

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТЕОРІЯ КОДУВАННЯ

УДК 004.4

А. О. Азарова, Д. С. Щур

ПОБУДОВА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ
АУДИОЛОКАЦІЇ ЗАГРОЗ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. У статті розглянуто процес побудови системи пошуку напрямку джерела звуку із використанням методу кінцевих різниць для оброблення оцифрованих даних звукових сигналів. Здійснено модифікацію методу кінцевих різниць шляхом використання взаємно кореляційної функції, яка спрощує оброблення оцифрованого сигналу за рахунок покращення алгоритму розрахунку і переходу від диференційного до числового формату вхідних даних, що значно зменшує кількість розрахунків та спрощує їх. Запропоновано статистичне оброблення отриманих результатів для зменшення похибки пошуку абсолютного кута до програмно відтвореного джерела звуку. Було розроблено ПЗ, що уможливило комп'ютерну реалізацію системи аудіолокації на базі принципів об'єктно-орієнтованого програмування, що використовує оцифровані дані сигналів для розрахунків і моделювання результатів роботи алгоритму. Створення програми відбувалося на платформі ОС Windows у середовищі Windows Studio з дотриманням парадигм об'єктно-орієнтованого програмування. Застосування авторами модифікованого алгоритму у процесі програмної реалізації звукометричної системи дозволило проаналізувати роботу методу та розробити конфігурації приймачів, які дозволяють підвищити точність результатів. Експериментальні (лабораторні) дослідження розробленої системи за умови використання обгрунтованої авторами конфігурації та статистично оброблених даних дозволили отримати результати пошуку напрямку до джерела звуку, що мають похибку менше 1°. Основним науковим результатом проведеного дослідження є удосконалення алгоритмів оброблення даних аудіолокаційного пошуку, що, на відміну від існуючих підходів, дозволяє на основі застосування взаємно кореляційної функції та подальшого її математичного коригування підвищити точність такого процесу. Практична цінність отриманих результатів полягає в легкій адаптації розробленої та протестованої в лабораторних умовах звукометричної системи для роботи у військових польових умовах.

Ключові слова: звукометрична система, аудіолокація, метод кінцевих різниць, взаємно кореляційна функція, кореляція, абсолютний кут, джерело звуку, дисперсія.

Abstract. The article discusses the process of building a system for finding the direction of a sound source using the finite difference method for processing digitized sound signal data. The finite difference method has been modified by using the cross-correlation function which simplifies the processing of the digitized signal due to the improvement of the calculation algorithm and the transition from the differential to the numerical format of the input data which significantly reduces the number of calculations and simplifies them. Statistical processing of the obtained results is proposed to reduce the error of finding the absolute angle to the software-generated sound source. The software was developed which enables the computer implementation of the audio location system based on the principles of object-oriented programming. It uses digitized signal data for calculations and modeling of the results of the algorithm. The program was created on the Windows OS platform in the Windows Studio environment in compliance with object-oriented programming paradigms. The use of the modified algorithm by the authors in the process of software implementation of the sound-metric system made it possible to analyze the operation of the method and develop receiver configurations that allow increasing the accuracy of the results. Experimental (laboratory) studies of the developed system under the condition of using a configuration justified by the authors and statistically processed data, made it possible to obtain results of searching the direction of the sound source with an error of less than 1°. The main scientific result of the conducted research is the improvement of data processing algorithms for audio-location search which, unlike existing approaches, allows to increase the accuracy of such a process based on the application of the mutual correlation function and its subsequent mathematical adjustment. The practical value of the obtained results is an easy adaptation of the sound-metric system developed and tested in laboratory conditions for operation in military field conditions.

Key words: audiometric system, audio location, finite difference method, cross-correlation function, correlation, absolute angle, sound source, dispersion.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-5-12>.

Вступ

Існують різні способи розвідки на місцевості, практично кожен з яких потребує мінімальної дистанції до досліджуваного об'єкту. Реалізація такого процесу здійснюється засобами аудіолокації, що полегшує та прискорює його. Вона представляє собою спеціальний спосіб розвідки, який часто використовують військові різних країн з метою визначення напрямку розташування джерела звуку.

