

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-20>

УДК 534.6:004.52

Загинайло Євгеній Олександрович, аспірант

<https://orcid.org/0009-0004-5109-2053>

Приходченко Сергій Дмитрович, к.т.н.

<https://orcid.org/0000-0002-6562-0601>

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

## РОЗВИТОК ЗАСОБІВ АКУСТИЧНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА АНАЛІЗ ЇЇ БАЗОВИХ МЕТОДІВ

**Загинайло Є.О., Приходченко С.Д. Розвиток засобів локалізації та розгляд базових методів акустичної локалізації.** У статті розглядається шлях розвитку галузі просторової локалізації. Визначаються основні види просторових локалізацій за способом виявлення джерел сигналу та приклади використання різних локалаторів. Розглядається принцип радіолокації та як її приклад - радар, задля більш повного аналізу існуючих локалаторів акустичного простору. Локалізація джерел акустичних сигналів розглядається з моменту створення першого пристрою, який поклав початок розвитку галузі. Також розглядається головний принцип за яким стояли перші локалатори, а саме інтерференції хвиль. Розглядаються інші локалатори за видом отримання сигналу (активність, пасивність) та приводяться приклади та сфери в яких тій чи інший вид локалатора може бути застосований. В статті розглядаються різні методи визначення джерел звуку, такі як: визначення джерел за часом затримки (Time delay estimation) або метод формування променя (Beamforming). Приводять приклад використання масиву мікрофонів, як основного пристрою який дає можливість застосовувати наявні методи акустичної локації. Детально описується метод розрахунку локації за затримкою в часі та приводяться базові формули представлення сигналу відносно кожного мікрофону, формули розрахунку крос-кореляції та узагальненої крос-кореляції. Виділення особливості локалізації в середовищах з високим рівнем відношення сигналу до шуму (SNR) та варіанту вирішення даної проблеми. Детально описується процес акустичної локалізації методом формування променя та процес що стоїть за ним. Приводяться можливі варіанти використання нейронних мереж задля покращення ефективності наявних алгоритмів чи можливості створення новітніх алгоритмів на базі нейронних мереж.

**Ключові слова:** акустична локалізація, TOA, TDOA, SNR, Beamforming

**Zahynailo Y., Prihodchenko S. Development of localization techniques and review of basic methods of acoustic localization.** The article shows the development of spatial localization. The main types of spatial localization are determined by the method of identifying signals and the use of different locators. The principle of radio location and radar as its application, is examined for a better analysis of existing locators of the acoustic space. The acoustic signal sources locators are observed from the moment of creation of the first device, which is the beginning of sphere development. The main principle, which was used in first locators (waves interference) is also considered. Other locators are examined based on the type of signal interception (active, passive) examples are added with spheres in which different locator types can be used. Different methods of sources location are considered: time delay estimation or beamforming methods. There is an example of microphone array usage, as the main device, which makes methods of acoustic location work. Location defining method, which uses time delay is described in details and basic formulas are demonstrated like: a formula to define the signal relative to the microphone, cross correlation formula or generalized cross correlation formula. Highlighting the features of localization in environments with a high signal-to-noise ratio with different solutions for this problem. The process of acoustic localization by the method of beam formation and the process behind it are described in detail. Possible options for using neural networks to improve the efficiency of existing algorithms or the possibility of creating new algorithms based on neural networks are presented.

**Keywords:** acoustic localization, TOA, TDOA, SNR, Beamforming

**Вступ.** Розвиток сучасної науки глибоко пов'язаний із цифровізацією, та переносом більшості рутинних завдань до контролю та виконання в автоматичному режимі програмованими та машинно-навченими системами. Нажаль, до сьогодні не всі властивості, притаманні людині можливо автоматизувати, чи цифровізувати з багатьох причин, які стосуються швидкодії, рівнів чутливості і багатьох інших факторів. Але наукові дослідження невпинно намагаються перекласти важкі і рутинні завдання від людини до штучного агента, який в ідеалі дає менше помилок, ніж людина, і ніколи не втомлюється.

