https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-28
УДК 004

МИКИТИН Ігор
Національний університет «Львівська політехніка»
e-mail: mykytynip@ukr.net
ПУКАЛЬСЬКИЙ Остап
Національний університет «Львівська політехніка»
https://orcid.org/0000-0001-9929-7534
e-mail: ostap.pukalskyy@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛА ЗВУКОВОГО СИГНАЛУ

У статті проведено аналіз основних переваг та недоліків існуючих методів розпізнавання координат джерела звукового сигналу. Запропоновано новий метод для вирішення задачі розпізнавання координат джерела звукового сигналу - метод розпізнавання джерела звукового сигналу з використанням нейронної мережі. Описано його основний принцип та очікувані характеристики. Досліджено доцільність та актуальність методу. Визначено вимоги до методу розпізнавання джерела звукового сигналу з використанням нейронної мережі, а також перелік досліджень необхідних для забезпечення усіх вимог.

Ключові слова: нейронна мережа, джерело звукового сигналу, метод визначення.

MYKITYN Ihor, PUKALSKYY Ostap
Lviv Polytechnic National University

RESEARCH AND ANALYSIS OF METHODS FOR RECOGNITION COORDINATES SOUND SOURCE SIGNAL

From time immemorial, the task of identifying the source coordinates of various types of signals has remained relevant. The need to determine the coordinates of the sound signal source is very important for such fields as the army, astronomy, transport, communication, meteorology, etc. Therefore, mankind has always worked on finding new methods for determining the coordinates of the sound signal source, and also tried to improve the capabilities and functionality of the existing ones. There are quite a lot of such methods and systems on the world market. Everyone has the same task - determining the coordinates of the sound signal source, but for this they use different principles and methods of implementation, we will try to understand their characteristics and compare their advantages and disadvantages. The purpose of the article is to carry out an analysis of existing methods of sound signal source recognition, comparing their characteristics. Evaluation of their disadvantages and advantages. Proving the feasibility of the proposed method, defining its requirements, and also presenting a list of studies necessary to meet all requirements.

The article analyzes the main advantages and disadvantages of the existing methods of recognizing the coordinates of the sound signal source. A new method for solving the problem of recognizing the coordinates of a sound signal source is proposed - a method of sound signal source recognition using a neural network. Its basic principle and expected characteristics are described. The expediency and relevance of the method was studied. The requirements for the method of sound signal source recognition using a neural network are defined, as well as the list of studies necessary to meet all requirements.

Keywords: neural network, sound signal source, detection method.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Споконвіку, завдання виявлення координат джерела різного роду сигналу залишалося актуальним. Необхідність визначення координат джерела звукового сигналу, є дуже важливим для таких сфер як армія, астрономія, транспорт, комунікація, метеорологія тощо. Тому, людство завжди працювало над знаходженням все нових методів визначення координат джерела звукового сигналу, а також намагалося покращити можливості та функціонал існуючих.

Існує досить багато, такого роду методів та систем на світовому ринку. Завдання у всіх одне - визначення координат джерела звукового сигналу, але для цього воно використовують різні принципи та методи реалізації, ми спробуємо розібратися у їх характеристиках та порівняти їх переваги та недоліки.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Мета статті - здійснення аналізу існуючих методів розпізнавання джерела звукового сигналу, порівняння їх характеристик. Оцінка їх недоліків та переваг. Доведення доцільності запропонованого методу, визначення його вимог, а також, представлено перелік досліджень необхідних для забезпечення усіх вимог.

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛА ЗВУКОВОГО СИГНАЛУ

Для виконання аналізу було обрану три методи які найчастіше використовуються для визначення координат джерела звукового сигналу: Радіолокаційний кутомірний (тріангуляційний) метод, Різницево-

далекомірний та Метод локалізації джерела звукового сигналу. Всі вони різні за принципом, але мета у всіх одна визначення координат джерела звукового сигналу.

Кутомірний (тріангуляційний) метод знаходження координат джерела звукового сигналу засновано на вимірюванні азимутів (мінімум двох) і кута місця в рознесених на відстань Б (базу) пунктах прийому. Найпростіший варіант такої системи пасивної локації передбачає два рознесених пункти прийому: центральний пункт прийому (ЦПП), де вимірюється азимут (β_0) і кут місця (ε_0) об'єкту і «винесений» пункт прийому (ВПП), в якому вимірюється тільки азимут на ціль (β_1). Узагальнена структурна схема такої системи пасивної локації наведена на рис. 1.

