це дає змогу не лише виявляти БПЛА, але й класифікувати їх за акустичними характеристиками, визначаючи потенційно небезпечні об'єкти.

Визначають напрямок, висоту і швидкість руху об'єкта за допомогою методів тріангуляції та обробки сигналів із декількох мікрофонних установок. Система може автоматично супроводжувати об'єкт, передаючи координати для відповідних дій, таких як сповіщення служб безпеки чи активація захисних засобів.

Перевагою такої системи є її компактність, щоб легко інтегрувати її у приватні об'єкти, офісні будівлі або громадські простори. Система має низьке енергоспоживання, що забезпечує тривалу автономну роботу навіть у складних умовах. Її модульна структура дає змогу адаптувати функціонал під конкретні потреби користувачів, включаючи оновлення для реагування на нові загрози.

Важливою перевагою є можливість інтеграції з іншими системами безпеки, такими як відеоспостереження або радіолокаційні установки, для створення єдиної інформаційної мережі, щоб забезпечити оперативний обмін даними та швидко реагувати на загрози.

Упровадження таких технологій значно підвищить рівень безпеки в цивільному секторі, своєчасно виявляючи та нейтралізуючи потенційні ризики, сприяючи захисту приватного простору, конфіденційної інформації та громадського спокою.

Аналіз методів виявлення БПЛА.

Радарні системи мають значну дальність виявлення (до 10 км) і високу точність, але їх

відрізняє значна вартість, складність обслуговування і порівняно низька ефективність з виявленням малих об'єктів [1]. Радіочастотні системи здатні перехоплювати сигнали управління БПЛА, що дає змогу визначати їхні координати. Проте вони мають обмеження в точному визначенні напрямку (азимут, кут місця) і неефективні для виявлення об'єктів, які використовують провідникове управління, тобто передають сигнали по дротах, а не за допомогою радіочастот [2]. Оптичні системи, на кшталт відеоспостереження, дають змогу дуже точно розпізнавати об'єкти і корисні для ідентифікації, але їхня ефективність знижується в умовах недостатнього освітлення, обмеженої видимості або на великій відстані [3, 4].

Серед досліджених методів особливо виділяють акустичні системи [5-9]. Їхніми основними перевагами є відносно низька вартість і простота інтеграції в існуючу інфраструктуру. Хоча їхня дальність виявлення обмежена 300–500 м, цього цілком достатньо для вирішення завдань захисту приватних територій, забезпечення комерційної безпеки та підтримки громадського порядку. Акустичні системи фіксують звукові хвилі, що генерують двигуни чи гвинти літальних пристроїв, та аналізують їх за допомогою сучасних алгоритмів обробки сигналів, таких як мел-кепстральні коефіцієнти (MFCC). Завдяки використанню тріангуляції та класифікації за допомогою машинного навчання система здатна точно визначати місцезнаходження і тип об'єкта.

Розвиток систем виявлення

Здавна звук був першим сигналом, що сповіщав про щось важливе, передвіщаючи зміни навколишнього світу. Шелест листя попереджав про наближення здобичі або хижака, гуркіт грому віщував негоду, а далекий тупіт копит – про наближення вершників, які приносили радісні чи сумні новини. Людський слух, відточений тисячоліттями еволюції, здатний розрізняти найтонші нюанси звукового середовища, виокремлюючи значущі сигнали з хаосу шуму.

Саме тому здатність визначати і тлумачити звуки завжди була основною для виживання та розвитку людства. Звук – це не просто фізичне явище, а інформація, закодована в коливаннях повітря. Він доносить до нас відомості про далекі події, приховані об'єкти, невидимі загрози.

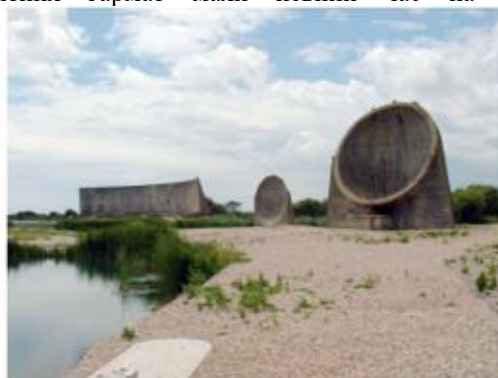
Із розвитком цивілізації змінювалися і способи використання звуку. Від примітивних слухових труб, що допомагали мореплавцям вловлювати шум наближення шторму, до складних гідроакустичних систем, здатних виявляти підводні човни на відстані сотень кілометрів, людство навчилося не лише пасивно сприймати звуки, а й активно застосовувати їх для дослідження світу.

Одним із найважливіших напрямів такого дослідження стала акустична локація – метод визначення положення об'єктів через аналіз звукових

хвиль. Вона знайшла широке застосування в різних сферах – від військової справи до медицини, від навігації до геології. Історія акустичної локації – це історія постійного вдосконалення методів генерації, виявлення та обробки звукових сигналів, історія створення дедалі чутливіших і точніших приладів, здатних «бачити» світ за допомогою звуку.

У сфері акустичної локації між Першою і Другою світовими війнами можна виділити два головні завдання: виявлення літальних цілей ворога та визначення його наземних вогневих позицій (артилерії). Такий розподіл був насамперед пов'язаний із напрямком, з якого очікували надходження звуку: із неба під деяким кутом до горизонту чи за кілька кілометрів із поверхні землі. Тут слід зазначити, що першочерговим завданням щодо літальних об'єктів було саме їх виявлення, щоб екіпажі зенітних гармат мали певний час на

підготовку до зіткнення. Зважаючи на наявні на той час технології, точне (або, щонайменше, приблизне) позиціонування літальних цілей було неможливе, оскільки навіть попередження про авіаналіт у середньому надходило за кілька хвилин до прибуття ворожих літаків [10]. Щоб розширити можливості акустичної локації, було вирішено створювати спочатку стаціонарні, а згодом мобільні пункти виявлення. Оскільки приймачем звукових коливань слугував слуховий апарат людини, то єдиним відносно дешевим та ефективним методом підвищення рівня чутливості системи було збільшення апертури. Першими на практиці це застосували британці, встановивши бетонні рефлектори, близькі за формою до параболічного дзеркала, розміри якого сягали десятків метрів (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Фото акустичних дзеркал раннього попередження:

а – база королівських повітряних сил Великої Британії;

б – дзеркало (4.5 м) у Кінсі, Велика Британія

Очевидно, що чутливість такого «датчика» звуку значно зростала, але разом із нею збільшувалася його «сліпа зона». Значна спрямованість завдяки використанню параболічної форми рефлектора обмежувала робочий кут такої системи та не давала значного виграшу в максимальній відстані реєстрації для об'єктів, які були далеко від «оптичної осі» такого акустичного дзеркала. Проте всі ці недоліки не мали великого значення, оскільки основним завданням було виявлення літальних цілей на якомога більшій відстані від бази. Тому правильно підібрані параметри такого рефлектора і невеликий кут його

нахилу до горизонту робили свою справу. Значні розміри систем попереднього виявлення літальних цілей і їхня стаціонарність (легкість виявлення та знищення) у період між двома війнами змусили дослідників переглянути ефективність застосування таких пристроїв. Наступним кроком розвитку цієї технології стало розроблення і створення мобільних систем акустичної локації (рис. 2). Загалом на той момент вже існувало три основні типи системи [11]: індивідуальні/переносні рупори; мобільні (на колесах) рупорні пости; стаціонарні тарілки/рефлектори і стіни-дзеркала.



а



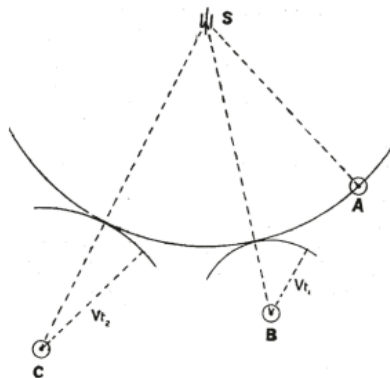
б

Рис. 2. Фото акустичних локаторів часів Другої світової війни:

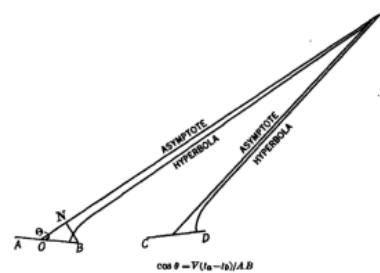
а – звуколокаційний пост, Німеччина; б – мобільний пост моделі ТЗ, 1927 р.

Це стало поштовхом до розвитку технології артилерійської звукової розвідки, основне завдання якої полягало у визначенні місця розташування артилерійської зброї ворога за звуком пострілу від неї. Рухливість систем накладала певні обмеження на їхні габарити і вагу, що змусило інженерів перейти від одного величезного бетонного дзеркала до відносно невеликих масивів рупорів, які хвилеводами були під'єднані до навушників, які використовувала людина для прослуховування «звукового ефіру» (рис. 2, а).

На початкових етапах розвитку акустичної локації двома основними методами визначення положення ворожої техніки на полі бою були трилатерація і триангуляція. Координати джерела звуку з використанням першого знаходять через побудову системи трикутників і вимірювання всіх їхніх сторін. Метод триангуляції [12] полягає у вимірюванні кутів усіх цих трикутників. Незважаючи на принципову різницю між цими двома методами, обидва потребують вимірювання різниць часу проходження одного і того самого звукового сигналу від джерела до окремих приймачів (рис. 3).



а



б

Рис. 3. Приклади схем ранніх методів звуколокації:

а – схема трилатерації [13]; б – схема триангуляції [12]

Важливим кроком у розвитку акустичної локації стало створення низькочастотного мікрофона [13] у 1916 р. Цей винахід дав змогу частково автоматизувати процес реєстрації звуку та підвищити точність вимірювань. Об'єднання кількох мікрофонів

у мережу з передаванням сигналів до центру обробки даних прискорило збір і аналіз інформації. Завдяки цьому вдалося усунути похибку, пов'язану з часом реакції людини на подразник (рис. 4).

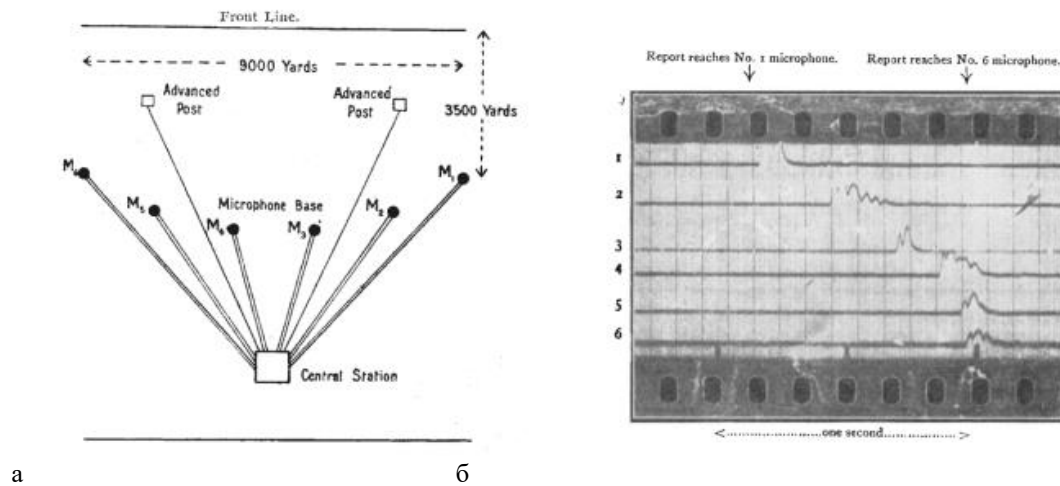


Рис. 4. Бойовий порядок ранніх акустичних вимірювальних постів:

а – схема посту; б – приклад запису звукових сигналів на плівку

Вимірювальна система складалася з двох оглядових пунктів для реєстрації світлового спалаху від пострілу та шести мікрофонів, підключених до центру обробки. Оглядові пункти фіксували момент пострілу з високою точністю, оскільки швидкість світла значно перевищує швидкість звуку. Система займала близько 9 км уздовж лінії фронту, а дані записували на фотоплівку після отримання сигналу з обох оглядових пунктів.

Вплив людського фактора на точність вимірювань був значним. Дослідження показали [13], що середня похибка визначення часу реєстрації звуку людиною становила 0,1 с, тоді як для отримання прийнятних результатів вона мала бути не більше 0,005 с. Крім того, на точність вимірювань впливали коливання параметрів атмосфери, які не враховували математичні моделі.

Однією з основних проблем було розрізнення звуку пострілу від надзвукової ударної хвилі, що створювало додаткові труднощі для аналізу записів.

Розрахунки позиціонування БПЛА

Метод виявлення БПЛА за допомогою мікрофонів спирається на аналіз акустичних особливостей, які генерує літальний об'єкт під час руху. Головними джерелами звуку є електродвигуни, пропелери і аеродинамічний шум, що виникає через взаємодію повітря з корпусом БПЛА. Виявлення відбувається за допомогою масиву мікрофонів, які фіксують акустичний сигнал, після чого, застосовуючи методи кутової (AoA) [13, 14] і часової (TDoA) локалізації [15], визначають місцезнаходження джерела звуку.

Кутовий метод визначення напрямку на джерело звуку (Angle of Arrival, AoA) базований на аналізі різниці в часі надходження звуку до двох або більше мікрофонів, розміщених на певній відстані один від одного (рис. 5). Коли звукова хвиля надходить не перпендикулярно до осі між

мікрофонами, вона досягне одного з них раніше. Цю різницю в часі визначають за формулою [14]

$$\Delta t = \frac{d \sin(\theta)}{c}, \quad (1)$$

де c – швидкість звуку в повітрі (343 м/с);

d – відстань між мікрофонами;

θ – кут прибуття сигналу.

Виходячи з цього, можна визначити напрямок:

$$\theta = \arcsin \frac{c \cdot \Delta t}{d}. \quad (2)$$

Цей метод дає змогу визначити напрямок на БПЛА, але не його точне розташування.

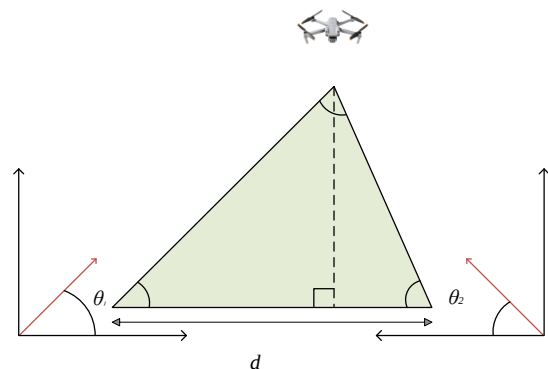


Рис. 5. Розрахунки координат і висоти

Точне позиціонування можливе за допомогою методу різниці часу прибуття звуку (Time Difference of Arrival, TDoA) [15], який базований на розрахунку різниці відстаней від джерела до кількох мікрофонів.

Якщо звук досягає мікрофона 1 раніше, ніж мікрофона 2, то різницю відстаней визначають як

$$\Delta d = c \cdot \Delta t.$$

Це рівняння описує гіперболічне місце точок, на яких може перебувати об'єкт. Для двох мікрофонів рівняння гіперболи виглядає так:

$$\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}-\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}=\Delta d.$$

Додатковий мікрофон дає змогу отримати другу гіперболу, перетин яких дає точні координати БПЛА. У випадку використання трьох мікрофонів (рис. 6) ми отримуємо систему рівнянь

$$\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}-\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}=\Delta d_{12},$$

$$\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}-\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}=\Delta d_{13},$$

де Δd_{12} і Δd_{13} – різниці відстаней між джерелом звуку і відповідними мікрофонами.

Цю систему рівнянь розв'язують числовими методами (наприклад методом Ньютона або найменших квадратів), що дає змогу отримати точні координати об'єкта.

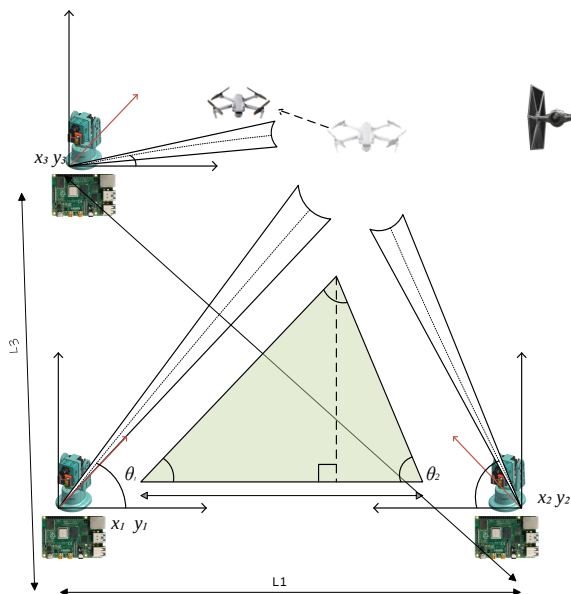


Рис. 6. Розрахунки координат висоти з використанням трьох мікрофонів

Також завдяки цій системі можемо розрахувати швидкість руху об'єкта за методом послідовних позицій. Щоб знайти швидкість, треба виміряти позицію БПЛА у два моменти часу (x_1, y_1) і

(x_2, y_2) , час між позиціями $(t_2 - t_1)$ і розрахувати швидкість за формулою

$$v = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{(t_2 - t_1)}. \quad (7)$$

Поєднання методів AoA і TDoA дає змогу підвищити точність визначення місцезнаходження БПЛА, особливо у складних акустичних умовах із фоновими шумами. Використовуючи базу даних акустичних профілів, можна ідентифікувати тип дрона за його шумовими характеристиками. Це може бути реалізовано за допомогою спектрального аналізу та алгоритмів глибокого навчання, що дають змогу відрізнити БПЛА від природних і техногенних шумів.

Акустичний метод виявлення має низку переваг, таких як незалежність від видимості та ефективність у складних погодних умовах. Проте він має обмеження, зокрема чутливість до відбиття звуку від поверхонь і необхідність обробки великої кількості шумових даних. Для покращення точності можна використовувати адаптивні фільтри та алгоритми обробки сигналів, щоб зменшити вплив сторонніх шумів і покращити точність локалізації.

Теоретичний аналіз похибки позиціонування

Точність позиціонування залежить від кута похибки вимірювань $\Delta\theta$ і відстані до об'єкта d .

Для стаціонарного масиву, якщо похибка кутового вимірювання становить $\Delta\theta$, невизначеність положення об'єкта на відстані d визначають як (таблиця)

$$\Delta x = d \cdot \tan(\Delta\theta) \quad (8)$$

Якщо масив має ширину B , то кутова похибка наближено залежить від кутової роздільної здатності масиву:

$$\Delta\theta_{static} \approx \frac{\lambda}{B}. \quad (9)$$

де λ – довжина акустичної хвилі. Для частоти 1000 Гц $\lambda = 0.343$ м.

З шириною масиву $B = 1$ м маємо

$$\Delta\theta_{static} \approx \frac{0.343}{1} = 0.343 \text{ рад} \approx 19.6^\circ.$$

На відстані 100 м невизначеність

$$\Delta x_{static} \approx 100 \cdot \tan(19.6^\circ) \approx 35.6 \text{ м.}$$

Для обертових мікрофонів похибка значно зменшується, оскільки мікрофон точно наведено на джерело (рис. 7). Якщо система має кутову роздільну здатність $\Delta x_{rot} = 1^\circ (0.017 \text{ рад})$, то на 100 м

$$\Delta x_{rot} = 100 \cdot \tan(0.017) \approx 1.7 \text{ м.}$$

Кутова похибка $\Delta\theta$	19.6° (12)	1°
Невизначеність на 100 м Δx	35.6 м Т	1.7 м
Потрібна кількість мікрофонів	а б д	3
Вимоги механіки	д ф ц я	Відсутні Потрібні моторизовані системи

Параметр	Стационарний мікрофон (ширина 1 м)	Обертний мікрофон (точність 1°)
----------	--	---------------------------------------

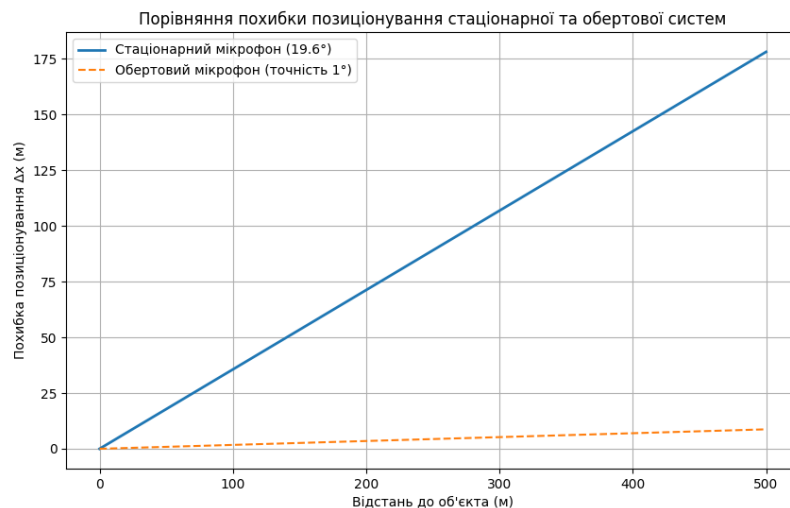


Рис. 7. Порівняння похибки позиціонування для стаціонарних та обертних систем

Система мікрофонів, що обертаються і спрямовано працюють, значно переважає стаціонарні масиви за точністю визначення розташування БПЛА завдяки здатності динамічно налаштовуватися на джерело звуку та виправляти кутові неточності. Статичні масиви обмежені в зоні охоплення, що потребує застосування більшої кількості мікрофонів або додаткових алгоритмів обробки для поліпшення роздільної здатності. Основне обмеження точності таких масивів криється в залежності від фіксованої конфігурації та необхідності широкої апертури для досягнення високої роздільної здатності. Тоді як обертні мікрофони здатні зменшити кутову похибку до 1°, забезпечуючи невизначеність у межах 1.7 м на 100-метровій дистанції, стаціонарні масиви завширшки 1 м можуть мати похибку, що перевищує 35 м на аналогічній відстані. Обмежене поле огляду стаціонарних масивів також призводить до виникнення «сліпих зон» і зниження точності визначення напрямку, особливо на краях поля огляду. У разі систем із динамічними мікрофонами, які змінюють кут нахилу та обертаються на 360°, можливе безперервне спостереження за середовищем, що дає змогу здійснювати адаптивний пошук і більш точне визначення розташування об'єкта. Найбільш

ефективний спосіб реалізації такої системи полягає в комбінованому застосуванні AoA і TDoA [16], що дає змогу одночасно визначати напрямок і відстань до БПЛА з високою точністю. Зважаючи на всі ці фактори, можна стверджувати, що для практичного використання виявлення та позиціонування БПЛА найбільш прийнятною є саме система обертних спрямованих мікрофонів, адже вона забезпечує широкий кут огляду, високу точність визначення координат і адаптивну роботу в реальному часі, не потребуючи розширення мікрофонного масиву.

Вплив атмосферних умов та методи покращення точності виявлення БПЛА

Точність акустичного виявлення БПЛА значною мірою залежить від впливу атмосферних умов і методів обробки сигналів. Основними факторами, що впливають на поширення звуку, є температура, вологість і вітер, які можуть спричинити спотворення сигналу та похибки у визначенні відстані до об'єкта. Швидкість звуку в повітрі змінюється відповідно до температури (рис. 8):

$$c = 331.3 + 0.606 \cdot T,$$

де T – температура повітря, °C. Зі змінюю температурою на 10 °C швидкість звуку змінюється

приблизно на 6 м/с, що призводить до похибки у визначенні відстані

де Δc – зміна швидкості звуку.

$$\Delta d_{temp} = \Delta t \cdot \Delta c, \quad (14)$$

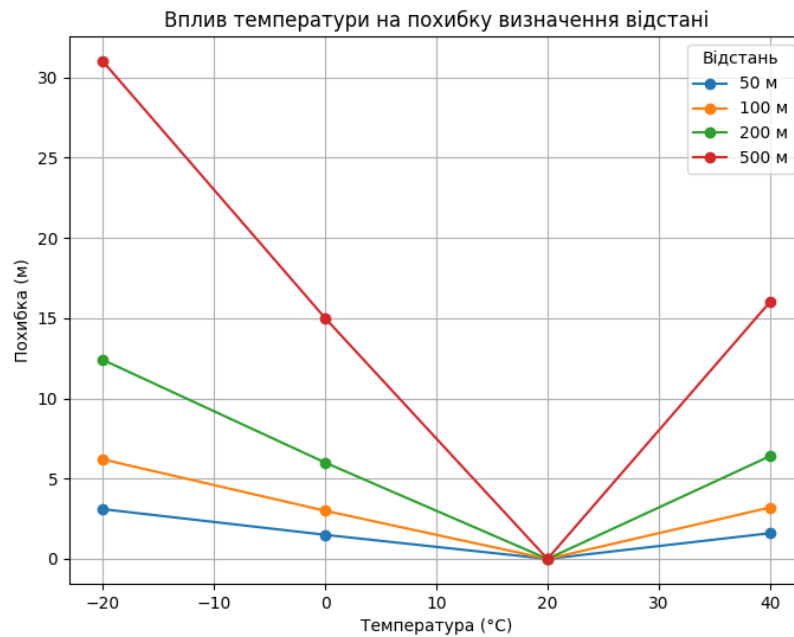


Рис. 8. Розрахунок похибки визначення позиціонування зі зміною температури

Вітер також впливає на поширення звукових хвиль (рис. 9), створюючи додаткову похибку

де v_{wind} – швидкість вітру;

α – кут між напрямком вітру та поширенням звуку.

$$c_{eff} = c + v_{wind} \cdot \cos(\alpha), \quad (15)$$

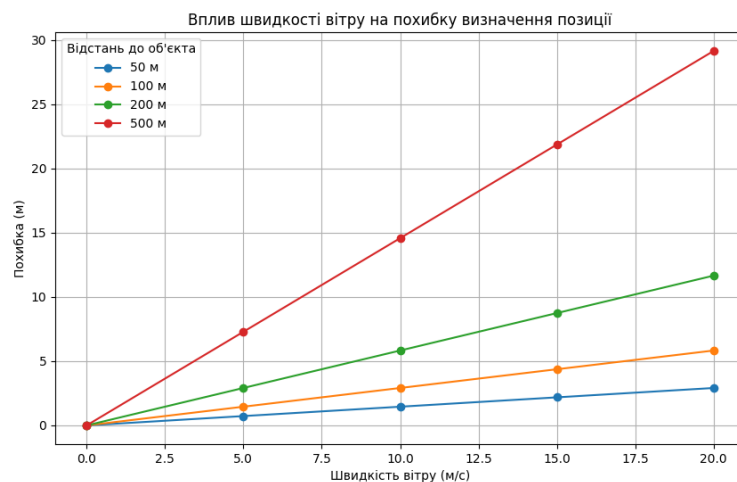


Рис. 9. Розрахунок похибки визначення позиціонування зі зміною швидкості вітру

З метою компенсації цих ефектів система акустичного виявлення має бути регулярно

калібрована. Статичне калібрування передбачає визначення початкового положення мікрофонів, калібрування кутових датчиків і точне вимірювання відстаней між елементами системи. Динамічне

калібрування здійснюване в процесі роботи і включає компенсацію механічних вібрацій, корекцію похибок обертання і точну синхронізацію часу між мікрофонами на рівні мікросекунд.

Покращення точності системи досягають застосуванням адаптивної обробки сигналів. Для фільтрації шумів використовують фільтри Калмана, що допомагають оцінювати траєкторію, вейвлет-перетворення для аналізу частотного складу сигналу, а також алгоритми пригнічення завад. Додатково проводять спектральний аналіз для визначення характерних частот БПЛА, щоб ідентифікувати різні моделі дронів за їхнім акустичним підписом. Високого рівня класифікації досягають застосуванням нейромережових методів, де згорткові нейронні мережі використано для розпізнавання спектрограм, рекурентні мережі аналізують часові послідовності, а автоенкодері дають змогу ефективно придушувати шумові компоненти сигналу.

Розраховавши похибку у визначенні положення БПЛА, ураховують кутові похибки вимірювань, температурні та вітрові збурення, а також механічні похибки самої системи. Загальну похибку можна оцінити за рівнянням

$$\Delta_{total} = \sqrt{\Delta_{angle}^2 + \Delta_{temp}^2 + \Delta_{wind}^2 + \Delta_{mech}^2},$$

де Δ_{angle} – похибка кутових вимірювань;

Δ_{temp} – температурний вплив;

Δ_{wind} – ефект від вітру;

Δ_{mech} – механічні похибки системи.

За коректного калібрування та використання алгоритмів адаптивної обробки сигналів можна досягти точності позиціонування на рівні $\pm 1^\circ$ для визначення напрямку, $\pm 2\%$ – для оцінювання відстані та $\pm 5\%$ – визначення висоти польоту об'єкта. Ці показники зберігаються за температури від -20°C до $+40^\circ\text{C}$ і швидкості вітру до 10 м/с, що забезпечує ефективність системи в реальних умовах експлуатації.

Також інтеграція метеостанції дасть змогу суттєво зменшити всі основні похибки акустичної системи виявлення БПЛА, особливо ті, що пов'язані з атмосферними умовами. Це значно підвищить точність визначення місцезнаходження БПЛА, насамперед на великих дистанціях, і зробить систему більш адаптивною до реальних умов експлуатації.

Виявлення та класифікації БПЛА із використанням методів машинного навчання

Одним із методів виявлення БПЛА є аналіз акустичного випромінювання. Основний алгоритм такого підходу передбачає декілька основних кроків [17]. Спектральний аналіз дає змогу розкласти сигнал на складові частоти, використовуючи, зокрема, алгоритм швидкого перетворення Фур'є (FFT), щоб створити спектральну характеристику сигналу, що використовують для ідентифікації акустичних особливостей дронів. Наприклад, можна встановити

частоту, амплітуду і спектральну ширину звуку, які вони випромінюють. Завдяки такому аналізу можна отримати відомості про розміри, форму і швидкість польоту БПЛА. Водночас наявність сторонніх шумів, як-от звуки інших літальних апаратів, наземного транспорту або водної поверхні, ускладнює процес.

Метод головних компонент (РСА) допомагає знизити розмірність даних, позбавляючи від кореляції між характеристиками сигналів. Щодо БПЛА, то цей метод дає змогу зосередитися на найбільш значущих акустичних особливостях. Аналізуючи сигнали, отримані з мікрофонів, можна створити матрицю акустичних даних, де кожен рядок відповідає запису з окремого мікрофона. РСА дає змогу виділити найважливіші компоненти, які містять найбільше інформації про структуру сигналу. Це допомагає розрізнити акустичні характеристики БПЛА і фоновий шум. Після цього можна застосувати кластерний аналіз для групування отриманих акустичних сигнатур, що сприяє більш точному визначенню присутності БПЛА в середовищі.

Найбільш ефективним напрямом надійного виявлення БПЛА є комплексне використання інформації, яка надходить із різних фізичних каналів. Проте використання комплексних методів потребує більшої кількості обладнання, що збільшує габарити і вартість таких комплексів, а також зменшує їхню мобільність. Для виявлення БПЛА широкого застосування, які є найбільш затребувані в цивільних і військових завданнях, значну увагу слід приділити дослідженню акустичних методів виявлення БПЛА.

Найпоширенішим методом [17] аналізу акустичних даних є перетворення Фур'є, яке розкладає складний хвильовий процес на елементарні гармонічні коливання та описує його характеристики на основі тригонометричних функцій. Дискретне перетворення Фур'є оцифрованого сигналу обчислюють так:

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \exp(-2\pi j k \frac{n}{N}).$$

Дискретне перетворення Фур'є є зручним засобом аналізу внаслідок наочності інтерпретації його результатів, але дає лише узагальнені відомості про спектральний склад сигналу. Гармонічні функції відображують специфічні особливості сигналу (перепади нескінченної крутості, розриви, сходи, піки) лише без обмежень за кількістю членів ряду. На практиці внаслідок обмеження щодо кількості членів ряду Фур'є на околицях стрибків і розривів відновленого сигналу виникають осциляції.

Для розв'язання зазначених проблем використовують короткочасне перетворення Фур'є:

$$S_l(k) = \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} w(n) \cdot s(n + lH) \cdot \exp(-2\pi j k \frac{n}{N}), l = 0, 1$$

де $w(n)$ – аналітичне вікно;

s – фрагмент вхідного сигналу;

l – індекс, що вказує порядковий номер кадру (або часовий індекс);

H – крок.

Короткочасне перетворення Фур'є дає змогу здійснити перехід від амплітудного до частотно-часового подання сигналу на основі згортки

досліджуваного сигналу та віконної функції. Обчислення ДПФ на кожному інтервалі, що виділений ковзною функцією аналітичного вікна, розкриває особливості нестационарних сигналів.

(18) Структура системи виявлення БПЛА.

Система виявлення та аналізу БПЛА на основі акустичних випромінювань використовує обертові направлені мікрофони, щоб значно підвищити точність визначення джерела шуму в просторі. Робота системи базована на двох основних підсистемах: виявлення акустичного випромінювання і аналізу акустичного випромінювання (рис. 10).

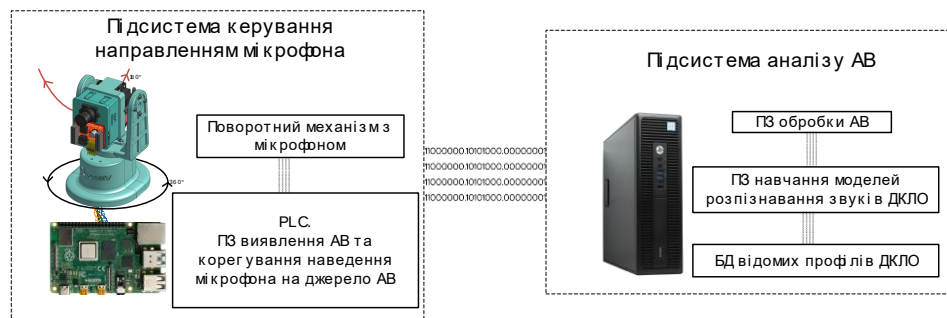


Рис. 10. Структурна схема системи виявлення БПЛА

Підсистема виявлення акустичного випромінювання відповідає за первинне виявлення джерела звуку, його локалізацію в просторі та наведення мікрофона для подальшого аналізу. Мікрофони направленої типу (кардіоїдальні) ефективно фільтрують фоновий шум і виявляють цільові акустичні випромінювання [18, 19]. Вони закріплені на обертовому механізмі (рис. 11), що дає змогу проводити панорамний пошук джерел звуку. Мікрофон закріплено на рухомій платформі, яка має можливість обертатися на 360° у горизонтальній площині та змінювати кут нахилу до 180° у вертикальній площині. Орієнтація мікрофона здійснювана за алгоритмом максимального сигналу, тобто мікрофон спрямований у бік, де сигнал має найбільшу амплітуду (рис. 12).

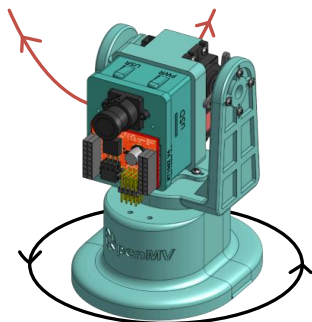


Рис. 11. Обертовий механізм

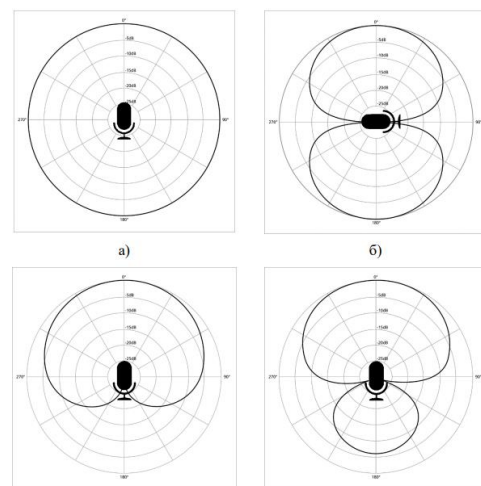


Рис. 12. Діаграма направленості: а – мікрофонів-приймачів тиску;

б – мікрофонів-приймачів градієнтного тиску; в – комбінованих кардіоїдних мікрофонів; г – комбінованих гіперкардіоїдних мікрофонів

Виявляють джерело шуму за допомогою методу кута прибуття звуку (AoA – Angle of Arrival) [13, 14]. Величину кута визначають за фазовою різницею або часовою затримкою сигналу (TDoA –

Time Difference of Arrival) [15] між різними положеннями мікрофона.

Для визначення координат джерела звуку використовують триангуляційний метод. Оскільки обертовий механізм дає змогу отримати кілька вимірювань з різних кутів, то

$$h = d \cdot \frac{\sin(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2)}{\sin(180^\circ - (\theta_1 + \theta_2))}$$

Після розрахунку позиції PLC на базі Raspberry Pi передає отримані дані до підсистеми аналізу акустичного випромінювання [20].

Підсистема аналізу акустичного випромінювання ідентифікує та класифікує акустичні профілі БПЛА за допомогою методів машинного навчання і бази даних відомих зразків [2]. Програмне забезпечення підсистеми обробляє отримані сигнали для виділення характерних ознак. Основні параметри, що аналізують:

- Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCCs) – використовують для аналізу спектральної енергетики;
- спектральна ентропія – допомагає визначати структуру шуму;
- Zero-Crossing Rate (ZCR) – аналіз швидкості зміни амплітуди сигналу.

Система використовує Convolutional Recurrent Neural Networks (CRNN), що поєднують згорткові нейронні мережі (CNN) для обробки спектрограм і рекурентні нейронні мережі (RNN) для аналізу динаміки сигналу.

Оброблений сигнал порівнюють із базою даних акустичних профілів, яка містить відомі характеристики різних моделей БПЛА [21] і зразки шумів природного середовища та міського фону. Якщо знайдено співпадіння з відомою моделлю, система ідентифікує БПЛА і додає його технічні характеристики (модель, дальність, швидкість тощо).

Після завершення аналізу система виводить основні параметри БПЛА: позицію (координати X, Y, Z), висоту польоту, швидкість руху, тип БПЛА (за базою даних). Отримані дані можуть бути передані до систем протиповітряної оборони, центрів моніторингу або автоматизованих систем управління безпекою.

Список використаних джерел

1. Yang S., Luo Y., Miao W., Ge C., Sun W., Luo C. RF Signal-Based UAV Detection and Mode Classification: A Joint Feature Engineering Generator and Multi-Channel Deep Neural Network Approach. *Entropy*. 2021. 23. 1678. <https://doi.org/10.3390/e23121678>.
2. Yang X., Huo K., Jiang W., Zhao J., Qiu Z. A passive radar system for detecting UAV based on the OFDM communication signal. In *Proceedings of the 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), Shanghai, China, 8–11 August 2016*. P. 2757–2762. DOI: 10.1109/PIERS.2016.7735118.
3. Dadrass Javan F., Samadzadegan F., Gholamshahi M., Ashatari Mahini F. A Modified YOLOv4 Deep Learning Network for Vision-Based UAV Recognition. *Drones*. 2022. 6. 160. <https://doi.org/10.3390/drones6070160>.
4. Kim B. H., Khan D., Bohak C., Choi W., Lee H. J., Kim M. Y. V-RBNN Based Small Drone Detection in Augmented Datasets for 3D LADAR System. *Sensors*. 2018. 18. 3825. <https://doi.org/10.3390/s18113825>.
5. Sedunov A., Salloum H., Sutin A., Sedunov N., Tsyuryupa S. UAV Passive Acoustic Detection. In *Proceedings of the 2018 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST), Woburn, MA, USA, 23–24 October 2018*. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/THS.2018.8574129>.
6. Kartashov V. M., Oleynikov V. N., Sheyko S. A., Babkin S. I., Koryttsev I. V., Zubkov O. V., Anokhin M. A. Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles. *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*. 2018. V. 77(10). P. 915-924. DOI:10.30837/rt.2018.4.195.21.
7. Bernardini A., Mangiatordi F., Pallotti E., Capodiferro L., Ugo Bordon F. Drone detection by acoustic signature identification. *Electronic Imaging, Imaging and Multimedia Analytics in a Web and Mobile World*. 2017. P. 60-64. DOI:10.2352/ISSN.2470-1173.2017.10.IMAWM-168.
8. Al-Emadi S., Al-Ali A., Mohammad A., Al-Ali A. Audio based drone detection and identification using deep learning. In *Proceedings of the 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC), Tangier, Morocco, 24–28 June 2019*. P. 459–464. DOI:10.1109/IWCMC.2019.8766732.
9. Dumitrescu C., Minea M., Costea I. M., Cosmin Chiva I., Semenescu A. Development of an acoustic system for UAV detection. *Sensors*. 2020. 20, 4870. <https://doi.org/10.3390/s20174870>.
10. Rawlinson A. The defence of London, 1915-1918. London : Andrew M., 1924. P. 267.
11. Douglas S. Acoustic Location and Sound Mirrors. 2011. URL: <https://web.archive.org/web/20110112224410/http://www.aqpl43.dsl.pipex.com/MUSEUM/COMMS/ear/ear.htm> (дата звернення: 11.05.2023).
12. Bateman H. Mathematical theory of sound ranging. *Monthly Weather Review*. 1918. Vol. 46, no. 1. P. 4–11.
13. Sound Ranging. *Nature*. 1919. Vol. 104, no. 2611. P. 278–280.