Одним з таких завдань є просторова локалізація джерела звуку у тривимірному просторі. Локалізація може поділятися на різні види за способом виявлення об'єктів, або джерела сигналу. Це може бути акустична або радіо локація, сейсмічна, лазерна, гравітаційна локація тощо. Кожен з перелічених видів локалізації використовується у своїй специфічній сфері для розв'язання задачі розміщення тих чи інших об'єктів в просторі.

**Постановка задачі.** Акустична локалізація об'єктів у тривимірному просторі є важливою технологією, яка знаходить застосування в багатьох галузях, від робототехніки до систем безпеки. Вона дозволяє визначати положення джерела звуку, використовуючи різницю в часі прибуття звукових хвиль до різних мікрофонів. Це особливо корисно для автономних систем, таких як дрони або роботи, які повинні орієнтуватися в просторі без допомоги людини. Завдяки акустичній

локалізації, ці системи можуть точно визначати місцезнаходження об'єктів, уникати перешкод і виконувати складні завдання в реальному часі.

Крім того, акустична локалізація має велике значення для розвитку технологій віртуальної та доповненої реальності. Вона дозволяє створювати більш реалістичні та інтерактивні середовища, де користувачі можуть взаємодіяти з віртуальними об'єктами, які точно відповідають їхнім фізичним положенням у просторі. Це відкриває нові можливості для навчання, розваг та професійної підготовки, забезпечуючи більш глибоке занурення та ефективність. Таким чином, акустична локалізація є ключовою технологією, яка сприяє розвитку інноваційних рішень у багатьох сферах.

Тому, актуальною є розробка систем акустичної локалізації для пошуку та встановлення актуальних координат об'єкту, що породжує звукові сигнали.

**Метою статті** є аналіз попередніх досліджень в галузі акустичної локалізації об'єктів та визначення напрямків подальших досліджень в галузі акустичного контролю простору та локалізації об'єктів, що породжують звукові коливання.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Акустична локалізація, є достатньо дослідженим методом, дослідження якого почалось ще на початку 1880 років, а саме з першого локалізаційного пристрою Мейєра (топофону, рисунок 1) [1], та наукових робіт, які були породжені натомість.



Рис. 1. Топофон Мейєра

Перші акустичні локатори були побудовані на принципі пасивності. Тобто в конструкції таких локаторів були тільки приймачі акустичного сигналу і тому їх область застосування була достатньо обмежена, а принцип роботи дуже не досконалим.

Принципом тогочасних акустичних пристроїв була звичайна інтерференція хвиль, у випадку, якщо уловлювачі звуку отримували сигнал одночасно, або різниця була не більше ніж в довжину отриманої хвилі, то отриманий сигнал посилювався, в іншому випадку сигнал послаблювався. Саме цей принцип давав можливість визначати напрямок джерела акустичного сигналу.

Надалі, даний принцип використовувався в різних пристроях аж до появи радарів. Прикладом розповсюдженого використання таких пристроїв слугує "військові труби", або "звукові труби", які використовувались в першій світовій війні Францією, Британією для локації літаків і дирижаблів.

З появою радарів (RADAR - акронім, який означає "Radio Detection and Ranging") люди почали більше переходити з пасивних локаторів до активних локаторів.

Активні локатори, такі як радар, мають у своїй конструкції джерело сигналу та пристрій, що отримує випущений сигнал. Принципом радара є принцип дуже схожий на ехолокацію. Радар випускає короткі радіохвилі, які рухаються зі швидкістю світла і покладається на відбиття хвилі об'єктом в напрямку приймача. Завдяки цьому принципу можна встановлювати дальність до об'єкта, його матеріал тощо. [2]. Цей принцип також можна використовувати не тільки в стаціонарних радарних установках, а й для побудови карти місцевості шляхом вимірювання відстані до перешкод, що може гарно слугувати у ситуаціях де неможливо користуватись камерою, або використання камери є недостатньо інформативним.