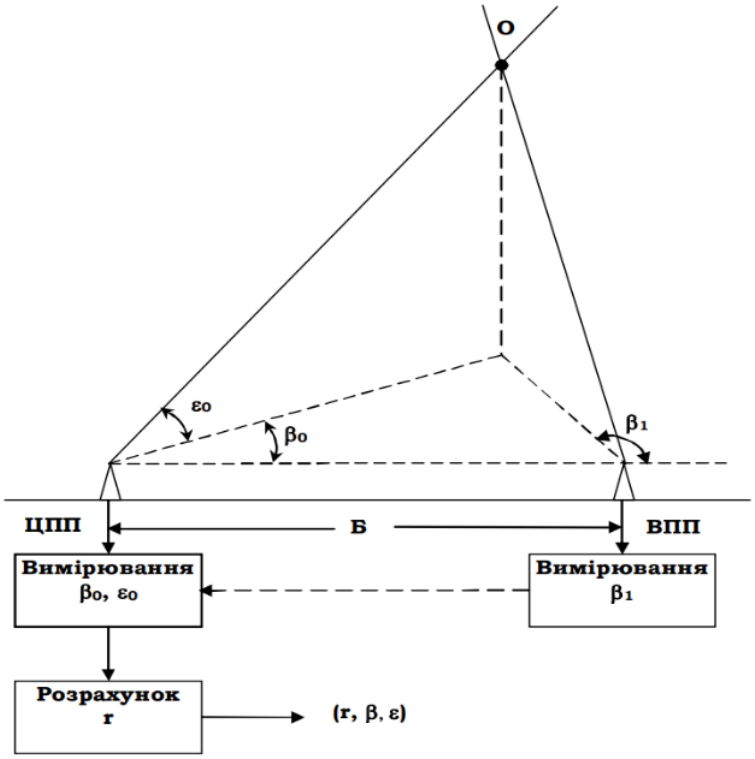

Рис. 1. Узагальнена структурна схема системи локації с кутомірним методом виміру координат [1]

Кутові координати (β_0, ε_0) , вимірюються аналогічно виміру координат в системах активної локації. Точність кутових вимірювань практично така ж і залежить від ширини діаграми направленості антени.

Вимірювання дальності r_0 здійснюється рішенням трикутників, в яких відомі Б і кути β_0, β_1, ε_0. З геометрії представленої системи виходять два рівняння:

$$(r_0 \cos \varepsilon_0) \cos \beta_0 + (r_1 \cos \varepsilon_1) \cos(180^0 - \beta_1) = Б;$$
$$(r_0 \cos \varepsilon_0) \sin \beta_0 = (r_1 \cos \varepsilon_1) \sin(180^0 - \beta_1).$$

Розв'язуючи одне з них щодо $r_1 \cos \varepsilon_1$ і підставляючи в друге рівняння, отримаємо, що:

$$r_0 = Б \sin \beta_1 / \cos \varepsilon_0 \sin (\beta_0 - \beta_1) . \quad (1)$$

Точність вимірювання дальності залежить від кутових помилок , σ_β σ_ε величини бази Б і функціональної залежності r_0 f (Б, β_0, β_1, ε_0), яка визначається виразом:

$$\lim_{n\to\infty}\left(\left(\frac{1}{\sigma_П^2}\right)\sum_{k=1}^{n} y_k^2\right) = \left(\frac{2}{N_П}\right)\int_0^T y^2(t)dt$$

Закон розподілу випадкових помилок дальності по відомих законах розподілу помилок β і ε визначається виразом (2)

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2. \quad (2)$$

При розрахунках виразу (2) використовується метод лінеаризації функцій[корн].
Для системи пасивної локації вираз (2) має вигляд (3)

$$\sigma_r^2 = (\frac{dr}{d\beta_0})^2\sigma_{\beta_0}^2 + (\frac{dr}{d\varepsilon_0})^2\sigma_{\varepsilon_0}^2 + (\frac{dr}{d\beta_1})^2\sigma_{\beta_1}^2. \quad (3)$$

З наведеного вище витікає, що точність визначення дальності до об'єкта в системах пасивної локації залежить від:

– помилок кутових вимірювань σ_β, σ_ε ;
– величини бази;
– положення цілі в зоні щодо нормалі до бази;
– дальності до цілі.

На великих відстанях помилки σ_r можуть складати до 10 % від дальності до об'єкта. [1]

Різницево-далекомірний метод вимірювання дозволяє виміряти як дальність до цілі, так і її кутові координати (без використання методів пеленгації) [2]. Система пасивної локації, в якій використовується даний метод вимірювання координат об'єкту, отримала назву базово-кореляційної системи (БКС) [2].

Найпростіша БКС (рис. 2) складається з одного ЦПП і двох ВПП. В кожному ВПП здійснюється прийом, підсилення прийнятого сигналу і трансляція його із збереженням структури на ЦПП.

