

СИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ

У. Ю. Дзелендзяк, М. Ю. Пазинюк

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра комп’ютеризованих систем автоматички

E-mail: uliana.y.dzelendziak@lpnu.ua, mykhailo.pazyniuk.knm.2019@lpnu.ua

© Дзелендзяк У. Ю., Пазинюк М. Ю., 2023

У статті наведено сучасну систему виявлення літальних апаратів на основі аналізу звукових сигналів, розроблену з використанням технологій нейромереж та алгоритмів звукового аналізу. Під час розроблення системи використано новітні технології, як-от акустичні датчики, одноплатні мікрокомп’ютери та зовнішні пристрої для оброблення і зберігання інформації, одержуваної з довкілля, що забезпечує швидке і точне виявлення літальних апаратів у повітрі. Залучення цих технологій дало змогу покращити виявлення несанкціонованих літальних апаратів, що є вагомим внеском у безпеку окремих об’єктів і цілих держав.

Ключові слова: система виявлення літальних апаратів; нейронні мережі; безпека; акустичні датчики; одноплатні мікрокомп’ютери.

Вступ

Повітряні об’єкти, такі як безпілотні літальні апарати (БПЛА), стають дедалі поширенішими в нашому світі. Їхнє використання важливе в найрізноманітніших галузях – від відео- і фотознімання до захисту громадської безпеки та дослідження віддалених територій. Однак зростає ризик зіткнення з несанкціонованими літальними апаратами, що може становити загрозу безпеці.

Системи виявлення літальних апаратів на основі аналізу звукових сигналів стають надзвичайно важливим інструментом для вирішення цих проблем. Їх можна використовувати для виявлення нелегальних дронів, моніторингу активності в обмежених зонах, дослідження польотів військових літаків або інших літальних апаратів, а також для забезпечення безпеки на великих масових заходах.

У статті досліджено й описано різні методи та підходи до виявлення літальних апаратів на основі аналізу звукових сигналів і розглянуто їхні можливі застосування у різних галузях. Розуміння важливості цього дослідження дасть нам змогу краще оцінити, як ці технології можуть сприяти забезпеченню безпеки та приватності в сучасному світі, насиченому літальними апаратами.

В останні кілька років з’явилися нові технології, що дають змогу вдосконалити системи виявлення повітряних об’єктів, такі як одноплатні мікрокомп’ютери чи нейронні мережі розпізнавання звуку.

Метою статті є розроблення сучасної системи виявлення повітряних суден із використанням згаданих вище технологій. Це важливий крок на шляху підвищення авіаційної безпеки та захисту від потенційно небезпечних ситуацій, які можуть виникнути унаслідок несанкціонованого використання повітряних суден.

Однак зауважимо, що використання цих технологій у системах виявлення БПЛА пов’язане з ризиками і проблемами, такими як збирання й оброблення великих обсягів даних і мережева безпека.

Аналіз досліджень і публікацій

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) з'явилися понад століття тому, але лише в останні роки їх почали широко використовувати в різних галузях. Із появою доступних і простих у використанні систем керування та розвитком технологій автопілотування БПЛА стали ще популярнішими серед цивільних і військових користувачів.

Однак із розвитком технології БПЛА з'явилися і нові виклики: однією із найсерйозніших загроз для використання БПЛА є незаконне використання цих пристроїв у злочинних цілях, таких як шпигунство, тероризм і шахрайство. Такі випадки стають все поширенішими, тому системи виявлення БПЛА мають велике значення.

Системи виявлення літальних апаратів не нові й існують на ринку вже кілька десятиліть, починаючи від систем виявлення за звуком і зображенням і закінчуючи складними системами, що поєднують кілька критеріїв для розпізнавання таких об'єктів. Найважливішим критерієм є призначення цих систем. Це пов'язано з тим, що успішне застосування цих пристроїв залежить від місця їхнього встановлення, розв'язуваної задачі та багатьох інших чинників.

Оскільки в системах, розроблених під час цього дослідження, використано тільки виявлення звуку із різними підходами, ми розглянули рішення на різних етапах реалізації з виокремленням їхніх переваг і недоліків.