Також, застосування радара не обмежується локалізацією об'єктів, або побудовою карти місцевості, радари також використовують у передбаченні погодних умов. Таким радаром, який вже довгі роки допомагає поратись з цією задачею є радар Доплера. Принцип радара збігається з

принципом звичайного радару за винятком того що радар Доплера може аналізувати ефект Доплера, який відбувається завдяки краплям води в повітрі, що рухаються в атмосфері, або використовувати технологію двійної поляризації, що дасть можливість визначити тип опадів, які очікуються та інше [3]

Зазвичай, можливість користуватись активними локаторами обмежена або правовим полем, або фінансами людини, тому в якості компромісу зазвичай використовуються пасивні системи локації.

В сучасних системах акустичної локації часто застосовується метод визначення джерела звуку завдяки розрахунку часу затримки (Time delay estimation метод), метод формування променя, бінауральний метод тощо.

В рамках задачі визначення локації джерела сигналу виділяються така низка підзадач:

- Визначення TOA (часу отримання сигналу мікрофоном).
- Визначення TDOA (різниця в часі отримання сигналу між окремими мікрофонами).

Кожен з вищезазначених параметрів зазвичай зберігається в наносекундах (10-9), або пікосекундах (10-12) для зменшення можливих втрат точності при розрахунках.

Основою усіх методів розрахунку затримки часу є масив мікрофонів, який робить заміри TOA та TDOA від звукової хвилі, що випущена джерелом сигналу. Припускається що масив мікрофонів був направлений під кутом до джерела і кожен окремий мікрофон отримує хвилю з затримкою в часі  $n$  ( $0 < n < N-1$ ), де  $N$  - кількість мікрофонів. Сигнал може бути представлений таким чином:

$$r_1(t) = aS(t) + n_1(t) \quad (1)$$

$$r_2(t) = aS(t - \tau_1) + n_2(t) \quad (2)$$

Де  $r_1(t)$  та  $r_2(t)$  це сигнали, що уловлюються мікрофоном,  $S(t)$  - це сигнал який був спродукований джерелом,  $n_x(t)$  - шум на проміжку між джерелом та приймачем та  $a$  - коефіцієнт ослаблення, який показує те з якою легкістю промінь, або хвиля може перетнути довільний обсяг матеріалу ( $0 < t < T$ , де  $T$  - час споглядання) [4].

Далі, застосовуються алгоритми, що дають визначити локацію джерела. Базовим алгоритмом для визначення локації вважається алгоритм крос кореляції, який може виразити формулою: [4]

$$R_{r_1 r_2}(\tau) = E(r_1(t)r_2(t - \tau)) \quad (3)$$

Або ж згідно з властивостями, за формулою 4:

$$R_{r_1 r_2}(\tau) = E(r_1(t + \tau)r_2(t)) \quad (4)$$

В якості покращеного варіанту простого алгоритму крос кореляції є алгоритм узагальненої крос кореляції (Generalized cross correlation), що був створений Кнапом та Картером в їх роботах 1976 року [5]. Принципом даного методу є визначення часу затримки шляхом максимізації значень крос кореляції сигналів окремих мікрофонів. Даний тип алгоритму має гарні показники точності при середніх значеннях SNR (signal to noise ratio) та час роботи. Розрахунок алгоритму узагальненої крос кореляції проводиться за формулою [4]:

$$R_{r_1 r_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(f)G_{r_1 r_2}(f)e^{j2\pi f\tau} df \quad (5)$$

Щодо роботи в середях з високими значеннями SNR є можливість модифікації даного алгоритму, де буде додана специфічна вагова функція, яка нормалізує спектральну щільність сигналу за величиною спектра, що призводить до узагальненого методу фазового перетворення крос-кореляції (GCC-PHAT) [6].

Також хочеться виділити метод формування променя (Beamforming), як один з можливих методів локації акустичного сигналу. В основі методу формування променя знаходиться алгоритм "Суми та затримки" [7], а сам метод, являє собою так званий просторово-часовий фільтр сигналу. Тобто завдяки цьому методу можна фільтрувати сигнали з визначеного напрямку, в той час, як сигнали з інших напрямків будуть пригнічуватись. Це працює так, що якщо при надходженні сигналу під кутом, кожен окремий мікрофон в масиві мікрофонів буде зчитувати сигнал в різні моменти, якийсь раніше, якийсь пізніше і тільки у випадку коли сигнал буде розповсюджуватись перпендикулярно площині розміщення масиву мікрофонів (визначений напрямок масиву буде правильний) - при складанні сигналів з усіх мікрофонів - на виході буде отриманий сигнал з найбільшою амплітудою (Рис. 2).

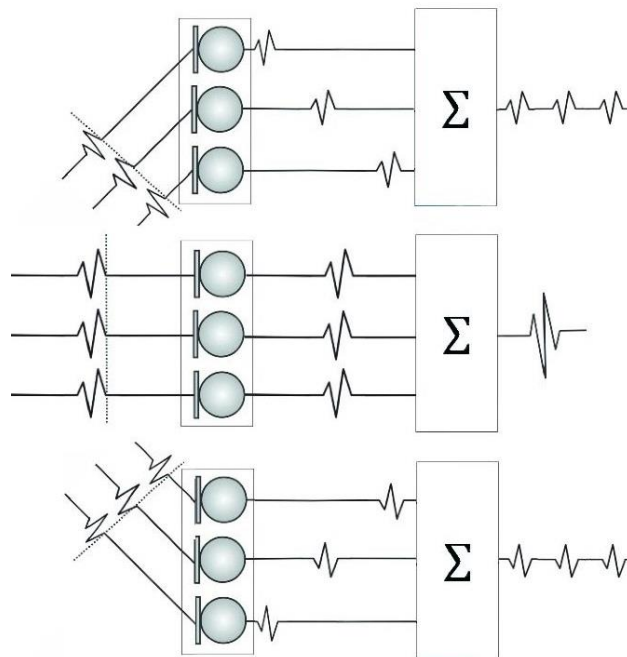


Рис. 2. Приклад складання сигналу з масиву мікрофонів під різними кутами

Таким чином, якщо звукова хвиля буде розповсюджуватись в напрямку відмінному від напрямку, що визначений в методі формування променя, в результаті утвориться хвиля з довгим сигналом маленької амплітуди, або хвилі можуть компенсувати одна одну інтерференцією хвиль.

Також, хотілося б виділити ефективність використання нейронних мереж для розв'язання задач акустичної локації, які з часом набирають все більше популярності.

Нейромережі можуть використовуватись задля покращення точності визначення джерела сигналу, зменшення рівня навколишнього шуму, надання адаптивності статичним алгоритмам, або навіть для перевірки можливих нових алгоритмів акустичної локації.

Одним з прикладів можливого покращення наявних алгоритмів може бути нейромережа, яка завдяки згортковим шарам зможе виділяти походження, або окремі характеристики звукової хвилі, таким чином інші шари нейромережі зможуть використовувати дану інформацію для більш точного налаштування чутливостей мікрофонів і напрямку масиву мікрофонів (у разі можливості його регулювання) що дасть можливість створити систему визначення акустичного сигналу ще більшої точності.

**Висновки та перспективи подальшого дослідження.** Таким чином, беручи до уваги шлях розвитку акустичної локації та наявність класичних методів просторової локалізації, кожен з яких має свої переваги і недоліки, користуючись новітніми технологіями з створення та впровадження нейромереж, можна передбачити можливість подальшого покращення методів акустичної локації і створення нових методів з вже більшим покладанням на новітні технології.

Одним із ключових аспектів цих досліджень є використання багатоканальних мікрофонних масивів та обробки сигналів. Завдяки цьому можна отримати більш точні дані про напрямок та відстань до джерела звуку. Сучасні методи обробки сигналів, такі як алгоритми на основі машинного навчання, дозволяють значно підвищити точність та швидкість локалізації. Крім того, використання

тривимірних моделей середовища допомагає враховувати відбиття та поглинання звуку, що робить результати більш надійними.