Для трансляції використовуються радіорелейні або тропосферні лінії зв'язку. В ЦПП також здійснюється прийом сигналу і обчислюються взаємно кореляційні функції сигналів $R_{0\,j}$, прийнятих різними пунктами прийому, які необхідні для вимірювання різниці відстаней $\Delta_{r0\,j}$. ВПП2 Приймач РЛС Приймач РЛС Передавач Приймач Лінія зв'язку Пристрій кореляції Обчислення координат

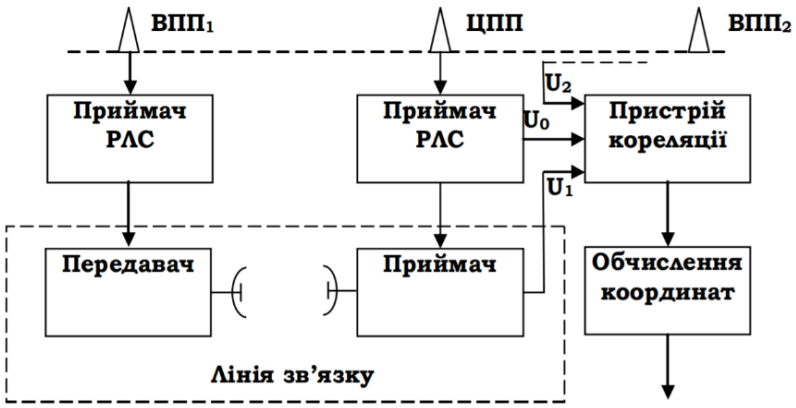

Рис. 2. Базово-кореляційна система [1]

Вимірювання координат засновано на обчисленні різниці відстаней до цілі з різних ВПП щодо дальності від ЦПП. Як відомо [корн], постійну різницю відстаней до двох рознесених точок характеризує у двомірного випадку (на площині) гіпербола, а в тримірному випадку (у просторі)– гіперболоїд. Отже, зміряна величина (наприклад, $\Delta r_{01} = r_0 - r_1$, рис. 3) визначає в площині гіперболоїд, в одній з точок якого знаходиться ціль. Для вимірювання площинних координат достатньо виміряти ще одну різницю відстаней – Δr_{02}. Координати цілі визначаються точкою перетину двох гіпербол. [3]

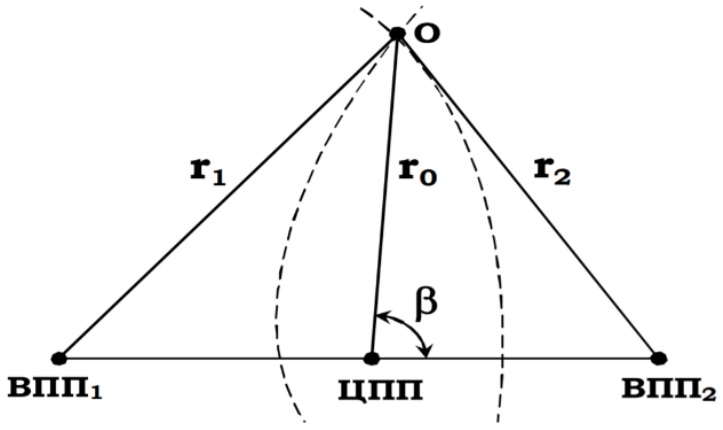

Рис. 3. Визначення різниці відстаней в системі пасивної локації [1]

Просторові координати об'єкта визначаються точкою перетину трьох гіперболоїдів, що відповідні величинам різниці відстаней Δr_{01}, Δr_{02} , Δr_{03}.

Різниця відстаней вимірюється за допомогою корелятора (рис. 4), на який поступають вихідні сигнали суміжних каналів.

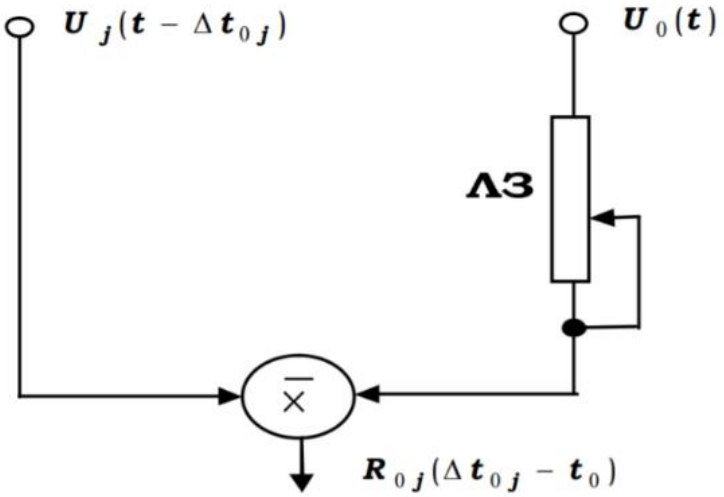

Рис. 4. Корелятор виміру затримки між прийнятими коливаннями [1]

Корелятор дозволяє виміряти відносну затримку між прийнятими коливаннями. В процесі вимірювання проводиться огляд по затримці в межах можливого інтервалу її зміни

$$\Delta \tau_{max} = Б/с, \qquad \text{де с – швидкість світла.}$$

Огляд може бути як паралельним (багатоканальна схема), так і послідовним.

При компенсації відносної затримки прийнятих сигналів ($\tau = t_3$) на виході корелятора виникає кореляційний імпульс. Час запізнювання з t_3 в даний момент визначає величину Δr_{01}.

Таким чином, координати об'єкта в БКС визначаються на підставі вимірювання первинних параметрів – різниць відстаней. Практично обчислення координат цілі здійснюється спец обчислювачем.