Перша проаналізована робота [1] описує практично аналогічну операцію виявлення звуку, за допомогою системи, що виконує швидке перетворення Фур'є (ШПФ) на вибірці даних у реальному часі та використовує для виявлення безпілотників два різні методи: машинне навчання на основі зображення (PIE) та К найближчих сусідів (KNN). Здійснено експерименти із використанням двох методів. Дослідники досягли точності 83 % і 61 % із використанням методів PIE і KNN відповідно.

У роботі [1] реалізовано ефективне програмне рішення, яке швидко і точно визначає наявність безпілотника в повітрі поблизу системи зі звукоуловлювачами. Серед недоліків – відсутність візуалізації та централізованої системи для обміну даними.

У роботі [2] запропоновано ідею автентифікації безпілотників на основі частотного кепстрального коефіцієнта (MFCC) з використанням акустичного підпису, фізично вбудованого в кожен безпілотник. В експериментах із вісьмома безпілотниками порівнювали точність автентифікації за допомогою різних функцій характеристики. Використовували різні акустичні характеристики: MFCC, дельта-MFCC (DMFCC). В експериментах із 24 безпілотниками порівнювали ефективність автентифікації восьми різних методів машинного навчання з погляду їхньої реакції в умовах адитивного білого гауссового шуму (AWGN) з різним відношенням сигнал/шум (SNR). Результати показали, що дискримінантний аналіз другого порядку (QDA) забезпечив найвищий середній коефіцієнт відновлення (94,19 %) під час виявлення відомих безпілотників та третій за значенням середній коефіцієнт відновлення (82,35 %) під час виявлення невідомих безпілотників, проте датчики не охоплювали акустичні характеристики об'єктів із двигуном внутрішнього згорання.

Третя проаналізована система – SoundUAV [3], яка пропонує метод виявлення безпілотників за допомогою зняття характеристик з унікального звуку двигуна кожного безпілотника. Важливим недоліком, що заважає досягненню бажаних результатів цього дослідження є те, що SoundUAV вимагає посадки дрона всередині док-станції, а внутрішній мікрофон записує тільки шум двигуна.

У четвертій роботі детально проаналізовано роботу зі згортковими нейронними мережами. Результати цієї роботи використано для підбору оптимального алгоритму тренування нейронної мережі для поставлених завдань. У роботі зазначено, що згорткові нейронні мережі (CNN) є одним із основних типів нейронних мереж, використовуваних для розпізнавання та класифікації об'єктів. Вхідні дані для згорткових нейронних мереж надаються через зображення. Для цього у нашій роботі здійснено конвертацію аудіофайлів у візуальне представлення їхніх ознак. Одна із основних цілей проаналізованого дослідження – зокрема, допомогти науковцям зрозуміти, де є прогалини в їхніх дослідженнях, і підсумувати складові згорткових нейронних мереж, їхні ролі та інші важливі питання.

Існує також низка закритих систем [5], даних про які немає у вільному доступі, тому єдиний спосіб аналізування їхньої роботи – придбати одну з них або отримати доступ до неї.

Роботи [7] та [8] є більш теоретичними та описують спроектовану систему, наближену до описаної у цій статті, проте вона відрізняється наявністю не лише засобів аудіоаналізу. Такі системи є комплекснішими, дорожчими та габаритнішими, що робить їх непристосованими для застосування в умовах обмеженого простору та необхідності забезпечення мобільності.

Цілі та мета дослідження

Мета дослідження – розроблення системи виявлення літальних апаратів із використанням технологій неймереж та алгоритмів звукового аналізу, що забезпечує безпеку в повітрі й на землі.

До завдань, які потрібно вирішити, працюючи над системою, належать експериментальні дослідження та визначення теоретичних принципів.

Удосконалено систему виявлення повітряних цілей на основі дворівневої програми розпізнавання із використанням нейронних мереж і алгоритмів акустичного аналізу за часом з подальшою візуалізацією положення цільових об'єктів.

Результати цього дослідження будуть корисними широкому колу зацікавлених осіб, разом з державними органами, підрядниками та іншими організаціями, що займаються питаннями авіаційної безпеки та розвитку технологій звукового аналізу.