Розпізнавання джерела звуку розкриває потужні можливості для ведення ефективних військових операцій та роботи правоохоронних органів. Аудіолокація (звукова розвідка) в поєднанні із системами безпеки дозволяють точно визначити місцезнаходження загрози, що, у свою чергу, уможливило мінімізацію потенційної шкоди для людини.

Серед провідних дослідників у галузі аудіолокації слід зазначити тих, хто стояли біля витоків цієї науки, зокрема, Бенуа М. А., Валлаха Г., Джеффреса Л., Маха Е., Ньюмена Е. Б., Стівенса С. С., Стретта Д. В., а також сучасних науковців: Бугайова М. В., Кочана Р. В., Крупельницького Л. В., Ніколайчука Я. М., Сяофей Лі, Трембача Р. Б., Хаман Мануеля, Хун'ян Сіна та ін. [1–11].

Зауважимо, що переважна більшість дослідників працювала над розпізнаванням напрямку звуку як процесу, що відбувається в мозку людини. Напрацьований досвід у цій площині був трансформований Лю Ц. із біологічної площини в апаратну: він розробив систему, що використовує мікрофони для пошуку джерел звуку. Висвітлення подальших досліджень у напрямку покращення чи використання процесу локалізації звуку в науковій літературі є слабким, оскільки вивченням цього процесу зайнялися відомі світові

корпорації, що співпрацюють із військовими, що, у свою чергу, спричинило засекречування таких розробок. Сьогодні вони надають лише готові до використання системи, які є дорогими та монолітними, що ускладнює їх експлуатацію та усунення несправностей.

Актуальність

У теперішній час існує чимало компаній, що спеціалізуються на військовому обладнанні, в тому числі й на виробництві та розробленні аудіолокаційних військових систем. Прикладами таких компаній є QinetiQ, Raytheon, Acoem-Metavib, Microflown Avisa, Ultra Electronics та ін. Разом із тим, розробки цих компаній не позбавлені численних недоліків, зокрема: зависока ціна, мала дальність ефективного використання (здебільшого до 400 м), складність систем та їх експлуатації, обслуговування обладнання і розміри унеможливають їх масове виробництво. Вище перелічені недоліки не дозволяють придбання та використання таких систем для вирішення важливих військових задач в різних країнах, зокрема й в Україні. Разом і тим, наша країна зараз конче потребує подібних систем, що дозволило б значно підвищити ефективність ведення бою та роботи українських розвідників.

Отже, актуальними є подальші дослідження у напрямку розроблення власної аудіолокаційної системи, яка позбавлена описаних вище недоліків.

Мета

Мета статті полягає в підвищенні точності аудіолокації загроз шляхом розроблення та застосування відповідної системи, що реалізує модифікований алгоритм із використанням взаємно кореляційного оброблення оцифрованих сигналів.

Задачі

1. Модифікувати та застосувати метод кінцевих різниць для підвищення точності процесу аудіолокації загроз.
2. Покращити метод за допомогою використання взаємно кореляційної функції.
3. Розробити конфігурації приймачів для системи аудіолокації.
4. Виконати статистичне коригування отриманих на базі складеної системи результатів.

Структурна будова системи аудіолокації загроз

Складовими елементами пропонованої авторами системи аудіолокації є:

- блок джерела звуку;
- блок приймача звуку;
- блок перетворювача аналогового сигналу на цифровий;
- блок оброблення даних;
- блок візуалізації результатів.

Блок джерела звуку є окремим елементом, що використовується для відтворення процесу надходження звуку. Він пов'язаний лише із блоком прийому сигналів даних, що передаються. Варто зазначити, що блок джерела звуку по суті не входить до складу аудіолокаційної системи, він належить до звукометричної системи взагалі, при цьому авторами системи здійснюється моделювання процесу надходження звуку з унікальною затримкою до певного приймача (із запропонованої конфігурації приймачів), а отже необхідно долучити джерело звуку до схеми програмної моделі звукометричної системи.