Точність вимірювання координат визначається точністю виміру Δt_{0j} і залежить від положення об'єкта в зоні відносно нормалі до бази. З метою забезпечення високої точності вимірювань в заданій зоні застосовується нелінійне розташування баз, тобто спеціальна геометрія системи. [1]

Метод локалізації джерела звукового сигналу (Sound Source Localization). Розташування джерела звуку, у даному методі буде здійснено використовуючи сферичну систему координат, початок якої буде розташовано на середині відстані між двома мікрофонами. Основна ціль даного методу полягає у визначенні азимуту та кутів підйому джерела звуку відносно початку системи[7].

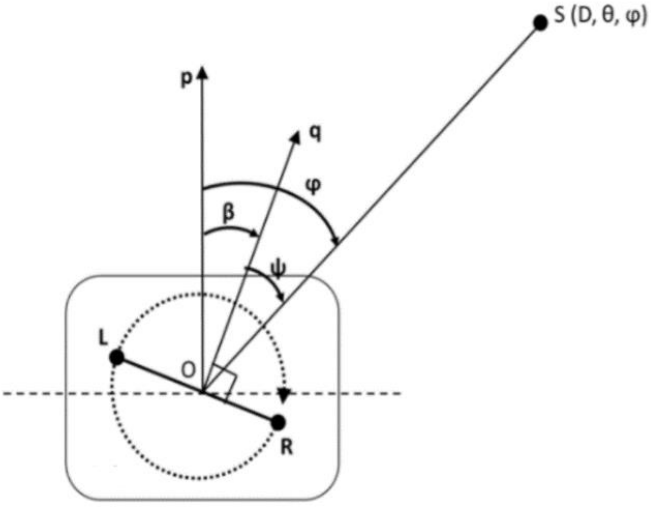

Рис.5 Структурна схема методу (вид з верху). [4]

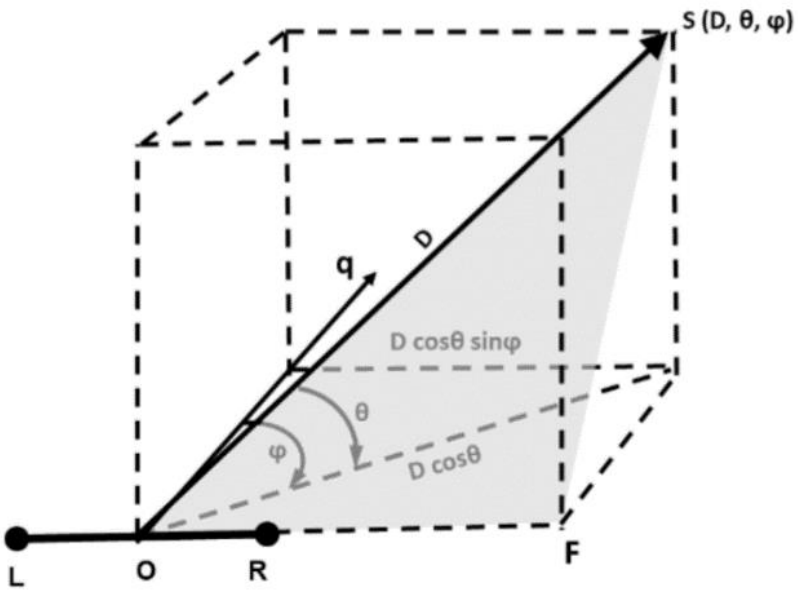

Рис.6 3D модель методу.[4]

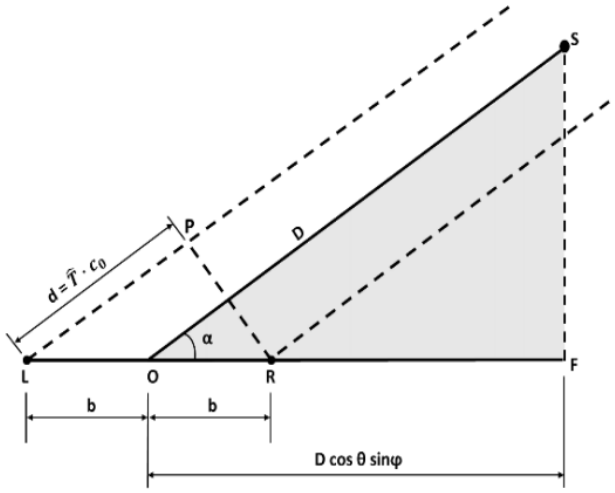

Рис 7. Вид з гори трикутника SOF.[4]