Засоби розробки системи

Для реалізації системи виявлення звуку в літаку використано мову програмування Python, яка дає змогу швидко та ефективно виконувати такі завдання, як збирання звукових даних із датчиків. Після того, як аудіодані отримані, для виявлення літаків можна застосувати різні алгоритми аналізу та оброблення звуку. Наприклад, за допомогою бібліотеки librosa можна отримати спектрограму звуку. Спектрограма відображає спектральні характеристики як функцію часу. Машинне навчання і методи штучного інтелекту можна застосувати для класифікації спектрограми і виявлення літаків.

Під час розроблення використано Torch і Torchvision – дві відомі бібліотеки для роботи з нейронними мережами та комп'ютерним зором на мові Python. Torch – фреймворк машинного навчання, що ґрунтується на обчисленнях на графічному процесорі й надає широкі функціональні можливості для роботи з нейронними мережами. В Torch вбудовано багато функцій для побудови, навчання та реалізації моделей нейронних мереж. Torchvision – це розширення Torch, яке надає набір інструментів для роботи із комп'ютерним зором. Бібліотека містить низку поширених неймережових моделей, зокрема resnet34, які можна використовувати для розпізнавання мови. Ці моделі вже мають попередньо навчені ваги, що полегшує їх використання і дає швидші результати.

Враховуючи потребу розгортання сервера для приймання запитів на AWS EC2, Flask, один з найпопулярніших вебфреймворків Python, ідеально підходить для цієї ролі. Він забезпечує простий і легкий спосіб реалізації логіки маршрутизації для опрацювання запитів. Його використано для створення API, що може взаємодіяти між Raspberry Pi, який вибрано як сенсор, та AWS EC2. Фреймворк також надає можливість обробляти відповіді сервера та надсилати сповіщення про виявлення БПЛА назад на Raspberry Pi та інші клієнти.

Для створення інтерактивних карт у вебдодатках використовують Dash Leaflet, який є розширенням фреймворку Dash. Dash Leaflet застосовано для створення візуальних карт, що показують датчики виявлення звуку.

У задачі виявлення літальних апаратів за допомогою акустичного аналізу використано бібліотеку PyAudio, яка зарекомендувала себе як важливий інструмент для збирання та оброблення аудіоданих. PyAudio надає можливість зчитувати аудіодані з аудіопристроїв (наприклад, мікрофонів) та аудіофайлів, а також записувати аудіо; вона підтримує різні формати, зокрема WAV, AIFF і AU; за допомогою PyAudio можна легко і в режимі реального часу збирати аудіодані з аудіофайлів, а також обробляти аудіодані. Можна змінювати такі параметри аудіо, як частота дискретизації, розмір

дискретизації та кількість каналів. Отже, аудіо можна адаптувати до потреб завдання або використувати для подальшого аналізу та оброблення.

Під час розроблення системи виявлення БПЛА за звуком використано бібліотеку Matplotlib, яка є чудовим інструментом для візуалізації даних мовою програмування Python. Вона надає широкий спектр функцій для створення різних типів графіків, таких як лінійні графіки, гістограми, кругові діаграми, а також використана для графічного відображення звукових сигналів. Наприклад, для аналізу акустичних характеристик літака побудовано графік залежності амплітуди звуку від часу. Крім того, можна було візуалізувати спектрограми, що показують розподіл енергії звуку в частотно-часовому діапазоні.

Для аналізу та опрацювання звукових даних використана бібліотека Librosa. Вона пропонує широкий спектр методів для вилучення акустичних характеристик звуку, урахуваючи спектрограми, мелспектрограми, хромограми та спектральні функції. Ці функції відображають розподіл енергії звуку в часо-частотному просторі, їх можна використати для аналізу акустичних властивостей літальних об'єктів.

Реалізація системи виявлення літальних апаратів

Одним із ключових аспектів інтеграції системи виявлення літальних апаратів на основі аналізу звукових сигналів є технологічна складова. Проаналізуємо технологічні аспекти цієї системи та їх вплив на ефективність та надійність, розглянувши питання, пов'язані з обробленням даних, алгоритмами, обчислювальними потужностями та програмним забезпеченням, необхідним для забезпечення коректної роботи системи виявлення літальних апаратів на основі звуку.

