

УДК 681.884

[0000-0003-4279-7065] **С. І. Артемук, аспірант,**

e-mail: serhii.i.artemuk@lpnu.ua

[0000-0002-7157-3725] **І. П. Микитин, д-р техн. наук, професор**

e-mail: mykutyinip@ukr.net

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, 79000, Україна

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛА АКУСТИЧНОГО СИГНАЛУ

У статті проведено літературний огляд і досліджено існуючі методи визначення координат розташування джерела акустичного сигналу. Виокремлено переваги і недоліки наведених у статті пасивних і активних методів. Ці методи можуть знайти застосування в авіації, космонавтиці, машинобудуванні й інших галузях науки та техніки, де використовують вимірювання, і призначені для визначення координат джерела акустичного сигналу. Останнім часом спостерігається тенденція зростання інтересу до використання нейронних мереж для вирішення різних завдань і застосування їх у різних сферах. За допомогою штучних нейронних мереж можна опрацювати, аналізувати та узагальнювати інформацію. Авторами статті було порівняно метод визначення координат розташування джерела акустичного сигналу із застосуванням штучної нейронної мережі із вже існуючими методами. У цьому методі визначають наявність сигналу від джерела акустичного сигналу у точках прийому шляхом приймання і реєстрації сигналу у просторово рознесених точках з відомими координатами та подальшого визначення різниці часу поширення сигналів від джерела до точок прийому сигналу. Наявність сигналу визначають за серединою площі прийнятого сигналу. Кількість точок прийому сигналу встановлюють на етапі навчання штучної нейронної мережі за критерієм мінімуму похибки визначення координат джерела акустичного сигналу. Різниці часу поширення сигналів від джерела до точок прийому сигналу визначають між усіма точками прийому, які розташовані в порядку або випадковим чином, причому ці різниці часу подають на вхід попередньо навченої штучної нейронної мережі, на виході якої отримують координати джерела акустичного сигналу. Застосування цього методу дозволяє визначати координати джерела акустичного сигналу, не маючи при цьому попередньої інформації щодо відстані до джерела акустичного сигналу або будь-яких інших характеристик об'єкта, визначати координати неперіодичних сигналів, спростити процес вимірювання часових інтервалів та обчислення координат.

Ключові слова: визначення координат, акустичні сигнали, метод мінімуму, метод максимуму, радіолокація, пеленгація, штучна нейронна мережа, глибоке навчання, звук.

Вступ. Локалізація місця розташування джерела акустичного сигналу (ДАС) – це область досліджень, яка займається визначенням координат ДАС. Більшість розроблених систем визначення координат (СВК) ДАС переважно вимірюють потужність акустичного сигналу [1]. Крім того, у деяких випадках використовуються системи, які визначають координати ДАС за різницею часу надходження акустичного сигналу до сенсорів. Визначення координат ДАС використовується у таких галузях людської діяльності:

- Полегшення спілкування [2] (візуалізації) під час проведення відеоконференцій,

коли відеокамера, використовуючи СВК ДАС, повертається у бік людини, яка розмовляє на цей момент.

- Радіолокація та навігація. Прикладом застосування СВК ДАС є пасивний сонар, який використовується для пошуку перешкод та об'єктів [3].

- Технічна допомога в медицині. Одне із застосувань СВК ДАС – це слухові апарати [4], які дають можливість визначити розташування джерела голосового сигналу, що дозволяє людині з вадами слуху швидше візуально ідентифікувати співрозмовника.

• Військова сфера. За допомогою СВК ДАС можна визначити, з якої позиції було здійснено постріл [5] із військової техніки. За визначеними координатами можна провести ракетний або артилерійський обстріл для знищення техніки супротивника. Крім того, такі системи можуть використовуватися для самонаведення ракет за певним акустичним сигналом.

• Сфера розваг. СВК ДАС використовується в іграх та сценаріях віртуальної реальності для покращення реалістичності навколишнього середовища [6, 7] за рахунок об'ємного звуку. Тобто система визначає координати ДАС і залежно від його розташування змінює потужність звуку у динаміках звукової системи. У такому випадку під час гри лише за допомогою звуку можна визначити, зліва чи справа знаходиться ігровий об'єкт.

• Робототехніка. В робототехніці СВК ДАС використовується для реалізації технічного слуху [8]. Це дозволяє, наприклад, роботизованій системі ідентифікувати місце розташування людини, яка розмовляє з нею. Або, наприклад, робот-пилосос, який за допомогою спеціального акустичного сигналу знаходить місце розташування станції підзарядки.

• Охоронні технології. СВК ДАС можуть застосовуватися в інтелектуальних камерах відеоспостереження, які можуть швидко наводитися на координати джерела підозрілого акустичного сигналу.

• Профілактика складних технічних виробів. На заводах автомобілебудування СВК ДАС контролюють роботу великих пресів і визначають сторонні шуми в їх функціональних блоках. Це дозволяє швидко ідентифікувати і усунути несправності, що, в свою чергу, збільшує експлуатаційний ресурс обладнання та дозволяє попередити аварійні ситуації [9].

• Дефектоскопія. СВК ДАС можуть застосовуватися для неруйнівного контролю якості матеріалів і виробів з метою виявлення внутрішніх прихованих дефектів та визначення місця їх розташування [10, 11].

На сьогоднішній день існує чимало методів визначення координат ДАС, а саме:

• імпульсний метод [1, 12];

- метод вимірювання різниці фаз [1, 13];
- частотний метод [1, 14];
- доплерівський метод виявлення рухомого об'єкта та вимірювання його швидкості [1, 15];
- амплітудний метод за максимальним значенням прийнятого сигналу [1];
- амплітудний метод за мінімальним значенням прийнятого сигналу [1];
- амплітудний комбінований метод [1];
- метод вимірювання фази між сигналами двох сенсорів [1, 16];
- диференційний метод [17, 18];
- різницево-часовий метод з використанням нейронної мережі.

Мета та задачі дослідження. Метою цієї статті є дослідження характеристик існуючих методів визначення координат ДАС, порівняння їх переваг та недоліків.

Активні методи визначення координат розташування об'єкта

Імпульсний метод. Імпульсний метод полягає в тому, що в початковий момент часу випромінюється у середовище імпульс певної форми, а далі очікується надходження відбитого імпульсу від об'єкта вимірювання [1, 12]. Відстань R до об'єкта визначається за проміжком часу T між випромінюванням та прийнятим відбитим імпульсом:

$$R = c_0 \frac{T}{2}, \quad (1)$$

де c_0 – швидкість поширення акустичного сигналу.