Блок приймача звуку опрацьовує звуковий сигнал, що надійшов від блоку джерела звуку, перетворює його на аналоговий та передає на блок аналогово-цифрового перетворювача, оскільки методи оброблення даних, що використовуються, передбачають роботу саме із цифровими сигналами.

Для спрощення розрахунків і прискорення оброблення сигналів було прийнято рішення моделювати передавання звуку в форматі оцифрованих даних, що дозволяє пропустити повторення перетворень звуку і прискорити процес аудіолокації. За польових умов випробовування системи ці чинники необхідно враховувати і використовувати АЦП.

Блок оброблення даних виконує процес розрахунку напрямку кута до джерела звуку шляхом використання покращеного методу кінцевих різниць, що буде подано нижче. У результаті обчислень отримаємо набори даних для кожного вхідного набору оцифрованих даних звукового сигналу, з яких визначається шуканий кут до джерела звуку. Отримані результати виводяться на пристрій виводу інформації, який в даному випадку був монітором пристрою, на якому проводились розрахунки.

Отже, структурну будову системи аудіолокації представлено на рис. 1.

Модифікація методу кінцевих різниць

Для визначення напрямку джерела звуку необхідно, використовуючи за основу оцифрований сигнал, розробити метод оброблення вхідних сигналів. Використані оцифровані дані сигналу являють собою файл із розширенням .Wav. Цей формат вирізняється серед інших тим, що дозволяє зберігати бітовий потік аудіосигналу. Якщо дослідити дані, що містяться у файлі, розкодувати їх та відобразити графічно фрагмент, то отримаємо такий сигнал, що використовувався для роботи (рис. 2).



Рисунок 1 – Структурна будова системи аудіолокації загроз

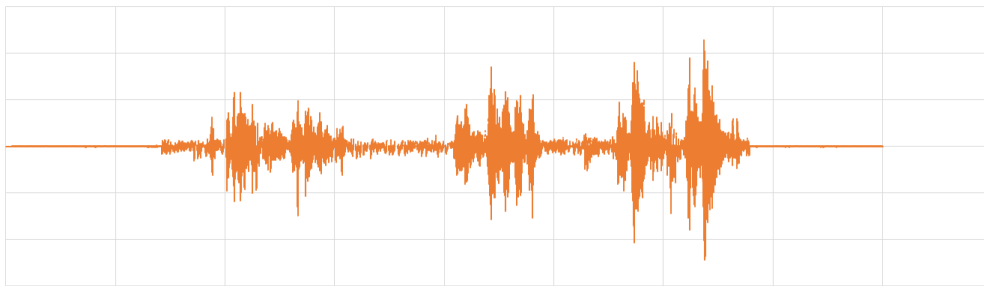


Рисунок 2 – Представлення сигналу з файлу

На базі вхідних даних розпочнемо розроблення системи, що моделює затримки в надходженні сигналів, у основу якої покладемо метод кінцевих різниць у часовій області. Використання цього методу було обрано через те, що традиційно локалізація джерела звуку потребує на використання диференційного числення, а даний метод, за умови алгебраїчного розв'язання диференційних систем рівнянь, дозволяє знайти шукані значення функції з меншими витратами часу.

Для виконання цих розрахунків необхідно:

- задати область розрахунків, сітку, граничні умови, які відповідають умові задачі і можуть бути поглинаючими або періодичними;
- задати джерело хвиль;
- згенерувати кінцеві в часі хвилі;
- перевести в частотне представлення отриманих значень.