Нейромережа [4] системи ґрунтується на моделі ResNet34 з бібліотеки Torch, вибраної для цього дослідження із кількох причин. ResNet34 – це нейронна мережа, яка може ефективно навчатися на складних вибірках даних і отримувати глибше представлення аудіосигналу, що дає змогу досягати кращих результатів у розпізнаванні звуку цільових об'єктів.

Модель використовує різні типи шарів і функцій, урахуваючи Linear, Conv2d, CrossEntropy Loss і Adam Optimiser. Лінійний шар використовується для згортки ознак і класифікації аудіосигналів; Conv2d – для вилучення важливих характеристик аудіоданих; CrossEntropyLoss слугує функцією втрат для порівняння передбачених міток із фактичними мітками класів; Adam – це алгоритм оптимізації, який оновлює ваги мережі під час процесу навчання для зменшення втрат.

Використовуючи ці шари та алгоритми в моделі ResNet34, мережа може ефективно навчатися для класифікації аудіофайлів. Вона вчиться з високою точністю розпізнавати і класифікувати звукові патерни, пов'язані з різними типами літаків, дронів та інших типів літальних апаратів. Поєднання цих шарів і алгоритмів дає змогу моделі адаптуватися до різних звукових умов і досягати високих результатів.

На рис. 1 наведено візуалізацію функції втрат під час тренування та валідації відповідно. Бачимо, що кількість ітерацій прямо впливає на якість тренування нейромережі, а також те, що графік спадний, а це підтверджує правильність побудови алгоритму тренування. Відповідно до загального спрощеного принципу тренування такого типу нейронних мереж, після досягнення певної кількості ітерацій тренування стає малоефективним, а іноді погано впливає на кінцеву модель, тож важливо визначити оптимальну їх кількість.

Оскільки метою пропонованої системи максимізація точності виявлення об'єктів, алгоритм DTW [6] введено як додатковий елемент для забезпечення схожості записаного звуку з одним із раніше збережених зразків.

Цей алгоритм дає змогу порівнювати подібність двох аудіофайлів за шкалою від 0 до 1. Як приклад, згідно із результатами DTW для кожного п'ятисекундного запису із 31 опрацьованих, які використано у дослідженні, всі записи, крім № 23, зроблено на різній висоті польоту DJI Mavic 3. Запис № 1 – це той самий квадрокоптер, його використано для порівняння з іншими, відповідно подібність дорівнює 0. Запис № 23 – шум вітру, вибраний для демонстрації здатності алгоритму

розрізняти несхожі та цільові записи, відповідно значення подібності дорівнює 1, що означає “зовсім не схожий”. В результаті досягнуто бажаного рівня подібності: значення від 0,34 до 0,63 є прийнятними і додатково підтверджують, що об’єкт, розпізнаний нейромережею, коректний. Такі значення отримано після роботи алгоритму над рештою аудіозаписів.

На рис. 2 наведено архітектуру розробленої системи, яка складається з апаратного забезпечення, що використовується безпосередньо в польових умовах для виконання завдань, передбачених для системи, та програмного забезпечення, встановленого на віддаленому сервері.

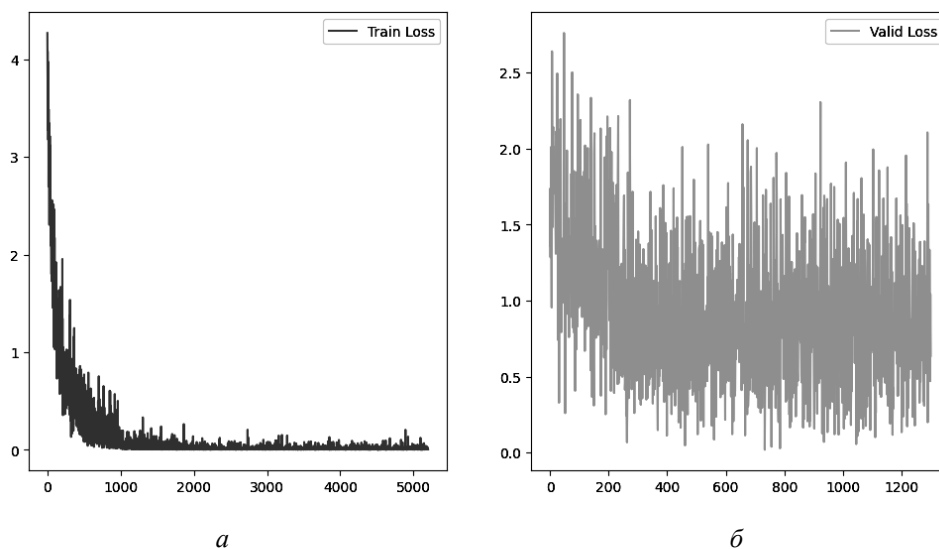


Рис. 1. Візуалізація функції втрат за кількістю ітерацій:
а – під час тренування; б – під час валідації

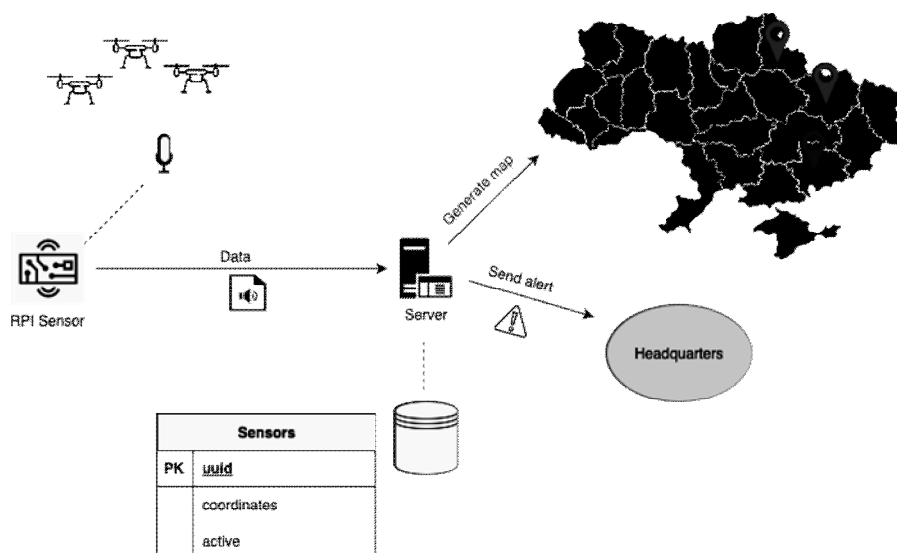


Рис. 2. Архітектура системи

Датчик (сенсор) являє собою Raspberry Pi Zero W з мікрофоном і (опціонально) платою розширення, яка може бути оснащена SIM-картою для передавання даних по каналах 3G/4G.

Мікроконтролер містить програму, написану на мові Python, основне завдання якої – фіксувати підвищення рівня звуку, генерувати кінцевий аудіофайл і передавати дані на сервер. У майбутньому систему можна буде розширити за рахунок часткового розпізнавання безпосередньо на мікрокомп’ютері й (за бажанням) також передавати дані на сервер.

Висновки

Отримані результати свідчать про успішність розробленої системи розпізнавання повітряних цілей за звуковими даними. Висока точність розпізнавання – понад 75 % для нового зразка – робить систему ефективним інструментом досягнення безпеки та контролю повітряного простору. Важливо зазначити, що цю систему протестовано у реальних умовах, саме тому наведений вище результат є меншим, ніж у теоретичних аналогів, наприклад, як у роботі [7] та [8], де ці показники становили понад 90 %. Розробляючи систему, на відміну від описаних у згаданих роботах, ми зосередились на портативності та низькій собівартості, що зробить її доступнішою та зручнішою під час розміщення та транспортування. Це досягається зокрема відсутністю додаткових датчиків та використанням енергоефективнішого мікрокомп'ютера.

Систему також легко розгортати і масштабувати за допомогою хмарних сервісів, що підвищує гнучкість і доступність для різних застосувань. Розроблене обладнання є компактним, його нескладно встановити в різних місцях. Систему можна використовувати в різноманітних секторах, таких як національна безпека, охорона приватних підприємств та прикордонна безпека. Розроблену систему виявлення літальних апаратів, за умови її вдосконалення, можна використати для знешкодження нелегальних об'єктів у повітряному просторі.