Як показано на рис. 5 і 6, акустичний сигнал, що генерується джерелом звуку S, детектується лівим і правим мікрофонами L і R відповідно. Нехай O - центр двох мікрофонів. Розташування джерела звуку зображено (D, θ, φ), де D - довжина відрізка OS, $\theta\epsilon$ [0, $\pi/2$] - кут висоти, визначений як кут між OS та горизонтальною площиною, і $\psi \epsilon [\pi, \pi]$ - кут азимута, визначений як кут, виміряний за годинниковою стрілкою від вектора **p** до OS. Нехай одиничний вектор **q** - орієнтир мікрофонів, β кут між **p** і **q**, а ψ кут між **q** і OS, обидва за правим обертання праворуч, маємо

$$\varphi = \psi + \beta. \tag{4}$$

У трикутнику ΔSOF (виділено оранжевим), показаному на рис. 6 та 7, визначимо $\alpha = \angle SOF$ і маємо cosα = cos θ sin ψ. Виходячи з теорії дальнього поля [18], маємо

$$d \triangleq T. c0 = 2b \cos \alpha = 2b \cos \theta \sin \psi. \tag{5}$$

Щоб уникнути сплутування конуса [5], мікрофони обертаються з ненульовою кутовою швидкістю [6]. Припускаючи те, що сама система є нерухомою то звідси випливає, що φ є постійним. Початковий стан мікрофонів налаштований так, щоб він збігався із вектором P, тобто β (t = 0) = 0, з чого випливає, що $\varphi = \psi$ (0). Оскільки масив мікрофони обертаються за годинниковою стрілкою з постійною кутовою швидкістю, ω, то β (t) = ωt і за враховуючи рівняння. (4) маємо

$$\psi(t) = \varphi - \beta(t) = \varphi - \omega t. \quad (6)$$

Результуюче часо-змінне рівняння, буде мати вигляд:

$$d(t) = 2b \cos\theta \sin(-\omega t + \varphi). \quad (7)$$

Оскільки мікрофони обертаються на горизонтальній площині, θ не змінюється під час обертання для нерухомого джерела звуку. Отриманий $d(t)$ є синусоїдальним сигналом з амплітудою $A \triangleq 2b \cos\theta$, з чого випливає, що $\theta = cos - 1\ A\ 2b$. Фазовий кут $d(t)$ - кут азимута джерела звуку. Тому місце знаходження стаціонарного джерела звуку прирівнюється до ідентифікації характеристик (тобто амплітуди та фазового кута) синусоїдального сигналу $d(t)$.

ПОРІВНЯННЯ СИСТЕМ

БКС система є доволі складна в реалізації, це зумовлене наступними обставинами:

- необхідністю використання спеціальних широкосмугових ліній зв'язку;
- можливістю роботи тільки по шумоподібному сигналу з однозначною функцією кореляції.

Перевагою БКС у порівнянні з тріангуляційними системами є більш висока точність вимірювань координат і відсутність хибних об’єктів, оскільки вимірювання Δt_{0j} одночасно здійснює кореляційне ототожнення сигналів, прийнятих в різних пунктах прийому.

У зв’язку з технологічними труднощами побудови БКС та вимогами щодо наявності пунктів прийому, даний метод широко не використовується. В основному використовують тріангуляційні системи визначення координат джерела звукового сигналу. [1]

Метод локалізації джерела звукового сигналу, представляє собою складну систему, що вимагає обертання мікрофонів для свого функціонування. Також великим недоліком цього методу є стаціонарність, тобто не можливість використовувати його при даний метод у рухомій системі.

МЕТОД ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ЗВУКОВОГО СИГНАЛУ

Оскільки з’явився новий цікавий математичний апарат – нейронна мережа, то можна створити новий метод визначення координат сигналу. А саме, метод, в якому визначення координат джерела звукового сигналу, здійснювалося розпізнаванням їх нейронною мережею. Основним принципом, такого методу є створення та навчання моделі нейронної мережі, для ідентифікації координат джерела звукового сигналу. Для дослідження такого методу можна запропонувати, два варіанти навчальних даних нейронної мережі:

1) Варіант визначення гео-координат джерела звукового сигналу. Цей варіант передбачає довільне розташування звукових сенсорів на площині, з відомими їх гео-координатами x1, y1, x2, y2, x3, y3 (використовуючи GPS). А також фіксацію часу (t_1, t_2 t_3) проходження звукового сигналу, від його джерела (з координатами Хдж та Yдж) (Рис. 8)

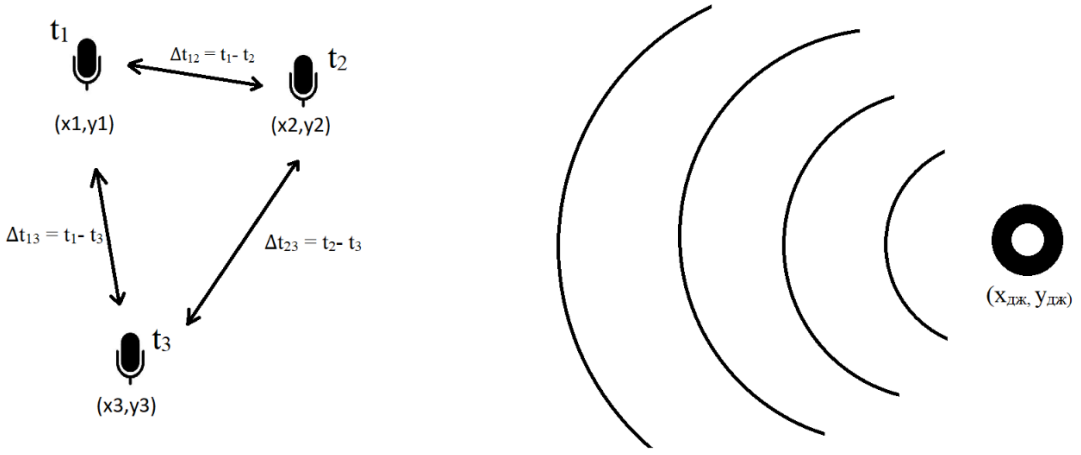

Рис. 8. Процес детектування звукового сигналу від його джерела, з координатами Хдж, Yдж