Метод вимірювання різниці фаз. Суть методу полягає у вимірюванні різниці фаз [1, 13]. У простір випромінюється акустичний сигнал у вигляді синусоїдальних коливань певної частоти, а далі очікується надходження відбитого від об'єкта вимірювання акустичного сигналу. Відстань до об'єкта визначається різницею фаз випроміненого і прийнятого сигналу, яка розраховується за формулою

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 4\pi fR / c_0 + (\chi - \varphi_0), \quad (2)$$

де R – відстань до об'єкта, φ_0 – початкова фаза, χ – фаза акустичного сигналу при відбитті від поверхні об'єкта, $4\pi f/c_0$ – запізнення по фазі внаслідок проходження відстані $2r$.

Враховуючи (2), відстань R можна знайти за формулою

$$R = \frac{\Delta\varphi - (\chi - \varphi_0)}{4\pi f / c_0}. \quad (3)$$

Значення фази χ відбитого акустичного сигналу у (3) є невідомим, тому у практичних вимірюваннях використовується метод двох частот, в якому визначають різницю фаз для кожної частоти окремо, а потім знаходять різницю різниць фаз [1]:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = 4\pi\Delta f R / c_0 + 2\pi N, \quad (4)$$

де R – відстань до об'єкта, $\Delta\varphi$ – різниця різниць фаз, N – кількість повних періодів синусоїдального акустичного сигналу, $\Delta f = f_1 - f_2$ – різниця частот.

Виходячи з (4), отримаємо

$$R = \frac{\Delta\varphi - 2\pi N}{4\pi\Delta f} c_0. \quad (5)$$

Частотний метод. Цей метод базується на вимірюванні частоти биття, яка виникає в амплітудному детекторі при взаємодії випроміненого та відбитого від об'єкта вимірювання частотно-модульованих сигналів [1, 14]. Значення відстані розраховується за формулою

$$R = \frac{FTc_0}{4f_\delta}, \quad (6)$$

де R – відстань до об'єкта, T – період модуляції, F – частота биття, f_δ – девіація частоти частотно-модульованого сигналу.

Доплерівський метод виявлення рухомого об'єкта та вимірювання його швидкості. Цей метод базується на ефекті Доплера, який описує зміну частоти відбитого акустичного сигналу від рухомого об'єкта відносно частоти випроміненого акустичного сигналу [1, 15]. Доплерівська частота визначається за формулою

$$f_\delta = f_0 \frac{2V_0}{c_0} \cos\theta_0, \quad (7)$$

де f_δ – доплерівська частота, f_0 – частота випроміненого акустичного сигналу, θ – кут між

акустичним променем і напрямком руху, V_0 – швидкість руху об'єкта.

Враховуючи (7), швидкість руху об'єкта описується формулою

$$V_0 = \frac{f_\delta c_0}{2f_0 \cos\theta}, \quad (8)$$

Пасивні методи визначення координат ДАС

Метод вимірювання фази між сигналами двох сенсорів. Фазовий метод полягає у вимірюванні різниці фаз акустичних сигналів, прийнятих двома сенсорами, які рознесені в просторі на певну відстань. Фазовий зсув φ між акустичними сигналами, які прийняті двома сенсорами [1], розраховується за формулою

$$\varphi = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin\alpha, \quad (9)$$

де φ – фазовий зсув між двома сигналами, d – довжина акустичної бази (відстань між двома сенсорами), λ – довжина хвилі акустичного сигналу, α – кут між перпендикуляром до акустичної бази та вектором на об'єкт вимірювання.

Враховуючи (9), кутову координату α можна знайти за формулою

$$\alpha = \arcsin \frac{\varphi\lambda}{2\pi d}. \quad (10)$$

Амплітудний метод за максимальним значенням прийнятого сигналу. Метод полягає в тому, що визначається напрямок, для якого амплітуда прийнятого сигналу має максимальне значення [1]. Відповідно, у цьому напрямку розташоване ДАС. Для визначення напрямку на ДАС застосовується антена із вузькою діаграмою спрямованості в площині пеленгування (рисунок 1).

Якщо застосувати декілька пристроїв із такими антенами, які розташовані на певній відстані і координати яких відомі, то місце перетину (М) отриманих променів (a і b) є місцем знаходження ДАС (рисунок 2).

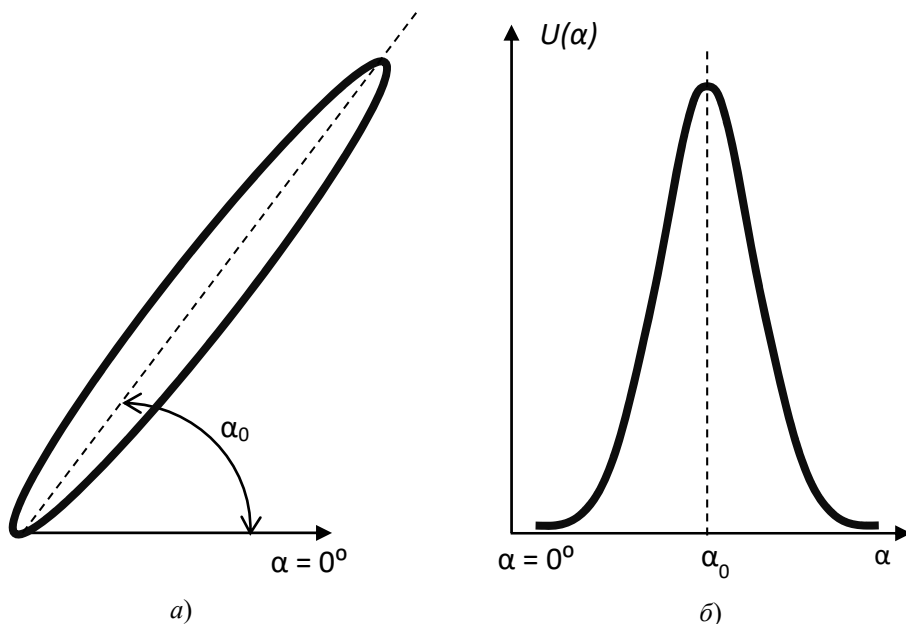


Рисунок 1. Характеристики антени для методу вимірювання відстані за максимальним значенням прийнятого сигналу:
 а) діаграма спрямованості; б) сигнальна функція

