

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології в приладобудуванні»**

**спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології в
робототехніці»**

**на тему: «Автоматизована система визначення положення літальних
апаратів у просторі з використанням акустичних методів»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи ПМ-341мп

Жиров Євген Павлович _____

Керівник:

доктор педагогічних наук, кандидат технічних наук

Протасов Анатолій Георгійович _____

Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент (-ка) _____

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174«Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології в робототехніці»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Жиров Євген Павлович

1. Тема дисертації «Автоматизована система визначення положення літальних апаратів у просторі з використанням акустичних методів», науковий керівник Протасов Анатолій Георгійович, доктор педагогічних наук, кандидат технічних наук, професор затверджені наказом по університету від «04» листопада 2025р. № 4792-с
2. Термін подання студентом дисертації
3. Об'єкт дослідження: Процес визначення положення літальних апаратів у просторі.
4. Предмет дослідження: Метод акустичного моніторингу положення літальних апаратів у просторі.

5. Мета МД: підвищення надійності виявлення та локалізації літальних апаратів в умовах, коли використання традиційних методів локації ускладнено.

6. Завдання дослідження: провести аналітичний огляд літератури по темі дисертації, розробити архітектуру, алгоритм, програму реалізації моделі локалізації літальних апаратів у просторі. Провести дослідження розробленої моделі, оцінити точність визначення типів і координат літальних апаратів.

7. Зміст пояснювальної записки:

Вступ

1. Аналітичний огляд

2. Огляд властивостей акустичних сигналів, та методів їх обробки

3. Розробка архітектури системи, вибір апаратно-програмного забезпечення

4. Програмна реалізація та експериментальні дослідження

5. Розробка стартап-проєкту

6. Висновки

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формулювання завдання дисертації		
2	Аналітичний огляд		
3	Розробка архітектури системи		
4	Підбір апаратно-програмного забезпечення		
5	Програмна реалізація моделі		
6	Експериментальні дослідження		

Студент

Євген ЖИРОВ

Керівник

Анатолій ПРОТАСОВ

Реферат

Актуальність теми

Розпізнавання положення об'єктів у просторі є важливою задачею в сучасних технологіях безпеки, навігації та автоматизації. Використання звукового випромінювання для визначення позиції об'єктів відкриває нові перспективи у випадках, де традиційні методи є обмеженими або неефективними. Акустичні методи дозволяють визначати положення об'єктів у складних умовах, таких як погана видимість, наявність фізичних перешкод або відсутність прямої видимості.

Водночас виявлення літальних апаратів у реальному часі стикається з низкою викликів: Складність обробки сигналів у середовищі з високим рівнем шуму. Наявність відбитих звукових хвиль, що можуть спотворювати дані. Залежність акустичних характеристик сигналів від погодних умов.

Мета роботи

Підвищення надійності виявлення та локалізації літальних апаратів в умовах, коли використання традиційних методів локації ускладнено.

Для реалізації мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Провести аналітичний огляд літератури по темі дисертації
2. Розробити архітектуру, алгоритм, програму реалізації моделі локалізації літальних апаратів у просторі.
3. Провести дослідження розробленої моделі, оцінити точність визначення координат літальних апаратів.
4. Провести дослідження модулю нейронної мережі визначення типів літальних апаратів.

Об'єкт дослідження

Процес визначення положення літальних апаратів у просторі.

Предмет дослідження

Метод акустичного моніторингу положення літальних апаратів у просторі.

Наукова новизна

Удосконалення методів локалізації літальних апаратів у просторі шляхом інтеграції сучасних моделей нейронних мереж із методами обробки звукових сигналів. Запропоновано новий підхід до обробки акустичних сигналів у середовищах із високим рівнем шуму та відбиттів, що дозволить підвищити точність визначення координат літальних апаратів.

Структура роботи. Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки та графічних матеріалів. Пояснювальна записка містить вступ, 5 розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. Обсяг роботи: пояснювальна записка – __ аркушів формату А4, __ ілюстрацій, __ таблиць, було опрацьовано __ джерела.