Перспективи розвитку цієї галузі включають інтеграцію з іншими технологіями, такими як комп'ютерний зір та штучний інтелект. Це дозволить створювати більш комплексні системи, здатні не лише визначати місцезнаходження джерела звуку, але й аналізувати його характеристики та контекст. Такі системи можуть бути використані для автоматичного розпізнавання мовлення в шумних умовах або для створення інтелектуальних систем спостереження, які реагують на звукові події в реальному часі.

#### Список бібліографічного опису:

1. Топофон : патент 224,199 Сполучені Штати Америки. URL: <https://patents.google.com/patent/US224199A>.
2. Боле А., Волл А., Норріс А., Базові принципи радару. *Посібник по радару та ARPA*. 2014. Р. 1–28. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-097752-2.00001-5> (дата звернення: 19.08.2024).
3. Довіак Р.Дж., Жрнік Д.С., Сірманс Д.С. Погодний радар Доплера. *Робота з IEEE*. 1979. Том. 67, час. 11. с. 1522–1553. URL: <https://doi.org/10.1109/proc.1979.11511> (дата звернення: 19.08.2024).
4. Ріту К., Санджів К., Огляд методів локалізації джерела звуку. *Європейський журнал досягнень в сфері інженерії та технологій*. URL: <https://ejaet.com/review-on-acoustic-source-localization-techniques/> (дата звернення: 19.08.2024).
5. Узагальнена крос кореляція з частотним ковзанням: підхід до оцінки затримки під діапазону / Кобос М., Антоначі Ф., Командуччі Л., Сарті А. *arxiv*. 2019. 19 жовтня. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.08838> (дата звернення: 19.08.2024).
6. Кнапп С., Картер Г. Узагальнений кореляційний метод для оцінки затримки часу. *IEEE Операції з акустики, мови та обробки сигналів*. 1976. Том. 24, час. 4. с. 320–327. URL: <https://doi.org/10.1109/tassp.1976.1162830> (дата звернення: 19.08.2024).
7. Валенсія-Пальма А., Кордова-Еспарза Д.-М.. Локалізація джерела звуку за допомогою формування променя та його представлення у вбудованому пристрої змішаної реальності. *Конспект лекцій з комп'ютерних наук: книга*. 2019. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-21077-9\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21077-9_35) (дата звернення: 19.08.2024).

#### References:

1. Topophone : patent 224,199 United States. URL: <https://patents.google.com/patent/US224199A>. (date of access: 19.08.2024).
2. Bole A., Wall A., Norris A. Basic Radar Principles. Radar and ARPA Manual. 2014. P. 1–28. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-097752-2.00001-5> (date of access: 19.08.2024).
3. Doviak R. J., Zrnic D. S., Sirmans D. S. Doppler weather radar. Proceedings of the IEEE. 1979. Vol. 67, no. 11. P. 1522–1553. URL: <https://doi.org/10.1109/proc.1979.11511> (date of access: 19.08.2024).
4. Ritu K., Sanjeev K. Review on Acoustic Source Localization Techniques. European Journal of Advances in Engineering and Technology. URL: <https://ejaet.com/review-on-acoustic-source-localization-techniques/> (date of access: 19.08.2024).
5. Frequency-Sliding Generalized Cross-Correlation: A Sub-band Time Delay Estimation Approach / Cobos M., Antonacci F., Comanducci L., Sarti A., arxiv. 2019. 19 October. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.08838> (date of access: 19.08.2024).
6. Knapp C., Carter G. The generalized correlation method for estimation of time delay. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1976. Vol. 24, no. 4. P. 320–327. URL: <https://doi.org/10.1109/tassp.1976.1162830> (date of access: 19.08.2024).
7. Valencia-Palma A., Cordova-Esparza D.-M. Sound Source Localization Using Beamforming and Its Representation in a Mixed Reality Embedded Device. Lecture Notes in Computer Science : book. 2019. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-21077-9\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21077-9_35) (date of access: 19.08.2024).