ISSN 2219-9365

У цьому варіанті, вхідною інформацією до нейронної мережі, буде часова різниця, між часами детектування джерела звукового сигналу звуковими сенсорами (Δt_{12}, Δt_{23}, Δt_{13}) і географічні координати сенсорів (x1, y1, x2, y2, x3, y3). (Рис. 9) На виході нейронної мережі є координати джерела звукового сигналу ($x_{дж}$, $y_{дж}$) (Рис. 9)

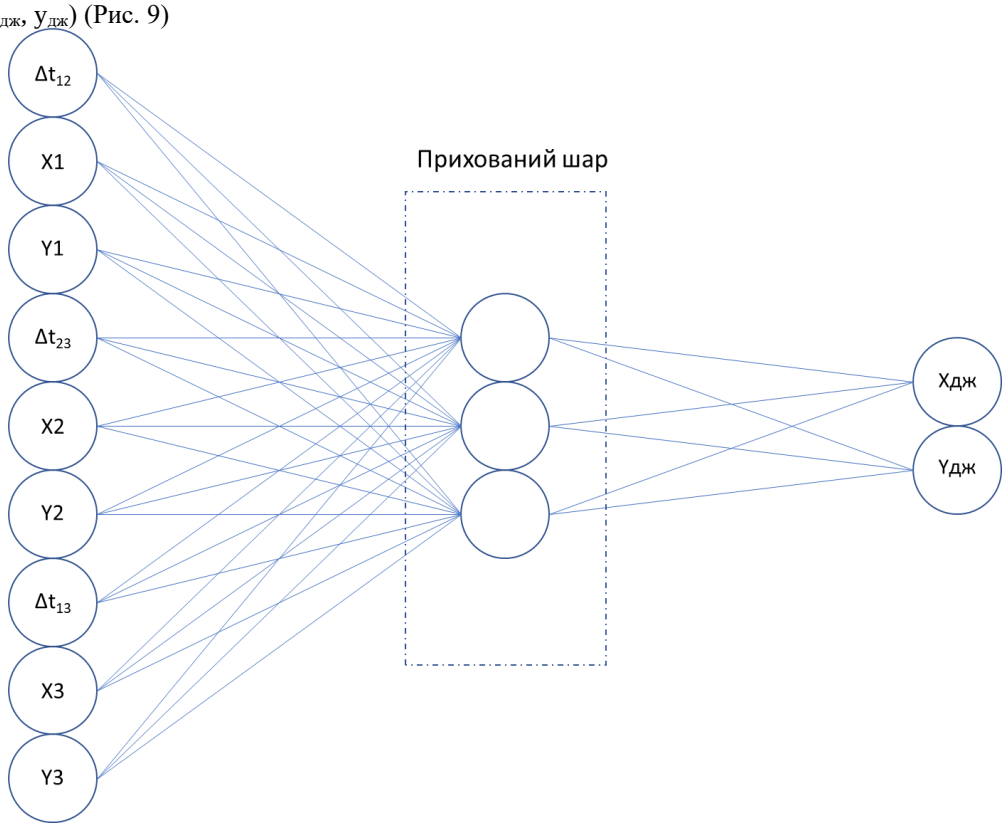

Рис. 9. Структура нейронної мережі для визначення координат (Хдж, Удж) джерела звукового сигналу

Таким чином, ми безпосередньо визначаємо географічні координати джерела звукового сигналу. Недоліком цього варіанту є відсутність математичного зв'язку різниці часів (Δt_{12}, Δt_{23}, Δt_{13}) з координатами (x1, y1, x2, y2, x3, y3).

2) Варіант визначення відстаней до джерела звукового сигналу; У другому варіанті передбачається довільне розташування звукових сенсорів на площині. А також фіксацію часу (t_1, t_2 t_3) проходження звукового сигналу, від його джерела, яке знаходиться на певних відстанях (S1, S2, S3, S4) від сенсорів (Рис. 10)

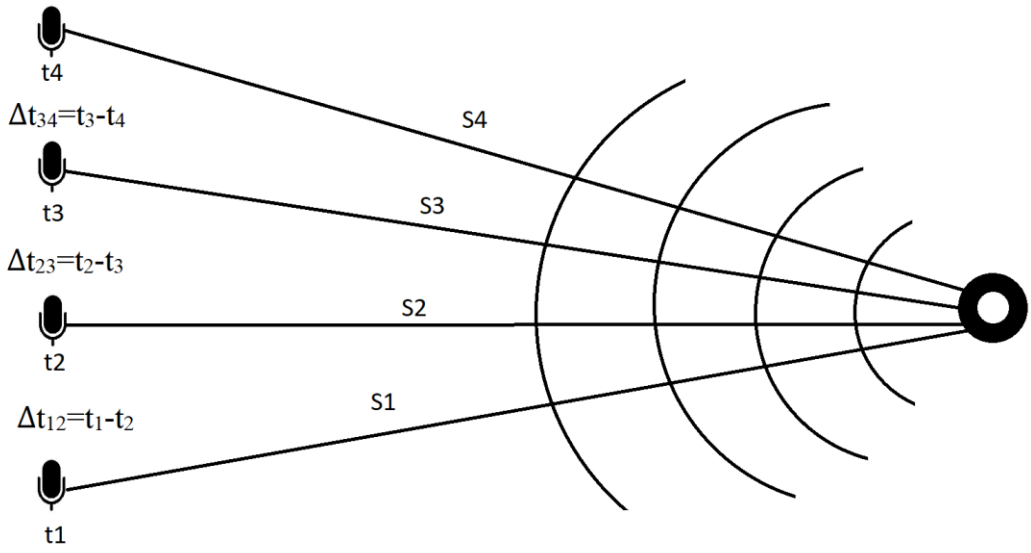

Рис. 10. Процес детектування звукового сигналу від його джерела, на відстанях (S1, S2, S3, S4) від сенсорів

У цьому варіанті, вхідною інформацією до нейронної мережі, буде часова різниця, між часами детектування джерела звукового сигналу звуковими сенсорами (Δt_{12}, Δt_{23}, Δt_{34}), а вихідною - відстані (S1, S2, S3, S4) між сенсорами до джерела звукового сигналу. (Рис. 11)

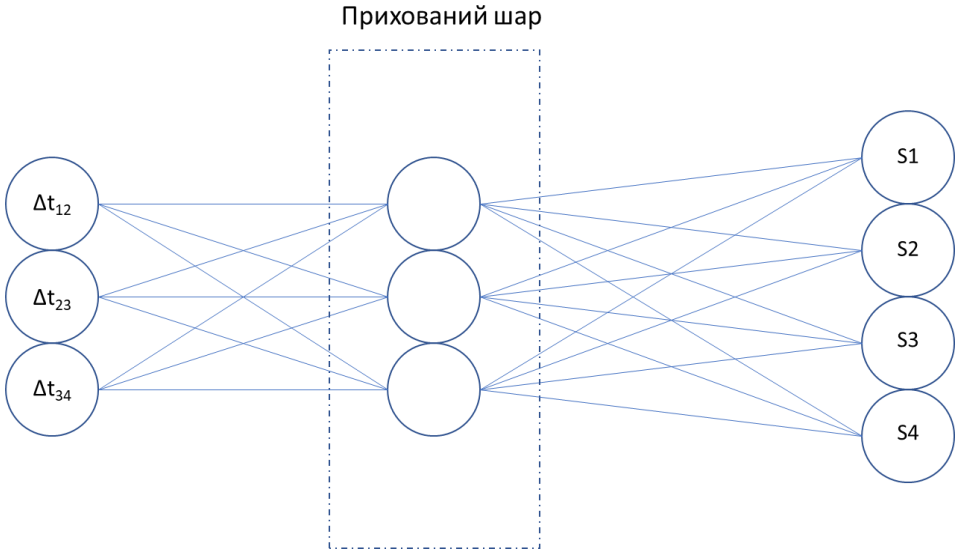

Рис. 11 Структура нейронної мережі для визначення відстаней (S1, S2, S3, S4) від кожного з сенсорів до джерела звукового сигналу

Для навчання нейронної мережі, буде створено математичну модель поширення звукового сигналу в просторі, базуючись на відомих законах фізики. Навчальний набором буде масив з певною кількістю (n) навчальних вибірок. Кожна навчальна вибірка, скрадатиметься з довільно генерованого розташування джерела звукового сигналу (вихід нейронної мережі -Y), та обчислених (використовуючи модель) часових різниць (вхід нейронної мережі - X). Після навчання, кожна модель проходить перевірку на якість навчання, а саме, обчислюється її абсолютна похибка визначення розташування джерела звукового сигналу. Це відбувається наступним чином:

- Генерується (новий аналогічний вище описаному) навчальний набір з n кількістю X та Y;
- Для кожної навчальної вибірки X для виконується прогнозування, таким чином отримуємо n кількість прогнозованих $Y_{прог}$;
- Віднімаємо кожне прогнозоване значення від очікуваного ($Y - Y_{прог}$), отримуємо похибку для кожної вибірки ΔY;
- Вибираємо максимальне значення $\Delta Y_{макс}$, це і буде показником успішності навчання.