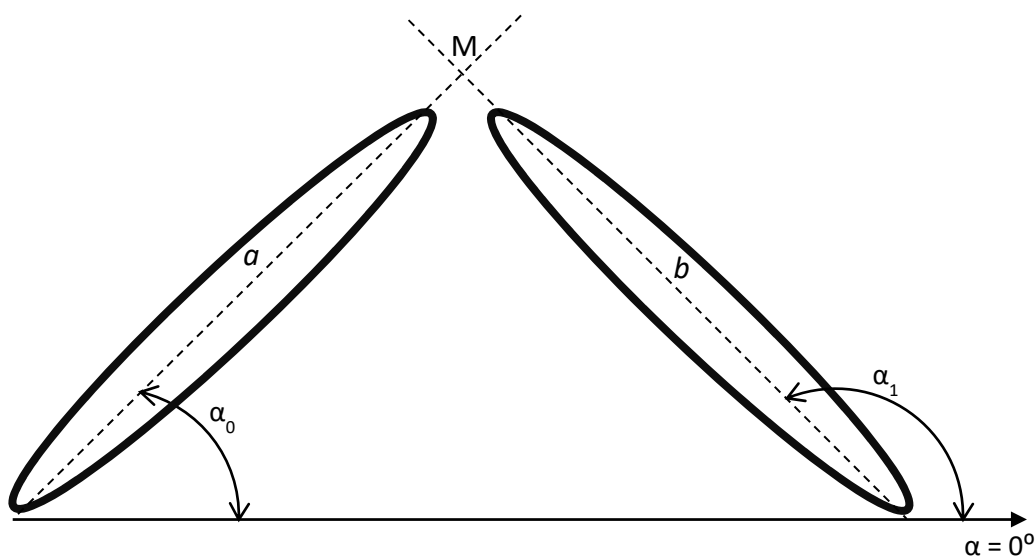


Рисунок 2. Визначення координат ДАС із використанням методу вимірювання відстані за максимальним значенням прийнятого сигналу

Амплітудний метод за мінімальним значенням прийнятого сигналу. У цьому методі [1] визначення кутової координати об'єкта вимірювання проводиться поворотом антени із діаграмою спрямованості у вигляді двох симетричних пелюсток (рисунок 3) доти,

поки амплітуда прийнятого акустичного сигналу матиме мінімальне значення. Вісь антени збігається з віссю симетрії сигнальної функції (рисунок 3, б), і для мінімального значення кутова координата відповідає напрямку на об'єкт.

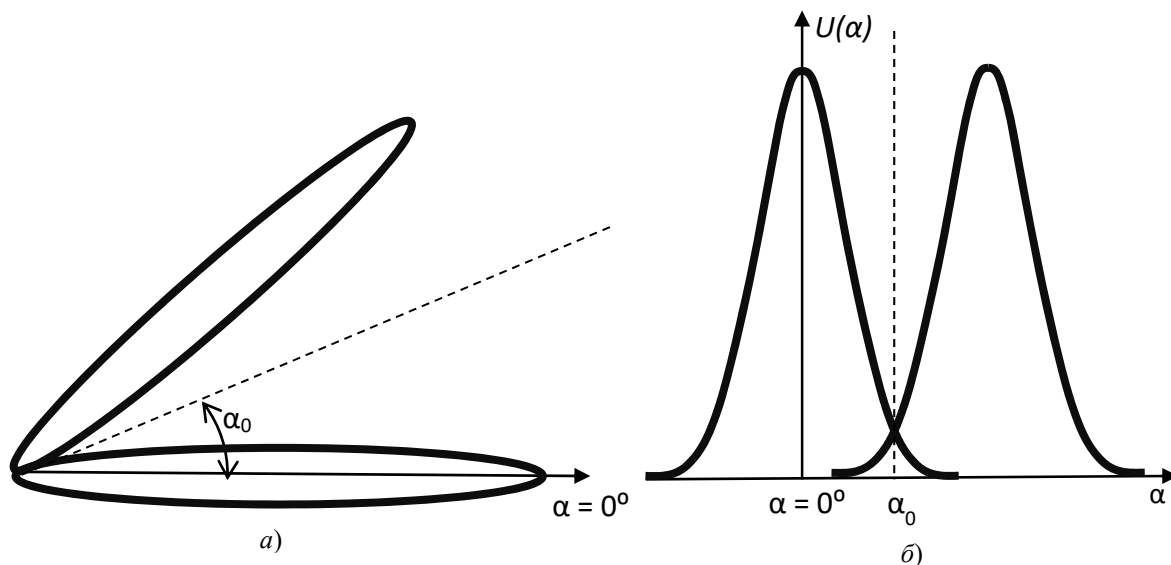


Рисунок 3. Характеристики антени для методу вимірювання відстані за мінімальним значенням прийнятого сигналу:
а) діаграма спрямованості; б) сигнальна функція

Для декількох пристроїв із такими антенами, які розташовані на певній відстані і координати яких відомі, місце перетину (М)

отриманих променів (a і b) є місцем знаходження ДАС (рисунок 4).

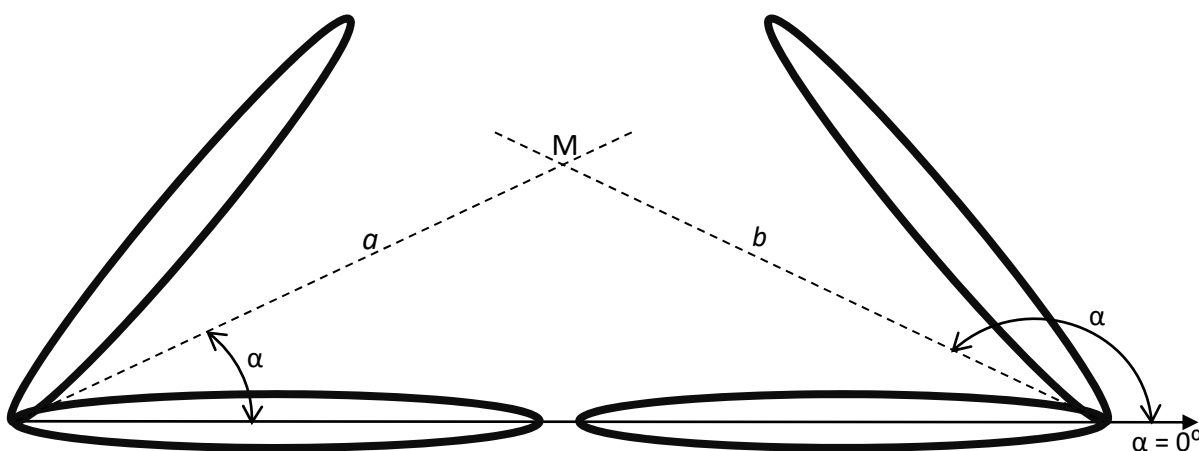


Рисунок 4. Визначення координат ДАС із використанням методу вимірювання відстані за мінімальним значенням прийнятого сигналу

Амплітудний комбінований метод. У цьому методі [1] використано переваги двох попередньо розглянутих пасивних амплітудних методів: достатньо висока амплітуда в зоні визначення напрямку, як в амплітудному методі за максимальним значенням прийнятого сигналу, а також різке збільшення чутливості антени в зоні мінімального прийому, як в

амплітудному методі за мінімальним значенням. Для його реалізації необхідна антена з діаграмою спрямованості у вигляді двох пелюсток (рисунок 5, а), які частково перекриваються і створюють впадину, мінімальне значення якої є більшим за половину амплітуди сигнальної функції (рисунок 5, б).

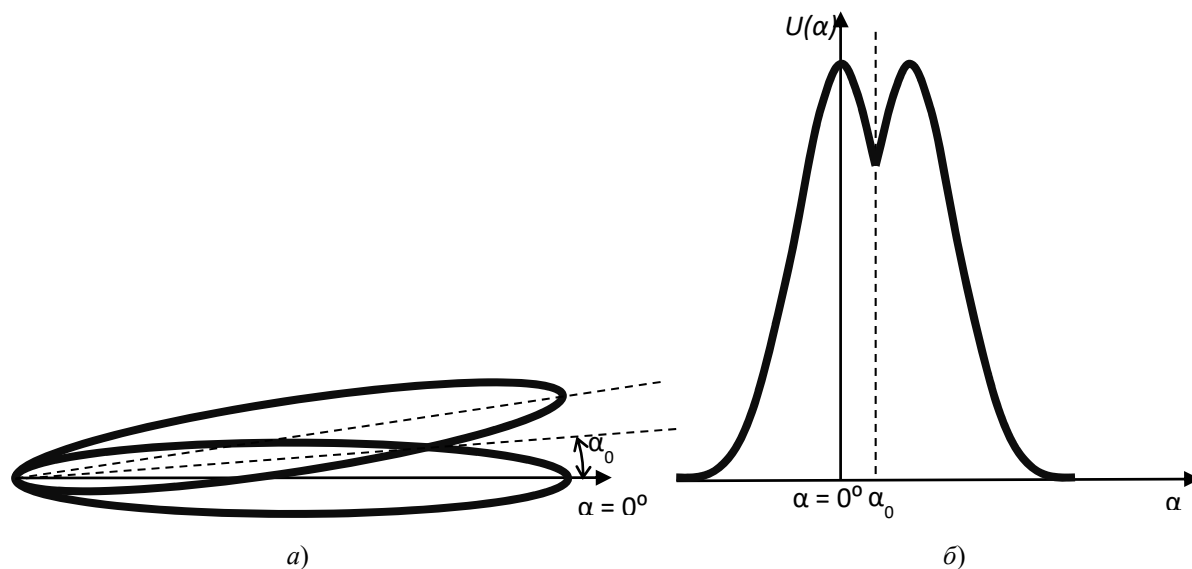


Рисунок 5. Характеристики антени для комбінованого методу:
 а) діаграма спрямованості; б) сигнальна функція

Як і в попередніх методах, можна визначити координати ДАС, застосувавши дві і більше таких антен (рисунок 6).

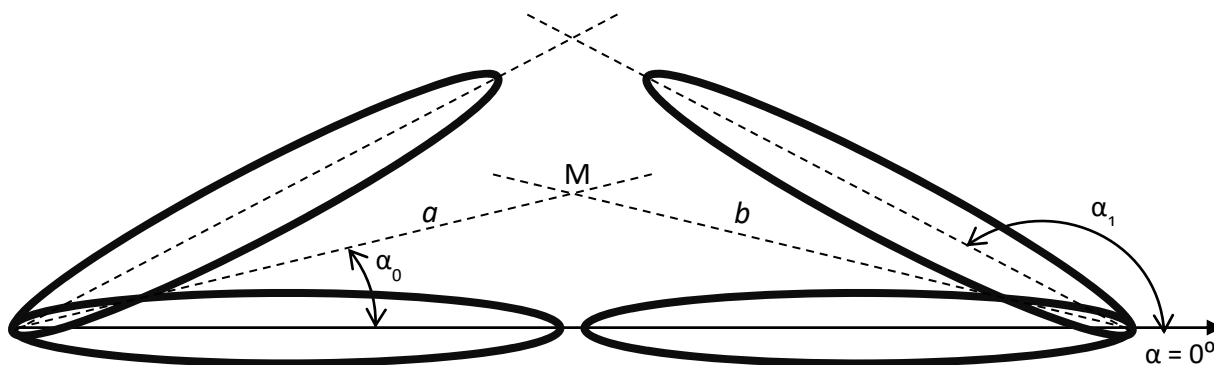
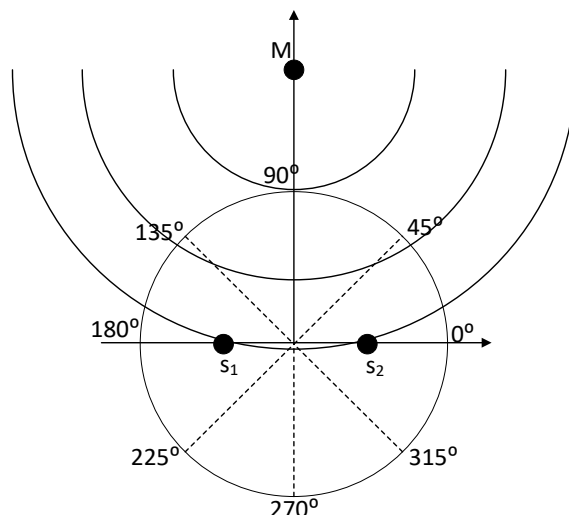


Рисунок 6. Визначення координат ДАС із використанням комбінованого методу

Диференційний метод. Метод полягає у вимірюванні різниці часу реєстрації акустичного сигналу двома сенсорами, які розташовані на певній відстані (акустична база) [17, 18]. Оптимальні метрологічні параметри системи, яка побудована за цим методом, можна отримати, якщо різниця часу дорівнює нулю,

а, відповідно, координати ДАС знаходяться на перпендикулярі до акустичної бази (рисунок 7). Якщо різниця часу не дорівнює нулю, то суттєво ускладнюється залежність кутової координати від значення акустичної бази та різниці часу надходження акустичного сигналу до двох сенсорів.

Рисунок 7. Оптимальне розташування сенсорів s_1 , s_2 та ДАС (точка М)

Якщо застосувати декілька пар сенсорів, які розташовані на певній відстані і координати яких відомі, то місце перетину (М)

отриманих променів (a і b) є місцем розташування ДАС (рисунок 8).