Разом із тим, виходячи зі специфіки роботи з оцифрованим сигналом, автори пропонують здійснити певну модифікацію описаного методу. Лічильній області буде відповідати час, а граничні умови та сітка не використовуватимуться, оскільки програмна реалізація системи локалізації не використовуватиме стандартний метод кінцевих різниць, а його модифіковану під програмні розрахунки версію. Джерелом є файл із записаними значеннями. Оскільки файл містить у собі дані справжнього сигналу, то маємо кінцеву в часі хвилю. Розрахунок за допомогою використання перетворень Фур'є не використовуватиметься, натомість метод модифікується завдяки використанню взаємно корельованої функції (ВКФ) двох сигналів. Таким чином, алгоритм розрахунку фактично реалізує процес оброблення масивів вхідних даних.

Використання ВКФ двох сигналів для модифікації методу кінцевих різниць

Для проведення розрахунків процесу локалізації джерела звуку необхідно створити початкові вхідні умови. Оскільки ВКФ розраховується для двох сигналів, то алгоритм буде працювати лише за наявності двох вхідних наборів даних, що відповідають одному і тому ж звуковому сигналу, проте, які надійшли на різні два приймачі в конфігурації.

Промодельоємо процесу пошуку звуку, що йде від джерела до приймачів. У результаті отримаємо два набори даних. Графічно їх можна представити так, як зображено на рис. 3.

Із рис. 3 видно, що наявні 2 сигнали, що зміщені один щодо іншого. Оскільки в реальності один і той самий звук надходить до кожного із мікрофонів через певний час, то той мікрофон, що є ближчим до джерела звуку, і отримає сигнал раніше. Із рис. 3 також можна помітити, що графіки не є ідентичними, це результат штучної зміни даних, яка моделює певний ступінь зашумленості, так як в дійсності звукові сигнали, які отримують мікрофони, матимуть спотворення.

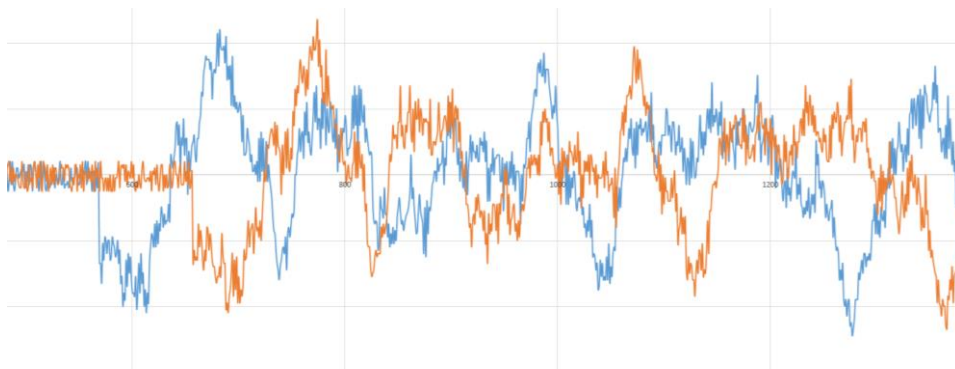


Рисунок 3 – Змодельовані сигнали, що надійшли на два мікрофони

Отже, застосуємо ВКФ для модифікації методу кінцевих різниць, що дозволяє запропонувати авторам статті систему аудіолокації загроз. Щоб визначити кореляцію сигналів, необхідно розрахувати результат значень $(x(t), y(t))$ при аргументах (t, t') . Використаємо для цього таку залежність

$$K_{xy}(t, t') = M[\dot{x}(t)\dot{y}(t')].$$

Знайшовши результат цієї залежності, отримаємо момент кореляції для (t, t') . Проте, для визначення результатів, що відповідають найбільшій кореляції, необхідно провести також розрахунок для $((t - n, t'), \dots, (t - 1, t'), (t + 1, t'), (t + 2, t'), \dots, (t + n, t'))$. Для пошуку n скористаємося залежністю

$$n = F \frac{l}{v},$$

де n – кількість необхідних елементів для розрахунку;

l – відстань між мікрофонами;

F – частота дискретизації приймачів;

v – швидкість поширення звуку у просторі.

Провести розрахунки потрібно для $2n$ випадків, оскільки зміщенням може бути як перший масив, так і другий, то потрібно перевірити кореляцію першого на основі другого n разів і перевірити кореляцію другого на основі першого n разів. Після розрахунку ВКФ отримаємо набір значень, що відображено на рис. 4.