Варто зауважити що, для даної задачі показником успішності буде саме абсолютна похибка, оскільки відносна похибка буде залежати від самої величини, тобто для визначення координати 2 з похибкою 1, значення її відносної похибки буде рівним 50%, що не є коректним показником якості навчання.

Успішне навчання, такої моделі нейронної мережі, забезпечить можливість реалізації її на різного роду мобільних пристроях, які містять в собі мікрофон і можуть бути об’єднанні до спільної системи комунікації використовуючи будь-який відомий бездротовий інтерфейс. Також, використовувані мобільні пристрої повинні містити зв'язок з GPS, для визначення власних координат. Тому, даний метод може бути застосований системою, побудованою на звичайних смартфонах.

ПЕРЕЛІК ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМУМУ ПОХИБКИ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛА ЗВУКОВОГО СИГНАЛУ

Оскільки, для розпізнавання координат джерела звукового сигналу, буде використана нейронна мережа, то основним предметом дослідження буде, підбір найоптимальніших параметрів нейронної мережі, для забезпечення усіх поставлених вимог.

Перелік основних параметрів нейронної мережі, що вимагають дослідження:

- Вплив типу нейронної мережі на похибку визначення координат джерела звукового сигналу;
- Вплив кількості внутрішніх шарів на похибку визначення координат джерела звукового сигналу;

- Вплив кількості навчальних вибірок на похибку визначення координат джерела звукового сигналу;
- Вплив кількості навчальних циклів (епох) на похибку визначення координат джерела звукового сигналу;
- Вплив кількості нейронів на похибку визначення координат джерела звукового сигналу;
- Вплив кількості звукових сенсорів на похибку визначення координат джерела звукового сигналу;
- Вплив розташування звукових сенсорів на похибку визначення координат джерела звукового сигналу;
- Вплив перешкод та нерівності рельєфу на похибку визначення координат джерела звукового сигналу;
- Порівняння ефективності двох запропонованих варіантів вхідних даних до нейронної мережі;
- Можливість застосування двох нейронних мереж для окремого, розпізнавання кожної з координат;

Для первинного виконання перелічених досліджень, повинна бути створена математична модель поширення звукового сигналу в просторі, базуючись на загальновідомих законах фізики. Основний принцип дослідження полягає у варіації певного параметра моделі нейронної мережі, та оцінки його впливу на непевність. Таким чином, можна визначити список параметрів нейронної мережі, при застосуванні та навчанні її абсолютна непевність визначення буде найменшою.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У даній статті, проведено аналіз існуючих методів розпізнавання джерела звукового сигналу, здійснено їх порівняння. Запропоновано новий метод з використання нейронної мережі.

Зроблено висновок, що використання методу з застосуванням нейронної мережі для вирішення цієї задачі є доволі доцільним. Успішне проведення досліджень та реалізація методу, дозволить створити нову, ефективну та не дорогу систему, яка може буде вбудована в мобільні пристрої, що є доволі гнучким та інноваційним рішенням.

Література

[1] Метод визначення координат об’єктів в системах пасивної локації: О.А. Арнаутов, Р.В. Момот, Г.В. Худов Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

[2] Спосіб сумісного пошуку і виявлення радіолокаційних об’єктів: Пат. 71735 А України, МКИ.

[3] https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B0%D1%81%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%B0_%D1%80%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F

[4] Proceedings of the 5th International Conference of Control, Dynamic Systems, and Robotics (CDSR'18) Niagara Falls, Canada – June 7 – 9, 2018

[5] H. Wallach, “On sound localization,” The Journal of the Acoustical Society of America, pp. 270-274, 1939.

[6] X. Zhong, L. Sun, W. Yost, “Active binaural localization of multiple sound sources,” Robotics and Autonomous Systems, pp. 83-92, 2016.

[7] J. Hornstein, M. Lopes, J. Santos-Victor, F. Lacerda, “Sound localization for humanoid robots-building audio-motor maps based on the HRTF,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1170-1176, 2006

References

[1] Metod vyznachennia koordynat obiektiv v systemakh pasyvnoi lokatsii: O.A. Arnautov, R.V. Momot, H.V. Khudov Kharkivskyi universytet Povitrianykh Syl im. I. Kozheduba, Kharkiv

[2] Sposib sumisnoho poshuku i vyiavlennia radiolokatsiinykh obiektiv: Pat. 71735 A Ukrainy, MKY.

[3] https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B0%D1%81%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%B0_%D1%80%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F

[4] Proceedings of the 5th International Conference of Control, Dynamic Systems, and Robotics (CDSR18) Niagara Falls, Canada – June 7 – 9, 2018

[5] H. Wallach, “On sound localization,” The Journal of the Acoustical Society of America, pp. 270-274, 1939.

[6] X. Zhong, L. Sun, W. Yost, “Active binaural localization of multiple sound sources,” Robotics and Autonomous Systems, pp. 83-92, 2016.

[7] J. Hornstein, M. Lopes, J. Santos-Victor, F. Lacerda, “Sound localization for humanoid robots-building audio-motor maps based on the HRTF,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1170-1176, 2006