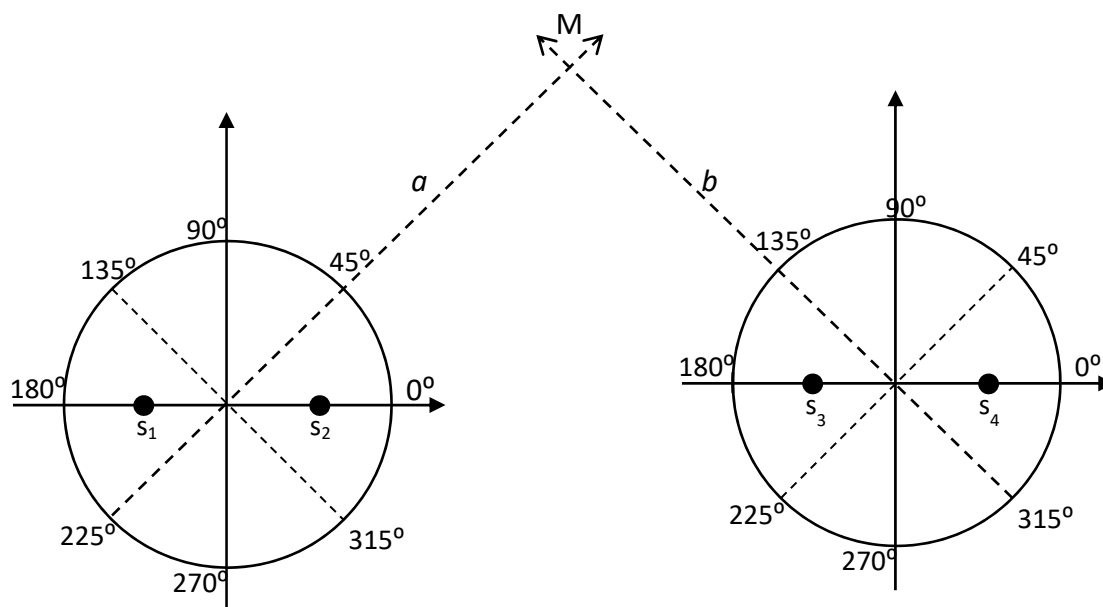


Рисунок 8. Визначення координат ДАС із використанням чотирьох сенсорів

Різницево-часовий метод з використанням нейронної мережі. Система визначення координат ДАС (рисунок 9), яка побудована на основі цього методу, використовує N_s сенсорів (мікрофонів) для реєстрації акустичного сигналу, джерело якого розміщене в точці М з координатами (x_M, y_M) . Сенсори розташовують у просторі або впорядковано (в одну лінію, прямокутником, трикутником тощо), або випадковим чином. Для обох випадків

координати розташування сенсорів $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots (x_i, y_i), \dots (x_{N_s}, y_{N_s})$ повинні бути відомими. Реєструється момент часу надходження акустичного сигналу $t_1, t_2, \dots t_i, \dots t_{N_s}$ від джерела до кожного із сенсорів за серединою площі прийнятого сигналу. Зарєстровані значення моментів часу передаються на мікропроцесор (МП) зі штучною нейронною мережею (ШНМ).

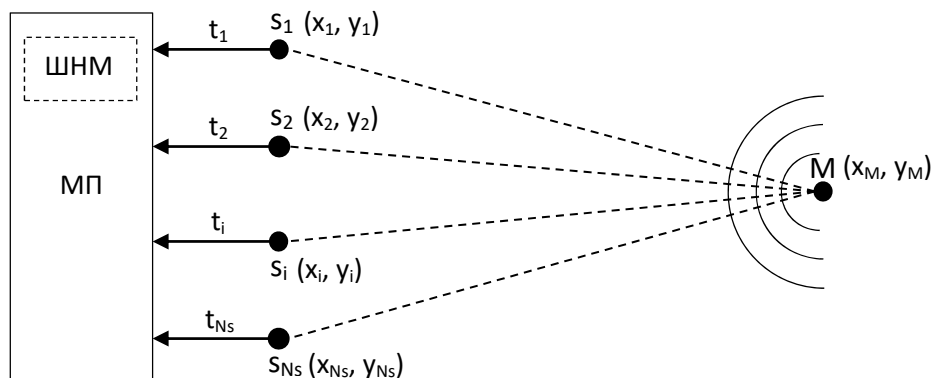


Рисунок 9. Система вимірювання координат ДАС з N_s сенсорами для реєстрації акустичного сигналу

МП розраховує різницю часу надходження акустичного сигналу для кожної пари сенсорів:

$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j, \quad (11)$$

де Δt_{ij} – різниця часу реєстрації акустичного сигналу t_i і t_j сенсорами s_i і s_j .

Кількість значень Δt_{ij} розраховується за формулою [19]

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}, \quad (12)$$

де C_n^m – кількість комбінацій пар сенсорів, n – кількість сенсорів, $m=2$ – кількість сенсорів, між якими розраховується різниця часу Δt_{ij} .

Для розрахунку координат (x_M, y_M) розташування ДАС використовується попередньо навчена ШНМ (рисунок 10). Так, наприклад, для чотирьох сенсорів на вхід ШНМ подаються значення Δt_{ij} , а саме: $\Delta t_{12}, \Delta t_{13}, \Delta t_{14}, \Delta t_{23}, \Delta t_{24}, \Delta t_{34}$. На виході ШНМ отримуємо координати (x_M, y_M) .

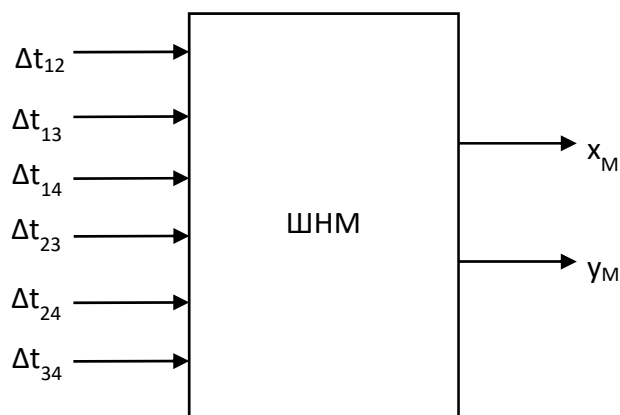


Рисунок 10. Структура ШНМ для чотирьох сенсорів

Результати досліджень. Результатом досліджень є аналіз переваг та недоліків розглянутих активних та пасивних методів визначення координат ДАС. Результати порівняння методів наведено в таблиці 1.

У таблиці виокремлено основні переваги і недоліки пасивних та активних методів визначення координат ДАС, які дозволяють зробити висновки про особливості їх застосування. Зокрема, доплерівський метод здатний визначати напрямок та швидкість руху об’єкта, проте не дозволяє визначити відстань

до об’єкта. Амплітудні методи визначають кутові координати, але неефективні у пеленгації короточасних сигналів, а також передбачають використання складних конструкцій з рухомими елементами. Диференційний метод потребує розташування ДАС на перпендикулярі до акустичної бази, що реалізувати в реальному часі є достатньо складною технічною задачею. А метод вимірювання фази між сигналами двох сенсорів дозволяє вимірювати лише невеликі відстані за фіксованої акустичної бази.

Таблиця 1. Переваги та недоліки методів визначення координат ДАС

| Методи | Переваги | Недоліки |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Активні методи | | |
| Імпульсний метод | <ul style="list-style-type: none"> - метод можна реалізувати відносно простими технічними засобами; - дозволяє проводити одночасне спостереження та визначення відстані до багатьох об'єктів | <ul style="list-style-type: none"> - мінімальне значення вимірюваної відстані обмежується мінімально можливою тривалістю випромінюваного імпульсу і швидкістю поширення акустичних сигналів; - для збільшення вимірюваної відстані необхідно збільшувати потужність випромінюваного імпульсу |
| Метод вимірювання різниці фаз | <ul style="list-style-type: none"> - дозволяє вимірювати малі відстані; - менша похибка вимірювання порівняно з імпульсним методом | <ul style="list-style-type: none"> - суттєво ускладнюється одночасне визначення відстані до декількох об'єктів; - малий діапазон вимірювання відстаней; - максимальна вимірювана відстань дорівнює половини довжини хвилі акустичного сигналу з більшою частотою |
| Частотний метод | <ul style="list-style-type: none"> - дозволяє вимірювати малі відстані; - краща роздільна здатність і менша похибка вимірювання порівняно з імпульсним методом | <ul style="list-style-type: none"> - необхідність забезпечення надійної акустичної ізоляції між приймачем та випромінювачем; - суттєво ускладнюється одночасне визначення відстані до декількох об'єктів |
| Доплерівський метод | <ul style="list-style-type: none"> - дозволяє визначити напрямок і швидкість руху об'єкта | <ul style="list-style-type: none"> - не дозволяє визначити відстань до об'єкта; - не виявляє нерухомий об'єкт; - не можна визначити швидкість руху, якщо об'єкт рухається перпендикулярно до напрямку поширення акустичного сигналу |
| Пасивні методи | | |
| Метод вимірювання фази між сигналами двох сенсорів | <ul style="list-style-type: none"> - не потребує використання антен порівняно з вище розглянутими методами; - менша похибка порівняно з пасивними амплітудними методами | <ul style="list-style-type: none"> - для забезпечення коректних результатів вимірювань фазовий зсув не повинен перевищувати π; - для мінімізації похибки вимірювання необхідно використовувати засоби перетворення двох сигналів з однаковими комплексно-частотними характеристиками |
| Амплітудний метод за максимальним значенням прийнятого сигналу | <ul style="list-style-type: none"> - відносно простий спосіб визначення кутової координати; - за напрямком максимуму сигналу отримуємо максимальне значення відношення сигнал/завада; - дозволяє визначити координати ДАС, яке розташоване на великій відстані | <ul style="list-style-type: none"> - неефективний у випадку пеленгування короточасних акустичних сигналів, тривалість яких менша періоду обертання антени; - зі збільшенням ширини діаграми спрямованості антени зростає похибка вимірювання кутової координати |

Продовження таблиці 1

| Методи | Переваги | Недоліки |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Амплітудний метод за мінімальним значенням прийнятого сигналу. | - менша похибка визначення кутової координати порівняно з амплітудним методом за максимальним значенням прийнятого сигналу, оскільки невеликому відхиленню від лінії нульового прийому відповідає різке збільшення чутливості антени (рисунки 3, б) | - неефективний у випадку пеленгування короткочасних акустичних сигналів, тривалість яких менша періоду обертання антени; - вимірювання суттєво меншої відстані порівняно з амплітудним методом за максимальним значенням прийнятого сигналу; - в зоні мінімуму чутливості антени, де значення вимірюваного сигналу є мінімальним, суттєво зростає вплив завад на визначення кутової координати, тому потрібно використовувати низькошумове обладнання |
| Амплітудний комбінований метод | - дозволяє визначити координати ДАС, яке розташоване на великій відстані, як і амплітудний метод за максимальним значенням прийнятого сигналу; - похибка визначення кутової координати практично дорівнює похибці амплітудного методу за мінімальним значенням | - неефективний у випадку пеленгування короткочасних акустичних сигналів, тривалість яких менша періоду обертання антени |
| Диференційний метод | - метод можна реалізувати простими технічними засобами | - найменшу методичну похибку можна отримати, якщо ДАС знаходиться на перпендикулярі до акустичної бази; - для визначення координат ДАС необхідно, щоб у реальному часі для кожної пари сенсорів вектор на ДАС був виставлений перпендикулярно до акустичної бази, що є технічно складною задачею |
| Різницево-часовий метод з використанням нейронної мережі | - не потребує жодної інформації про досліджуване джерело акустичного сигналу; - простий у реалізації та використанні; - не використовує антени або інші активні (рухомі) компоненти; - сенсори (мікрофони) можуть бути розташовані як зі збереженням геометричних пропорцій (впорядковано), так і випадковим чином; - доволі широкий діапазон визначення координат ДАС; - визначає координати ДАС – як періодичного, так і неперіодичного | - похибка визначення координат ДАС залежить від конфігурації нейронної мережі і від кількості сенсорів; - для підвищення точності необхідно проводити калібрування системи безпосередньо на об'єкті дослідження; - для періодичних акустичних сигналів необхідно, щоб час проходження сигналу від ДАС до сенсорів був меншим за його період |

Обговорення результатів. З наведених у таблиці результатів можна зробити висновок, що активні методи є малоефективними для визначення координат ДАС, від якого погано або взагалі не відбивається сигнал. Такі системи переважно працюють з сигналами, які мають частоту, набагато більшу за частоту акустичного сигналу. Крім того, необхідним є застосування генераторів для формування певних хвиль, які спрямовуються в напрямку на об'єкт, а потім відбитий сигнал приймається певними пристроями.

Тому для цього завдання прийнятним є застосування пасивних методів. Вони позбавлені описаних вище недоліків активних методів. А основною їх перевагою є те, що не потрібно надсилати в навколишнє середовище достатньо потужний сигнал з певними характеристиками. Проте переважна більшість розглянутих пасивних методів потребує використання рухомих антен із певними діаграмами спрямованості. Для розглянутих пасивних методів з використанням сенсорів для реєстрації акустичних сигналів необхідно для кожної пари сенсорів забезпечувати напрямок вектора на ДАС перпендикулярно до акустичної бази. У випадку відхилення від перпендикуляра виникає додаткова похибка.

Представлений пасивний різницево-часовий метод із використанням штучних нейронних мереж містить більшість переваг як пасивних, так і активних методів. Зокрема, не потребує використання рухомих антен порівняно з активними та деякими пасивними методами. Технічна реалізація на основі цього методу є достатньо простою і потребує застосування лише акустичних сенсорів та мікроконтролерної системи опрацювання отриманої інформації. Дає змогу виявляти і визначати як короткочасні імпульси, так і періодичні сигнали, що є перевагою перед майже усіма пасивними методами. Проте для періодичних акустичних сигналів необхідно, щоб час проходження сигналу від ДАС до сенсорів був меншим за його період. Однією з визначальних переваг є те, що акустичні сенсори можуть розташовуватись випадковим чином, що неможливо для інших розглянутих методів визначення координат ДАС.

Зазначені в таблиці недоліки різницево-часового методу з використанням нейронної мережі суттєво не впливають на результати визначення координат ДАС порівняно з іншими методами. У випадку, коли не потрібна висока точність визначення координат, ДАС

калібрування є необов'язковим, що суттєво спрощує технічну реалізацію.

Висновки. У статті розглянуто методи визначення координат розташування джерела акустичного сигналу. Виокремлено переваги і недоліки наведених у статті пасивних і активних методів. Ці методи можуть знайти застосування в авіації, космонавтиці, машинобудуванні й інших галузях науки та техніки, де використовують вимірювання, і призначені для визначення координат джерела акустичного сигналу.

За результатами дослідження зроблено висновок, що активні методи є малоефективними для визначення координат ДАС, тому необхідно застосовувати пасивні методи. Вони позбавлені основних недоліків активних методів. А їх перевагою є те, що не потрібно надсилати в навколишнє середовище достатньо потужний сигнал з певними характеристиками.

Наукова новизна полягає в застосуванні штучних нейронних мереж для визначення координат джерела акустичного сигналу.

Практична цінність полягає в обґрунтуванні того, що різницево-часовий метод з використанням нейронних мереж є оптимальним для визначення координат джерела акустичного сигналу порівняно з іншими розглянутими активними та пасивними методами.

В подальших дослідженнях планується синтез структури системи та програмно-математичних моделей для навчання штучної нейронної мережі.

Список використаних джерел

- [1] С. О. Козерук, О. І. Нижник, та Н. І. Лисенко, *Акустичні інформаційні системи*. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.
- [2] N. Roman, W. DeLiang, and G. J. Brown, "Speech segregation based on sound localization", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 14, no. 4, p. 2236, July 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1121/1.1610463>. Accessed on: Aug. 23, 2021.
- [3] F. Papi, D. Tarchi, M. Vespe, F. Oliveri, F. Borghese, G. Aulicino, and A. Voller, "Radiolocation and tracking of automatic identification system signals for maritime situational awareness", *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 9, no. 5, pp. 568-580, June

2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-rsn.2014.0292>. Accessed on: Aug. 23, 2021.
- [4] D. Byrne, and W. Noble, "Optimizing sound localization with hearing AIDS", *Trends in amplification*, vol. 3, no. 2, pp. 51-73, June 1998. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/108471389800300202>. Accessed on: Sept. 1, 2021.
- [5] S. Cheinet, and Th. Broglin, "Sensitivity of shot detection and localization to environmental propagation", *Applied Acoustics*, vol. 93, pp. 97-105, June 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.01.021>. Accessed on: Dec. 10, 2021.
- [6] Ahrens, K. D. Lund, M. Marschall, and T. Dau, "Sound source localization with varying amount of visual information in virtual reality", *Plos One*, vol. 14, no. 3, March 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214603>. Accessed on: July 1, 2021.
- [7] M. A. Steadman, C. Kim, and J.-H. Lestang, "Short-term effects of sound localization training in virtual reality", *Scientific Reports*, vol. 9, Dec. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54811-w>. Accessed on: Dec. 11, 2021.
- [8] C. Rascon, and I. Meza, "Localization of sound sources in robotics: A review", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 96, pp. 184-210, Oct. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.07.011>. Accessed on: Jan. 15, 2022.
- [9] Richard Hammond's Big: Volkswagen Mega Factory, season 1, episode 1, m. 29:15, February 2020. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Richard-Hammonds-Big-Season-1/dp/B084NX8FLZ>. Accessed on: Oct. 21, 2021.
- [10] L. Chehami, E. Moulin, J. de Rosny, C. Prada, O. B. Matar, F. Benmeddour, and J. Assaad, "Detection and localization of a defect in a reverberant plate using acoustic field correlation", *Journal of Applied Physics*, American Institute of Physics, vol. 115, pp. 104901-1-7, March 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4867522>. Accessed on: June 1, 2022.
- [11] L. Sun, and Y. Li, "Acoustic emission sound source localization for crack in the pipeline", In *Proc. Chinese Control and Decision Conf.*, 2010, pp. 4298-4301. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CCDC.2010.5498373>. Accessed on: May 15, 2022.
- [12] D. Salvati, C. Drioli, and G. L. Foresti, "Sound source and microphone localization from acoustic impulse responses", in *Proc. IEEE Signal Processing Letters*, vol. 23, no. 10, pp. 1459-1463, Oct. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/LSP.2016.2601878>. Accessed on: Febr. 18, 2022.
- [13] C. Kim, A. Menon, M. Bacchiani, and R. Stern, "Sound source separation using phase difference and reliable mask selection selection", in *Proc. 2018 IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Apr. 2018, pp. 5559-5563. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8462269>. Accessed on: Sept. 1, 2021.
- [14] L. Wang, and A. Cavallaro, "Time-frequency processing for sound source localization from a micro aerial vehicle", in *Proc. 2017 IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, March 2017, pp. 496-500. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2017.7952205>. Accessed on: May 15, 2022.
- [15] Schasse, C. Tendyck, and R. Martin, "Source localization based on the doppler effect", in *Proc. 2012 Int. Workshop on Acoustic Signal Enhancement (IWAENC)*, Sept. 2012, pp. 1-4. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6309397>. Accessed on: Nov. 11, 2021.
- [16] J. Pak, and L. W. Shin, "Sound localization based on phase difference enhancement using deep neural networks", in *Proc. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, May 2019, pp. 1335-1345. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TASLP.2019.2919378>. Accessed on: Dec. 11, 2021.
- [17] M. Ranjkesh, and R. Hasanzadeh, "A fast and accurate sound source localization method using the optimal combination of SRP and TDOA methodologies", *Journal of Information Systems and Telecommunication*, vol. 3, no. 2, pp. 100-108, Apr. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7508/jist.2015.02.005>. Accessed on: Oct. 1, 2021.
- [18] M. Đurković, "Localization, tracking, and separation of sound sources for cognitive

robots", Dissertation, Technische Universität München, Munich, Germany, 2012.