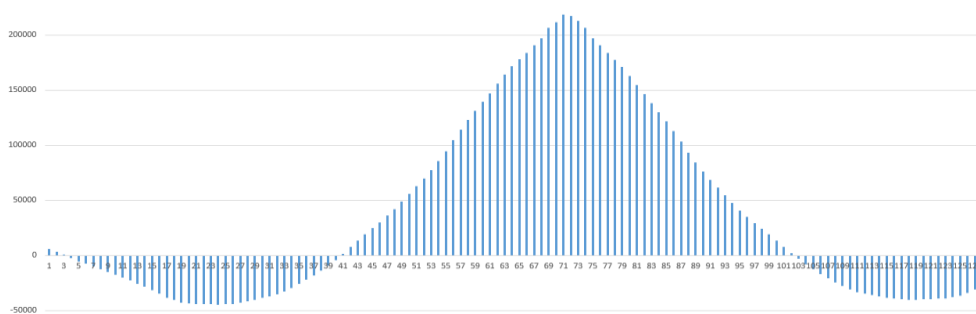


Рисунок 4 – Значення ВКФ для двох наборів даних

Отже, маємо графік із максимумом, що відповідає значенню 71, що і є шуканою величиною. На рис. 4 схематично зображено процес локалізації джерела звуку.

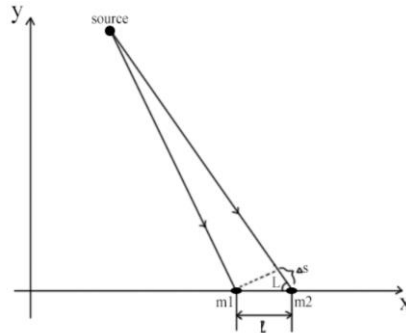


Рисунок 5 – Схематичне зображення процесу локалізації звуку

Із рис. 5 бачимо, що при надходженні звуку від джерела до приймачів m_1 та m_2 звук проходить різну відстань, знайдемо цю різницю так:

$$\Delta S = l \cdot \cos(\alpha).$$

Оскільки $\Delta S = vt$, а $t = T \cdot n$, де $T = \frac{1}{F_{discr}}$, то отримаємо таку залежність:

$$\cos(\alpha) = \frac{v \cdot n}{l \cdot F_{discr}},$$

де v – швидкість поширення звуку;

n – індекс найбільшого значення результуючого масиву;

l – дистанція між приймачами у парі;

F_{discr} – частота дискретизації.

Завдяки розрахованій вище залежності для косинуса і властивості арккосинуса $\cos(y) = x$ та, враховуючи, що $\arccos(x) = y$, знайдемо арккосинус кута.

Побудуємо 2 кола із центрами, яким відповідатимуть мікрофони із мікрофонної пари і визначимо координати можливих точок, що відповідатимуть напрямом до джерела звуку. Отримаємо 2 точки перетинів кіл. Через неоднорідність функції арккосинуса, позиція джерела відносно пари мікрофонів може суттєво впливати на точність розрахунків, наведених у табл.1.

Таблиця 1 – Неоднорідність функції арккосинуса

Зсув n	$\cos(a)$	a в радіанах	a в градусах
0	0	1,570796	90
1	0,125	1,445468	82,81924
2	0,25	1,318116	75,52249
3	0,375	1,1864	67,97569
4	0,5	1,047198	60
5	0,625	0,895665	51,31781
6	0,75	0,722734	41,40962
7	0,875	0,505361	28,95502
8	1	0	0

Підвищення точності розрахунків

Оскільки позиція джерела відносно пари мікрофонів позначається на точності розрахунків, то наступним кроком є підвищення точності визначення цих точок на колі. Для цього автори здійснили розробку мікрофонних конфігурацій, що мають 4 вершини та 6 мікрофонних пар. Розглянемо одну з найбільш точних, за результатами лабораторних досліджень, дельтоїдну конфігурацію. Її вигляд та розташування пар на кутовому діапазоні 360о наведено на рис. 6. Кожна пара мікрофонів показує найкращий результат при кутах відносно бази, значення яких становлять 75о – 105о та 165о – 195о.