Практичне практична цінність результатів дослідження

Створення програмної реалізації моделі пасивної локації, яка дозволяє здійснювати високоточний розрахунок координат повітряних цілей методом різниці часу прибуття сигналу. Розроблена система може бути використана як база для створення мобільних комплексів акустичної розвідки, а також як дослідницька платформа для тестування нових алгоритмів цифрової обробки сигналів в умовах обмежених обчислювальних ресурсів вбудованих систем.

Ключові слова: акустичний моніторинг, TDOA, GCC-PHAT, БПЛА, нейронні мережі, NVIDIA Jetson, FPGA, Edge AI, стартап-проект.

ABSTRACT

Relevance of the Topic

Spatial object positioning is a crucial task in modern security, navigation, and automation technologies. The use of acoustic emission to determine the position of objects opens new perspectives in cases where traditional methods are limited or ineffective. Acoustic methods allow for determining the position of objects in complex conditions, such as poor visibility, the presence of physical obstacles, or a lack of direct line of sight.

At the same time, real-time detection of aerial vehicles faces a number of challenges: Complexity of signal processing in high-noise environments. Presence of reflected sound waves (reverberation) that can distort data. Dependence of acoustic signal characteristics on weather conditions.

Aim of the Work

To increase the reliability of detection and localization of aerial vehicles in conditions where the use of traditional location methods is hindered.

To achieve this aim, the following tasks must be performed:

1. Conduct an analytical review of the literature on the dissertation topic.
2. Develop the architecture, algorithm, and software implementation of the model for spatial localization of aerial vehicles.
3. Conduct research on the developed model and evaluate the accuracy of determining the coordinates of aerial vehicles.
4. Conduct research on the neural network module for determining the types of aerial vehicles.

Object of Research

The process of determining the spatial position of aerial vehicles.

Subject of Research

The method of acoustic monitoring of the spatial position of aerial vehicles.

Scientific Novelty

Improvement of methods for spatial localization of aerial vehicles by integrating modern neural network models with sound signal processing techniques. A new approach to acoustic signal processing in environments with high noise levels and reflections is proposed, which will increase the accuracy of determining the coordinates of aerial vehicles.

Structure of the Work The Master's thesis consists of an explanatory note and graphic materials. The explanatory note contains an introduction, 5 chapters, conclusions, a list of references, and appendices. Volume of the work: explanatory note – __ A4 pages, _ illustrations, _ tables; _ sources were processed.

Practical Value of Research Results

Creation of a software implementation of a passive location model, which allows for high-precision calculation of air target coordinates using the Time Difference of Arrival (TDOA) method. The developed system can be used as a basis for creating mobile acoustic reconnaissance complexes, as well as a research platform for testing new digital signal processing algorithms under conditions of limited computing resources of embedded systems.

Keywords: acoustic monitoring, TDOA, GCC-PHAT, UAV, neural networks, NVIDIA Jetson, FPGA, Edge AI, startup project.

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ	11
ВСТУП	14
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	15
1.1 Сучасні методи визначення положення літальних апаратів у просторі	15
1.1.1 Радіолокаційні методи	16
1.1.2 Пасивні радіоелектронні методи	18
1.1.3 Оптичні та оптико-електронні методи	21
1.1.4 Тепловізійні (інфрачервоні) методи	23
1.1.5 Лазерні методи (LIDAR)	25
1.1.6 Акустичні методи визначення положення	27
1.2. Огляд літературних джерел та сучасного стану проблеми	29
1.2.1. Методи локалізації джерел звуку	29
1.2.3. Апаратна реалізація	31
Висновки до огляду літератури	31
1.3 Висновки	32
РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА МЕТОДІВ ОБРОБКИ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ	35
2.1 Фізичні основи акустичного випромінювання	35
2.1.1 Поняття акустичних хвиль	35
2.1.3. Акустичне випромінювання	38
2.1.4 Інтенсивність і рівень звукового тиску	39
2.1.5 Поширення акустичних хвиль у повітрі	40
2.1.6 Акустичні поля літальних апаратів	42
2.2.1 Аналого-цифрове перетворення	45
2.3 Методи фільтрації та зменшення шуму	47
2.3.1 Частотна фільтрація	47
2.3.2 Спектральне віднімання	48
2.3.3 Адаптивні методи	49
2.4. Спектральний аналіз та виділення ознак	49
2.4.1. Швидке перетворення Фур'є	50
2.4.2. Спектрограмний аналіз	50
2.4.3 Кепстральний аналіз	51
2.5. Методи визначення напрямку прибуття сигналу	52
2.5.1. Метод формування променя	53
2.5.2. Методи високої роздільної здатності	53
2.6. Методи визначення місцезнаходження	54
2.6.1. Геометрія різницево-далекомірного методу	55
2.6.2. Оцінка часової затримки	56

2.7.	Алгоритми класифікації та розпізнавання	56
2.7.1.	Класичні методи машинного навчання	57
2.7.2.	Глибоке навчання та нейронні мережі	58
2.7.3.	Оцінка ефективності класифікації	58
2.8.	Висновки до розділу	59
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ ВИБІР АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ		61
3.1	Логічна схема та середовище моделювання	61
3.2	Вибір апаратної частини системи	63
3.2.1	Сенсорний модуль	63
3.2.2	Модуль збору даних	65
3.2.3	Обчислювальний модуль	68
3.2.3.1	Огляд обчислювального модулю на базі Raspberry Pi 5	69
3.2.3.2	Огляд обчислювального модулю на базі GMKtec K6	71
3.2.3.3	Огляд обчислювального модулю на базі Nvidia Jetson Orin Nano	72
3.3	Висновки до розділу	74
РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ		76
4.1	Реалізація та дослідження алгоритму локалізації	76
4.1.1.	Налаштування віртуальної решітки та моделювання вхідних даних	76
4.1.2	Програмна реалізація алгоритму узагальненої взаємної кореляції з фазовим перетворенням	77
4.1.3	Рішення системи різниці часу прибуття сигналів та аналіз похибок Рішення системи різниці часу прибуття сигналів	77
4.2	Розробка та навчання згорткової нейронної мережі	78
4.2.1.	Підготовка тренувальної вибірки та аугментація даних	79
4.2.2.	Архітектура згорткової нейронної мережі	79
4.2.3.	Методологія навчання та валідація	81
4.3	Експериментальна модель визначення координат	81
4.3.1.	Структура та функціональні блоки	82
4.3.2	Функціональне призначення	83
4.3.3	Результати та оцінка точності моделі	83
4.4	Експериментальна модель визначення типу літального апарату	85
4.5	Експериментальна частина	88
4.5.1	Аналіз точності локалізації в різних діапазонах рівнів шуму	88
4.5.2	Аналіз стійкості модулю класифікації	91
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ		93
5.1	Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проєкту	93
5.2	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту	98

5.2 Розробка ринкової стратегії та маркетингової програми проекту	106
5.4 Розробка маркетингової програми та планування стартап-проекту	110
Висновки до розділу 5	117
ВИСНОВКИ	119
ДОДАТОК 1	121
ДОДАТОК 2	125
ДОДАТОК 3	129
ДОДАТОК 4	131

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

Ось відформатований список, де кожне скорочення починається з нового рядка. Ви можете просто скопіювати цей текст і вставити у свою роботу.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЦП — Аналого-цифровий перетворювач

БПЛА — Безпілотний літальний апарат

БПФ — Швидке перетворення Фур'є

ВЧ — Високі частоти

ГП — Графічний процесор

ДБ (dB) — Децибел

ЕПР — Ефективна площа розсіювання

ЗНМ — Згорткова нейронна мережа

ІЧ — Інфрачервоний діапазон

ЛА — Літальний апарат

НЧ — Низькі частоти

ОЕС — Оптико-електронні системи

ОЗП — Оперативний запам'ятовувальний пристрій

ПЗЗ — Прилад із зарядовим зв'язком

ПЛІС — Програмована логічна інтегральна схема

ППО — Протиповітряна оборона

РЕП — Радіоелектронні перешкоди

РЕР — Радіоелектронна розвідка

РЛС — Радіолокаційна станція

СКО — Середньоквадратичне відхилення

ЦОС — Цифрова обробка сигналів

ШІ — Штучний інтелект

ADC (Analog-to-Digital Converter) — Аналого-цифровий перетворювач

AI (Artificial Intelligence) — Штучний інтелект

BPF (Blade Passage Frequency) — Частота проходження лопатей

CNN (Convolutional Neural Network) — Згортова нейронна мережа

CPU (Central Processing Unit) — Центральний процесор

CW (Continuous Wave) — Безперервне випромінювання

DL (Deep Learning) — Глибоке навчання

DOA (Direction of Arrival) — Напрямок прибуття

DSP (Digital Signal Processing) — Цифрова обробка сигналів

FFT (Fast Fourier Transform) — Швидке перетворення Фур'є

FPGA (Field-Programmable Gate Array) — Програмувана логічна інтегральна схема

FPV (First Person View) — Вид від першої особи

GCC-PHAT (Generalized Cross-Correlation with Phase Transform) — Узагальнена взаємна кореляція з фазовим перетворенням

GNSS (Global Navigation Satellite System) — Глобальна навігаційна супутникова система

GPU (Graphics Processing Unit) — Графічний процесор

I2S (Inter-IC Sound) — Інтерфейс передачі цифрового аудіо

LIDAR (LIght Detection And Ranging) — Лазерний метод визначення відстані

LWIR (Long-Wave Infrared) — Довгохвильовий інфрачервоний діапазон

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) — Мікроелектромеханічні системи

MFCC (Mel-Frequency Cepstral Coefficients) — Мел-кепстральні коефіцієнти

ML (Machine Learning) — Машинне навчання

MWIR (Mid-Wave Infrared) — Середньохвильовий інфрачервоний діапазон

NLOS (Non-Line-of-Sight) — Умови відсутності прямої видимості

PCL (Passive Coherent Location) — Пасивна когерентна локація

RADAR (RAdio Detection And Ranging) — Радіолокація

ReLU (Rectified Linear Unit) — Функція активації (випрямляч)

RMSE (Root Mean Square Error) — Корінь середньоквадратичної помилки

ROC (Receiver Operating Characteristic) — Робоча характеристика приймача (крива помилок)

SNR (Signal-to-Noise Ratio) — Співвідношення сигнал/шум

SoC (System on Chip) — Система на кристалі

SPL (Sound Pressure Level) — Рівень звукового тиску

STFT (Short-Time Fourier Transform) — Короткочасове перетворення Фур'є

TDOA (Time Difference of Arrival) — Різниця часу прибуття

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) — Безпілотний літальний апарат

VAD (Voice Activity Detection) — Детектор акустичної активності

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Акустичні методи дослідження речовин: Навч. посібник. - Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2008. - 234 с.
- 2 Інженер БПЛА. Базовий курс. Модуль 1. Теоретична база для майбутнього інженера БПЛА. Prometheus. URL: <https://prometheus.org.ua/prometheus-free/drone-engineering-intro/> (дата звернення: 13.10.2025).
- 3 Getting Started with Audio Data: Processing Techniques and Key Challenges. Medium. URL: https://medium.com/@zilliz_learn/getting-started-with-audio-data-processing-techniques-and-key-challenges-420dc5233163 (дата звернення: 03.06.2025).
- 4 Коломієць Р.О. Отримання, перетворення та обробка біосигналів. Навчальний посібник / Р.О. Коломієць, Т.М. Нікітчук, Д.С. Морозов – Державний університет «Житомирська політехніка», 2024 р. – 294 с.
- 5 Військові дрони. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) / Александер Стілвелл; пер. з англ. Андрія Сарікова. — К. : Знання, 2025. — 144 с.
6. Васюта К. С., Тесленко О. В., Купрій В. М., Малішев О. А. Основи побудови радіолокаційних засобів розвідки повітряного простору Видавництво. Скіф. Мова. Українська. ISBN. 978-966-370-884-3. Рік видання. 2023. - 212 с.
- 7 Протасов, А. Г. Технології теплового неруйнівного контролю [Електронний ресурс] : підручник / А. Г. Протасов, Ю. Ю. Лисенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 133 с..
8. Прилади і методи акустичного контролю : навч.посіб. / Г. М. Сучков, К. Л. Ноздрачова, Е. В. Міщанчук, В. М. Єрощенко. - Харків : НТУ «ХП», 2011.-220 с.
9. Муравйов О. В. Перспективи розвитку технологій та підвищення рівня автономності БПЛА / О. В. Муравйов, І. О. Довбиш, Р. М. Галаган, Г. А. Богдан, А. С. Момот // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2023. – Том. 34 (73), №2. – С. 199-205. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/32>.

10. Баженов В. Г. Електроніка. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А. С. Момот ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
11. Маєвський С.М. Координатна реєстрація в дефектоскопії / С.М. Маєвський, К.М. Серий. – Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2011. – 116с.
12. Вельміскін Д.І. Теоретичні основи радіолокації: Конспект лекцій. – Дніпропетровськ: "Економіка", 2005. – 128 с.
13. Tensorflow документація URL https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf (Дата звернення 28.10.2025)
14. Муравйов, О. В. Передача даних та сучасні методи обробки сигналів. Практикум [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / О. В. Муравйов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського, – Електронні текстові дані (1 файл: 7,05 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 55 с.
15. Knapp, C, Carter, G. (1976). The generalized correlation method for estimation of time delay.
16. Benesty, J., Chen, J., & Huang, Y. (2008). *Microphone Array Signal Processing*. Springer Science & Business Media.
17. Valin, J. M., Michaud, F., & Rouat, J. (2007). Robust localization and tracking of simultaneous moving sound sources using beamforming and particle filtering. *Robotics and Autonomous Systems*, 55(3), 216-228.
18. Al-Emadi, S., Al-Ali, A., & Al-Ali, A. (2019). Audio-based drone detection and identification using deep learning techniques. 2019 IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 443-448.
19. Al-Emadi S., Al-Ali A., Al-Ali A. Audio-based drone detection and identification using deep learning techniques. *2019 IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. Tangier, 2019. P. 443–448.

20. Jeon S., Shin J. W., Lee Y. J. Empirical study of drone sound detection in real-life environment with deep neural networks. 2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). Kos, 2017. P. 1858–1862.
21. Seo J., Park Y. Drone detection using convolutional neural networks with acoustic STFT and MFCC features. IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 222735–222743.
22. Shi X. et al. Real-time acoustic source localization on an embedded system. Applied Acoustics. 2018. Vol. 129. P. 344–355.
23. Mittal S. A survey on FPGA-based accelerators for convolutional neural networks. Neural Computing and Applications. 2019. Vol. 32, No. 4. P. 1109–1139.
24. NVIDIA Corporation. Jetson Orin Nano Developer Kit User Guide. NVIDIA Documentation, 2023. URL: <https://developer.nvidia.com/embedded/learn/get-started-jetson-orin-nano-devkit> (дата звернення: 01.12.2025).
25. Муравйов О. В. Перспективи розвитку технологій та підвищення рівня автономності БПЛА / О.В. Муравйов, І.О. Довбиш, Р.М. Галаган, Г.А. Богдан, А.С. Момот // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2023. – Том. 34 (73). – № 2. – С. 199-205.
26. Довбиш І. О. Силові установки та джерела енергії сучасних БПЛА / І.О. Довбиш, О.В. Муравйов, Р.М. Галаган, Г.А. Богдан, А.С. Момот // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2023. – Том. 34 (73). – № 5. – С. 16-21.
27. Довбиш І.О., Муравйов О. В. Залежність алгоритму вибору лідера рою від рівня автономності БПЛА. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2023. – Том 34 (73), №6. – С. 84-90.
28. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.
29. Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
30. Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.