- [19] R. A. Brualdi, *Introductory Combinatorics*, 5th ed. Reading, Pearson Prentice Hall, 2010. [Online]. Available: <https://www.academia.edu/>

References

- [1] S. O. Kozheruk, O. I. Nyzhnyk, and N. I. Lysenko, *Acoustic information systems*. Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018 [in Ukrainian].
- [2] N. Roman, W. DeLiang, and G. J. Brown, "Speech segregation based on sound localization", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 14, no. 4, p. 2236, July 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1121/1.1610463>. Accessed on: Aug. 23, 2021.
- [3] F. Papi, D. Tarchi, M. Vespe, F. Oliveri, F. Borghese, G. Aulicino, and A. Vollero, "Radiolocation and tracking of automatic identification system signals for maritime situational awareness", *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 9, no. 5, pp. 568-580, June 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-rsn.2014.0292>. Accessed on: Aug. 23, 2021.
- [4] D. Byrne, and W. Noble, "Optimizing sound localization with hearing AIDS", *Trends in amplification*, vol. 3, no. 2, pp. 51-73, June 1998. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/108471389800300202>. Accessed on: Sept. 1, 2021.
- [5] S. Cheinet, and Th. Broglin, "Sensitivity of shot detection and localization to environmental propagation", *Applied Acoustics*, vol. 93, pp. 97-105, June 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.01.021>. Accessed on: Dec. 10, 2021.
- [6] A. Ahrens, K. D. Lund, M. Marschall, and T. Dau, "Sound source localization with varying amount of visual information in virtual reality", *Plos One*, vol. 14, no. 3, March 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214603>. Accessed on: July 1, 2021.
- [7] M. A. Steadman, C. Kim, and J.-H. Lestang, "Short-term effects of sound localization training in virtual reality", *Scientific Reports*, vol. 9, Dec. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54811-w>. Accessed on: Dec. 11, 2021.
- [8] C. Rascon, and I. Meza, "Localization of sound sources in robotics: A review", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 96, pp. 184-210, Oct. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.07.011>. Accessed on: Jan. 15, 2022.
- [9] Richard Hammond's Big: Volkswagen Mega Factory, season 1, episode 1, m. 29:15, February 2020. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Richard-Hammonds-Big-Season-1/dp/B084NX8FLZ>. Accessed on: Oct. 21, 2021.
- [10] L. Chehami, E. Moulin, J. de Rosny, C. Prada, O. B. Matar, F. Benmeddour, and J. Assaad, "Detection and localization of a defect in a reverberant plate using acoustic field correlation", *Journal of Applied Physics*, American Institute of Physics, vol. 115, pp. 104901-1-7, March 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4867522>. Accessed on: June 1, 2022.
- [11] L. Sun, and Y. Li, "Acoustic emission sound source localization for crack in the pipeline", In *Proc. Chinese Control and Decision Conf.*, 2010, pp. 4298-4301. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CCDC.2010.5498373>. Accessed on: May 15, 2022.
- [12] D. Salvati, C. Drioli, and G. L. Foresti, "Sound source and microphone localization from acoustic impulse responses", in *Proc. IEEE Signal Processing Letters*, vol. 23, no. 10, pp. 1459-1463, Oct. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/LSP.2016.2601878>. Accessed on: Febr. 18, 2022.
- [13] C. Kim, A. Menon, M. Bacchiani, and R. Stern, "Sound source separation using phase difference and reliable mask selection selection", in *Proc. 2018 IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Apr. 2018, pp. 5559-5563. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8462269>. Accessed on: Sept. 1, 2021.
- [14] L. Wang, and A. Cavallaro, "Time-frequency processing for sound source localization from a micro aerial vehicle", in *Proc. 2017 IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, March 2017, pp. 496-500. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2017.7952205>. Accessed on: May 15, 2022.

- [15] A. Schasse, C. Tendyck, and R. Martin, "Source localization based on the doppler effect", in *Proc. 2012 Int. Workshop on Acoustic Signal Enhancement (IWAENC)*, Sept. 2012, pp. 1-4. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6309397>. Accessed on: Nov. 11, 2021.
- [16] J. Pak, and L. W. Shin, "Sound localization based on phase difference enhancement using deep neural networks", in *Proc. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, May 2019, pp. 1335-1345. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TASLP.2019.2919378>. Accessed on: Dec. 11, 2021.
- [17] M. Ranjkesh, and R. Hasanzadeh, "A fast and accurate sound source localization method using the optimal combination of SRP and TDOA methodologies", *Journal of Information Systems and Telecommunication*, vol. 3, no. 2, pp. 100-108, Apr. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7508/jist.2015.02.005>. Accessed on: Oct. 1, 2021.
- [18] M. Đurković, "Localization, tracking, and separation of sound sources for cognitive robots", Dissertation, Technische Universität München, Munich, Germany, 2012.
- [19] R. A. Brualdi, *Introductory Combinatorics*, 5th ed. Reading, Pearson Prentice Hall, 2010. [Online]. Available: <https://www.academia.edu/>

S. I. Artemuk, *Ph. D. student*,
e-mail: serhii.i.artemuk@lpnu.ua

I. P. Mykytyn, *Dr. Sc., Professor*
e-mail: mykytynip@ukr.net

Lviv Polytechnic National University
Stepan Bandera St, 12, Lviv, 79000, Ukraine

METHODS OF DETERMINING THE COORDINATES OF THE ACOUSTIC SIGNAL SOURCE

The article carries out a literature review and investigates the existing methods of determining the coordinates of the location of the acoustic signal source. The advantages and disadvantages of passive and active methods given in the article are highlighted. These methods can be used in aviation, cosmonautics, mechanical engineering and other fields of science and technology, where measurements are used, and are designed to determine the coordinates of the acoustic signal source. Recently, there has been a growing interest in using neural networks to solve various problems and their application in various fields. With the help of artificial neural networks, it is possible to process, analyze and summarize information. The authors of the article have compared the method of determining the coordinates of the location of the acoustic signal source using an artificial neural network with existing methods. In this method, the presence of a signal from the acoustic signal source at the reception points is determined by receiving and registering the signal at spatially separated points with known coordinates and further determining the difference in signal propagation times from the source to the signal reception points. The presence of a signal is determined by the middle of the area of the received signal. The number of signal reception points is set at the training stage of the artificial neural network according to the minimum error criterion in determining the coordinates of the acoustic signal source. The time differences of signal propagation from the source to the signal reception points are determined between all reception points, which are located in an orderly or random manner, and these time differences are fed to the input of a previously trained artificial neural network, at the output of which the coordinates of the acoustic signal source are obtained. The application of this method allows to determine the coordinates of the acoustic signal source without having prior information about the distance to the acoustic signal source or any other characteristics of the object, to determine the coordinates of non-periodic signals, to simplify the process of measuring time intervals and calculating coordinates.

Keywords: *determination of coordinates, acoustic signals, minimum method, maximum method, radiolocation, direction finding, artificial neural network, deep learning, sound.*

Стаття надійшла 02.07.2022

Прийнято 25.07.2022