Рисунок 6 – Мікрофонна конфігурація: а) дельтоїдна; б) розташування пар конфігурації на кутовому діапазоні

Оскільки на кожен пару припадає по 2 можливих точки на колі, які являють собою джерела звуку, то потрібно визначити, яке із двох значень точок є хибним. Під час оброблення результатів алгоритму завжди є значення кутів, які від абсолютного кута майже не відрізняються, або ж мають несуттєву похибку від 2 до 10 градусів. Найгірший результат має та пара, щодо якої джерело звуку знаходиться найближче до 0о чи 90о. Оскільки для правильного кута розкид значень є найменшим, то слід визначити найменшу дисперсію. У результаті роботи методу було отримано 26, тобто 64 варіанти комбінацій результатів пошуку кутів. Визначивши найменшу дисперсію, визначимо і правильні шукані значення кутів для кожної пари.

Фінальне значення абсолютного кута визначається як середнє арифметичне всіх кутів за найменшої дисперсії. Виходячи з особливості тригонометричної функції арккосинуса, маємо таке значення кута у одній із пар, яке вносить відчутну похибку в результат. Для того, щоб мінімізувати вплив такої пари, значення знайденого нею кута відкидається і результат розраховується на основі середнього арифметичного 5 пар, що залишилися. Це дозволяє отримати похибку у визначенні абсолютного кута, що є меншою за 2о.

Результати проведених авторами статті лабораторних досліджень за різних співвідношень шум-сигнал (SNR – signal-to-noise ratio), різних відстанях та кутах розташування джерела звуку щодо розробленої системи подано в табл. 2 – табл. 4.

Таблиця 2 – Вплив рівню шуму на результати

SNR, dB	Справжній кут, °	Відстань, м	Похибка конфігурації, °
45	80	500	0,3
25	80	500	0,3
5	80	500	0,5
-15	80	500	1,8

Таблиця 3 – Результати для різних кутів до джерела

SNR, dB	Справжній кут, °	Відстань, м	Похибка, °
45dB	90°	440	0,7
45dB	85°	440	0,3
45dB	80°	440	1,3
45dB	75°	440	0,8
45dB	70°	440	0,1
45dB	65°	440	0,2
45dB	60°	440	0,9

Таблиця 4 – Вплив відстаней до джерела на визначення кута

SNR, dB	Справжній кут, °	Відстань, м	Похибка, °
45dB	60°	500	0,5
45dB	60°	450	0,6
45dB	60°	400	0,4
45dB	60°	350	0,5
45dB	60°	300	0,8
45dB	60°	250	0,3
45dB	60°	200	0,8
45dB	59,4°	150	0,6
45dB	61,4°	100	0,4
45dB	60,7°	50	0,3

Висновки

Перевагами запропонованої системи є модульність складових, простота їх заміни, дешевизна створення, точність, можливість подальшого використання розробленої системи в умовах бойових дій за умови правильної модифікації.

Отже, в основних результатах дослідження, що висвітлюється в статті є:

- здійснено структурне моделювання та програмну реалізацію системи аудіолокації, побудованої на основі модифікованого методу кінцевих різниць;
- покращено метод кінцевих різниць шляхом використання ВКФ та адаптації до автоматизації запропонованої авторами системи;
- обґрунтовано конфігурації приймачів, що дозволяють підвищити точність роботи такої системи;
- проаналізовано результати роботи системи, що уможливило подальше статистичне оброблення даних для підвищення точності результатів;
- виконано перевірку готової моделі звукометричної системи в лабораторних умовах.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробленні системи аудіолокації з використанням удосконалених алгоритмів оброблення даних аудіолокаційного пошуку, що, на відміну від існуючих підходів, дозволяє на основі застосування взаємно кореляційної функції та подальшого її математичного коригування підвищити точність такого процесу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в легкій адаптації розробленої та протестованої в лабораторних умовах звукометричної системи для роботи у військових польових умовах.