Звуковий аналіз може виявляти потенційно небажані апарати, використовувані для шпигунства або порушення особистого простору. Ця можливість стає все важливішою в сучасному світі, де конфіденційність і приватність великої кількості людей та організацій опиняються під загрозою через поширення літальних апаратів. Використання штучного інтелекту для аналізу звуку може істотно підвищити точність та швидкість виявлення. Технології нейронних мереж та глибокого навчання можуть допомогти автоматизувати процес ідентифікації різних типів літальних апаратів.

Під час тестування розробленої системи отримано задовільні результати, які уможливають її вдосконалення, наприклад, за рахунок додавання датчиків відстеження переміщення об'єктів та розроблення алгоритмів візуального розпізнавання цілей.

Можлива також інтеграція цієї системи у вже створені рішення із забезпечення безпеки у повітрі, наприклад, у склад засобів протиповітряної оборони. Враховуючи наявність сучасних інтерфейсів передавання даних, можливі передавання важливої інформації до інших засобів зчитування та візуалізації.

Список літератури

1. J. Kim, C. Park, J. Ahn, Y. Ko, J. Park and J. C. Gallagher, "Real-time UAV sound detection and analysis system", 2017 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), Glassboro, NJ, USA, 2017, 1–5. DOI: 10.1109/SAS.2017.7894058.
2. Yufeng Diao, Yichi Zhang, Guodong Zhao, and Mohamed Khamis (2022). Drone Authentication via Acoustic Fingerprint. In *Proceedings of the 38th Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC '22)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 658–668. DOI: 10.1145/3564625.3564653.
3. Ramesh, Soundarya & Pathier, Thomas & Han, Jun. (2019). SoundUAV: Towards Delivery Drone Authentication via Acoustic Noise Fingerprinting, 27–32. DOI: 10.1145/3325421.3329768.
4. Taye M. M. *Theoretical Understanding of Convolutional Neural Network: Concepts, Architectures, Applications, Future Directions*. Computation. 2023; 11(3):52. DOI: 10.3390/computation11030052.
5. Yufeng Diao, Yichi Zhang, Guodong Zhao, and Mohamed Khamis (2022). Drone Authentication via Acoustic Fingerprint. In *Proceedings of the 38th Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC '22)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 658–668. DOI: 10.1145/3564625.3564653.
6. Müller, Meinard (2007). Dynamic time warping. *Information Retrieval for Music and Motion*, 2, 69–84. DOI: 10.1007/978-3-540-74048-3_4.
7. Wang, Yizong & Ma, Hao & Wei, Sijie & Zhang, Shaoting & Feng, Zhiyong & Wei, Zhiqing (2019). Sound Detection and Alarm System of Unmanned Aerial Vehicle: *Proceedings of ICCD 2017*. DOI: 10.1007/978-981-10-8944-2_103.
8. Jamil S., Fawad, Rahman M., Ullah A., Badnava S., Forsat M., Mirjavadi S. S. *Malicious UAV Detection Using Integrated Audio and Visual Features for Public Safety Applications*. *Sensors*, 2020; 20(14):3923. DOI: 10.3390/s20143923.

AERIAL VEHICLES DETECTION SYSTEM BASED ON ANALYSIS OF SOUND SIGNALS

U. Dzelendzyak, M. Pazyniuk

Lviv Polytechnic National University,
Department of Computerized Automatic Systems

© *Dzelendzyak U., Pazyniuk M., 2023*

The article presents a modern aircraft detection system based on the analysis of sound signals, developed using neural networks and sound analysis algorithms. During the development of the system, the latest technologies were used, such as acoustic sensors, single-board microcomputers and external devices for processing and storing information received from the environment, which ensures fast and accurate detection of aircraft in the air. The involvement of such technologies made it possible to improve the detection of unauthorized aircraft, which will make a significant contribution to the security of individual objects and entire states.

Key words: aerial vehicles detection system; neural networks; security; acoustical sensors; single-board microcomputers.