14. Cheung K. W., So H. C., Ma W. K., Chan Y. T. A Constrained Least Squares Approach to Mobile Positioning: Algorithms and Optimality. *Eurasip J. Adv. Signal Process.* 2006. 2006. 20858. DOI:10.1155/ASP/2006/20858.
15. Wu L., Liu Z. M., Huang Z. T. Deep Convolution Network for Direction of Arrival Estimation With Sparse Prior. *IEEE Signal Process. Lett.* 2019. 26. 1688–1692. DOI:10.1109/LSP.2019.2945115.
16. Yang K., An J., Bu X., Sun G. Constrained Total Least-Squares Location Algorithm Using Time-Difference-of-Arrival Measurements. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2010. 59. 1558–1562. DOI:10.1109/TVT.2009.2037509.
17. Гісцев А. Ю. Алгоритми розпізнавання акустичних сигналів БПЛА. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/10d2f4e5-d28a-45c3-8443-e557c9c2f650/content>.
18. Бугайов М. Алгоритм виявлення акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів. *Вісник ЖДТУ*. 2015. № 3 (74). С. 46–53.
19. Даник Ю. Г., Пулеко І. В., Бугайов М. В. Виявлення безпілотних літальних апаратів на основі аналізу акустичних та радіолокаційних сигналів. *Вісник ЖДТУ*. 2014. № 4 (71). С. 71–80.
20. Усенко В. Шум повітряних гвинтів. *Наукова думка сучасності і майбутнього*. 2019. 36. 26. Ч. 1. С. 3–5.21.
21. Al-Emadi S. A., Al-Ali A. K., Al-Ali A., Mohamed A. Audio Based Drone Detection and Identification using Deep Learning. In *Proceedings of the IWCMC 2019 Vehicular Symposium (IWCMC-VehicularCom 2019)*, Tangier, Morocco, 24–28 June 2019. DOI: 10.18372/2310-5461.41.13542.

Acoustic airspace monitoring system: a new level of unmanned aerial vehicle detection

Abstract. The paper presents a comprehensive project for a device based on an acoustic airspace monitoring system, designed to address the pressing issue of timely detection of unmanned aerial vehicles (UAVs). With the rapid development of technology, UAVs are becoming an increasingly widespread threat to privacy, commercial security and public order. Particular attention is paid to the protection of commercial and public facilities, which determines the specific requirements for the detection system.

The study analyses existing methods of UAV detection, including their strengths and weaknesses. When selecting a detection system, special attention was paid to the ability to detect small UAVs at short distances, which is critical for ensuring safety in urban areas and confined spaces. Acoustic systems, due to their relatively low cost, ease of integration, and ability to effectively detect sound signatures, are a promising solution for such tasks.

The designed detection system uses rotating directional microphones to improve the accuracy of sound source determination. The principle of operation of the system is described, which is based on the detection and analysis of acoustic signals emitted by UAVs during flight.

During the study, detailed calculations of the accuracy and positioning errors of UAVs were performed using angular (AoA) and time (TDoA) location methods. The influence of various factors, such as atmospheric conditions (temperature, wind), on the accuracy of acoustic detection is analysed, and methods for compensating for their negative impact are proposed.

In addition, the application of modern machine learning methods, in particular convolutional and recurrent neural networks, for the detection and classification of UAVs by their acoustic signatures was considered. This allows not only to detect the presence of UAVs, but also to identify their type and model, which is important for responding to potential threats.

The results of the study demonstrate the possibility of creating an effective and reliable acoustic airspace monitoring system focused on protecting commercial and public facilities by timely detection of small UAVs at short distances.

Keywords: acoustic system, airspace monitoring, unmanned aerial vehicles, angle of arrival (AoA), time difference of arrival (TDoA).

Канєвський Максим Володимирович, здобувач другого рівня вищої освіти кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: kanevskiy2024@kart.edu.ua.

Семикрас Андрій Ігорович, здобувач першого рівня вищої освіти, кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: asemikras714@gmail.com.

Змій Сергій Олексійович, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: zmii.sergii@kart.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-7974-5181>. Scopus Author ID: 57192821601.

Щебликіна Олена Вікторівна, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, PhD, Український державний університет залізничного транспорту, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: sov@kart.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8304-2921>. Scopus Author ID: 57203618885.

Maksym Kanovskii, second-level higher education student of the Department of Automation and Computerized Train Control, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kanevskiy2024@kart.edu.ua.

Andrii Semykras, first-level higher education student of the Department of Automation and Computerized Train Control, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: asemikras714@gmail.com.

Serhii Zmii, Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: zmii.sergii@kart.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-7974-5181>. Scopus Author ID: 57192821601.

Olena Shcheblykina, Associate Professor, Department of Automation and Computerized Train Control, PhD, Ukrainian State University of Railway Transport, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: sov@kart.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8304-2921>. Scopus Author ID: 57203618885.