Список літератури

- [1] М. В. Бугайов, «Алгоритм виявлення акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів», *Вісник ЖДТУ*, т. 74, № 3, с. 46–53, 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://vtn.ztu.edu.ua/article/view/65584>. Дата звернення: 19 груд. 2022.
- [2] Р. В. Кочан, О. В. Кочан та Б. Р. Трембач, «Методична похибка пеленгування цілі системою звукової артилерійської розвідки», *Вимірювальна техніка та метрологія*, т. 80, № 3, с. 10–14, 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ena.lpnu.ua/items/fa4d4479-7a42-4987-904c-6f49084cc264>. Дата звернення: 19 груд. 2022.
- [3] Р. В. Кочан, Б. Р. Трембач та Р. Б. Трембач, «Концепція розподіленої автоматичної системи звукової артилерійської розвідки на базі стільникового зв'язку», *Вісник Хмельницького національного університету*, т. 2, с. 101–104, 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2016/2016_2/\(235\)%202016-2-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2016/2016_2/(235)%202016-2-t.pdf). Дата звернення: 19 груд. 2022.
- [4] Я. М. Николайчук, *Теорія джерел інформації*. Тернопіль: ТНЕУ, 2008. 536 с.
- [5] A. Dehghan Firoozabadi, P. Irarrazaval, P. Adasme, D. Zabala-Blanco, P. P. Játiva та C. Azurdia-Meza, «3D Multiple Sound Source Localization by Proposed T-Shaped Circular Distributed Microphone Arrays in Combination with GEVD and Adaptive GCC-PHAT/ML Algorithms», *Sensors*, т. 22, № 3, с. 1011, січ. 2022. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s22031011>. Дата звернення: 20 груд. 2022.
- [6] M. Nahmann, E. Fernandez-Grande, H. Gunawan та P. Gerstoft, «Sound source localization using multiple ad hoc distributed microphone arrays», *JASA Express Lett.*, т. 7, № 2, с. 22–28, 2022. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1121/10.0011811>. Дата звернення: 19 груд. 2022.
- [7] Jia M, Wu Y, Bao C та Wang J, «Multiple Sound Sources Localization with Frame-by-Frame Component Removal of Statistically Dominant Source», *Sensors (Basel)*, т. 11, № 18, с. 36 – 43, 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s18113613>. Дата звернення: 19 груд. 2022.
- [8] X. Li, L. Girin, F. Bodeig та R. Horaud, «Reverberant Sound Localization with a Robot Head Based on Direct-Path Relative Transfer Function». [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://arxiv.org/https://arxiv.org/pdf/2012.03574v1.pdf>. Дата звернення 19 груд. 2022.
- [9] H. Xing, X. Yang, X. Ji та H. Wu, «A fusion algorithm of passive sound source localization based on the two-plane four-element cross array», *Review of Scientific Instruments*, т. 91, № 3, с. 23–33, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1063/1.5080761>. Дата звернення: 19 груд. 2022.
- [10] K. Xu, W. Liu та M. Wang, «Sound source localization based on improved adaptive beamforming», *Journal of Physics: Conference Series*, т. 1971, № 1, с. 012063, лип. 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1971/1/012063>. Дата звернення: 20 груд. 2022.
- [11] L. Zhang, D. Ding, D. Yang, J. Wang та J. Shi, «Sound Source Localization Using Non-Conformal Surface Sound Field Transformation Based on Spherical Harmonic Wave Decomposition», *Sensors*, т. 17, № 5, с. 1087, трав. 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s17051087>. Дата звернення: 20 груд. 2022.

Стаття надійшла: 20.12.2022.

References

- [1] M. V. Bugayev, «Algorithm for detection of acoustic signals of unmanned aerial vehicles», *Bulletin of ZHTU*, vol. 74, no. 3, p. 46–53, 2016. [Online]. Available: <http://vtn.ztu.edu.ua/article/view/65584>. Accessed on: 20. 12. 2022 [in Ukrainian].
- [2] R. V. Kochan, B. R. Trembach, O. V. Kochan, «Metodychna pokhybka pelenhuvannia tsili systemoiu zvukovoi artyleriiskoi rozvidky» [Methodical error of target bearing by the sound artillery reconnaissance system], *Measuring technique and metrology*, vol. 80, no. 3, p. 10–14, 2019. [Online]. Available: <https://ena.lpnu.ua/items/fa4d4479-7a42-4987-904c-6f49084cc264>. Accessed on: 20. 12. 2022 [in Ukrainian].
- [3] R. V. Kochan, B. R. Trembach, and R. B. Trembach «Kontseptsiia rozpodilenoї avtomatychnoi systemy zvukovoi artyleriiskoi rozvidky na bazi stil-nykovoho zviazku» [The concept of a distributed automatic system of sound artillery reconnaissance based on table-to-arm communication], *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, vol. 2, p. 101–104, 2016. [Online]. Available: [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2016/2016_2/\(235\)%202016-2-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2016/2016_2/(235)%202016-2-t.pdf). Accessed on: 20. 12. 2022 [in Ukrainian].
- [4] Y. M. Nikolaychuk, *Teoriia dzherel informatsii [Theory of sources of information]*. Ternopil: TNEU, 2008. 536 p. [in Ukrainian].
- [5] A. Dehghan Firoozabadi, P. Irarrazaval, P. Adasme, D. Zabala-Blanco, P. P. Játiva та C. Azurdia-Meza «3D Multiple Sound Source Localization by Proposed T-Shaped Circular Distributed Microphone Arrays in Combination with GEVD and Adaptive GCC-PHAT/ML Algorithms», *Sensors*, vol. 22, no. 3, p. 1011, Jan. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s22031011>. Accessed on: 20. 12. 2022.
- [6] M. Hahmann, E. Fernandez-Grande, H. Gunawan та P. Gerstoft, «Sound source localization using multiple ad hoc distributed microphone arrays», *JASA Express Lett.*, v. 7, no. 2, p. 22–28, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1121/10.0011811>. Accessed on: 20. 12. 2022.
- [7] Jia M, Wu Y, Bao C та Wang J., «Multiple Sound Sources Localization with Frame-by-Frame Component Removal of Statistically Dominant Source», *Sensors (Basel)*, vol. 11, no. 18, p. 36–43, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s18113613>. Accessed on: 20. 12. 2022.
- [8] X. Li, L. Girin, F. Bading та R. Horaud, «Reverberant Sound Localization with a Robot Head Based on Direct-Path Relative Transfer Function». [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2012.03574v1.pdf>. Accessed on: 20. 12. 2022.
- [9] H. Xing, X. Yang, X. Ji та H. Wu, «A fusion algorithm of passive sound source localization based on the two-plane four-element cross array», *Review of Scientific Instruments*, vol. 91, no. 3, p. 23–33, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.5080761>. Accessed on: 20. 12. 2022.
- [10] K. Xu, W. Liu та M. Wang, «Sound source localization based on improved adaptive beamforming», *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1971, no. 1, p. 012063, July 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1971/1/012063>. Accessed on: 20. 12. 2022.
- [11] L. Zhang, D. Ding, D. Yang, J. Wang та J. Shi, «Sound Source Localization Using Non-Conformal Surface Sound Field Transformation Based on Spherical Harmonic Wave Decomposition», *Sensors*, vol. 17, no. 5, p. 1087, May 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s17051087>. Accessed on: 20. 12. 2022.

Відомості про авторів

Азарова Анжеліка Олександрівна – кандидат технічних наук, професор.

Щур Дмитро Сергійович – студент групи ІКІ-21м факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії.

A. O. Azarova, D. S. Shchur

CONSTRUCTION OF THE AUTOMATED AUDIOLOCATION SYSTEM OF THREATS

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia