

О.Є. ВОЛКОВ, зав. відділом,

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем
НАН та МОН України, просп. Глушкова, 40, Київ 03187, Україна,
alexvolk@ukr.net

В.Ю. ТАРАНУХА, канд. фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник,
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем
НАН та МОН України, просп. Глушкова, 40, Київ 03187, Україна,
dep185@irtc.org.ua

Я.М. ПИДЕР, канд. фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник,
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем
НАН та МОН України, просп. Глушкова, 40, Київ 03187, Україна,
dep185@irtc.org.ua

Д.О. ВОЛОШЕНЮК, науковий співробітник,
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем
НАН та МОН України, просп. Глушкова, 40, Київ 03187, Україна,
dep185@irtc.org.ua

А.К. СЕРЕБРЯКОВ, аспірант, провід. інженер,
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем
НАН та МОН України, просп. Глушкова, 40, Київ 03187, Україна,
sier.artem1002@outlook.com

ТЕХНОЛОГІЯ АКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ, ВИЯВЛЕННЯ ТА ЛОКАЛІЗАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ У КОНТРОЛЬОВАНОМУ ПРОСТОРИ

Проблема визначення джерела звуку зводиться до вирішення двох задач: визначення напрямку на джерело звуку та визначення відстані до нього. Як правило, точна відстань до джерела звуку є невідомою, через що вона має бути оцінена за допомогою інших вхідних параметрів, таких як, наприклад, отримана потужність звуку та час надходження. У статті описано алгоритм визначення відстані на основі оцінювання потужності звуку та зміни в частоті звучання за відстанню. Звуковий сигнал записується за допомогою групи з чотирьох з'єднаних між собою мікрофонів. Це уможливує використання алгоритму в умовах необхідності спостереження рухомих або нерухомих об'єктів, видимість яких може бути ускладнено.

***Ключові слова:** звуковий сигнал, джерело звуку, локалізація джерела звуку, потужність звуку, алгоритм визначення відстані, обмежена видимість, крос-кореляційна функція, імпульсний сигнал, перетворення Фур'є, багатоканальний запис, показник якості, відносна похибка, нормальний розподіл, низькочастотна фільтрація.*

Вступ

Визначення напрямку на джерело акустичного сигналу та оцінка відстані до нього є типовими задачами, які широко розглядаються в науковій літературі [1–5].

Розв'язання цих задач має важливе значення в умовах, коли інші методи локалізації об'єктів є недоступними або ускладненими, наприклад, за обмеженої видимості. Акустичне визначення відстані використовується в області спостереження та моніторингу багатьох типів об'єктів, а також може використовуватися для побудови інтерфейсу практичних систем взаємодії людини з машиною, для мобільних платформ, таких як камери стеження або телеконференційні системи [6], і може використовуватися також для потреб військової галузі. Системи акустичного спостереження за наявності засобів визначення напрямку та відстані можуть використовуватися у боротьбі з тероризмом, коли треба визначити джерело потенційної загрози.

Одним з найвикористовуваніших способів сприйняття звукового сигналу є використання об'єднаної групи сенсорів або мікрофонів у кількості, як правило, від одного до шести [7–15].

Мікрофони можуть розташовуватися на нерухомій або рухомій платформі, в останньому разі первинна задача ускладнюється через необхідність фільтрації шумів рухомої платформи на додачу до шумів середовища.

Серед методів [16–19] визначення характеристик джерела звуку є такі: використання нейронних мереж, оцінка відстані на основі потужності звуку, за допомогою статистичних даних, локалізація звуку на основі кореляційних функцій та інші.

У цій статті пропонується метод оцінки відстані до джерела звуку, що базується на підході з використанням чотирьох мікрофонів для запису імпульсного сигналу та його подальшої обробки за допомогою амплітудного та частотного алгоритмів. Кожен

з алгоритмів дає змогу отримати достатньо точну оцінку відстані до джерела звуку, навіть коли отриманий сигнал спотворено шумами та відлунням.

Фізика досліджуваного процесу

Під час вибуху джерелом звуку є ударна хвиля, що переходить у звукову. При пострілі джерелами звуку є два явища: дульна хвиля та балістична хвиля.

Дульна хвиля — це потужний звуковий імпульс у вигляді сферичної хвилі. Її центр розташований трохи попереду від дульного зрізу зброї. Поблизу від гармати (чи гвинтівки) швидкість дульної хвилі трохи перевищує швидкість звуку, але вже на відстані в кілька десятків метрів ця швидкість не відрізняється від швидкості звуку.

Балістична хвиля — це зона підвищеного тиску, утвореного при польоті снаряда (кулі) з надзвуковою швидкістю. Вона має вид конуса, що розділяє збурене та незбурене повітря.

Оскільки бажано, щоб метод був придатний для визначення напрямку до різних джерел звуку, та оскільки немає можливості знати куди був спрямований постріл, а, отже, й оцінити хоча б азимут для осі конуса балістичної хвилі, то для дослідження було обрано дульну хвилю.

Важливим моментом є те, що дульна хвиля попри сферичну форму має неоднорідний розподіл енергії на різних напрямках на значній відстані від джерела звуку. Так, за даними з [20] усереднена різниця сили звуку в напрямку пострілу та в протилежному напрямку сягає 15 *dB*. Крім того, наявність дульного гальма та його конструкція значною мірою впливають на розподіл звукової енергії в різних напрямках. Це спричиняє необхідність застосувань кількох різних і водночас бажано незалежних, ознак чи критеріїв для того, щоб визначити відстань до джерела звуку.

Є дві ознаки для визначення відстані до джерела звуку:

- на основі амплітудної характеристики,
- на основі частотної характеристики.

Визначення відстані на основі амплітудної характеристики спирається насамперед на ефект сферичного розсіювання звуку. Для оцінювання використовується формула:

$$E(r) = \frac{E_0 d_0^a}{d_1^a}, \quad (1)$$

де d_1 — відстань до джерела звуку; a — ступінь (параметр, що буде визначено); E_0 — початкове значення оцінки енергії, на відстані d_0 .

Крім того, необхідно враховувати також повздовжнє згасання звуку, яке загалом визначається такою формулою [21]:

$$p_t = p_i e^{-0,115 \alpha d}, \quad (2)$$

де p_t — звуковий тиск; p_i — початковий звуковий тиск; d — довжина траєкторії поширення звуку, в метрах; α — коефіцієнт загасання звуку чистого тону внаслідок звукопоглинання атмосферою; константа $0,1151 = 1/(10 \lg(e2))$.

Так само наведено формулу, що дає змогу виразити коефіцієнт α залежно від частоти f :

$$\alpha = K f^2, \quad (3)$$

де K — коефіцієнт, що залежить від тиску та температури середовища; f — частота звуку.

Для визначення відстані на основі частотної характеристики можна вимірювати співвідношення амплітуд частот на різних кінцях частотного діапазону для досліджуваного фрагмента аудіозапису, що містить постріл чи вибух. Підставивши (3) в (2) та взявши відношення між різними значеннями, отримаємо, що для оцінювання потрібна залежність виду:

$$E(r) = e^{\alpha - rb}, \quad (4)$$

де a — компенсаційна складова (параметр, що буде визначено); r — відстань до джерела звуку; b — значення, яке залежить від коефіцієнта K з формули (3) (очікується, що k не змінюється протягом спостережень), та від обраних для дослідження верхньої та нижньої границі частотного діапазону, відомих завчасно.

Задачі системи

Як видно з наведених формул (1)–(4), система, орієнтована на практичне використання, повинна мати модуль розпізнавання типу джерела звуку, оскільки ключові параметри моделей, серед них і початкова потужність звуку, залежать від природи джерела звуку та стану довкілля.

Потужність спостережуваного звуку є сильно варіативною величиною залежною від: типу джерела звуку (початкової енергії), відстані, орієнтації джерела звуку, рельєфу, тощо.

Розподіл частотних складових є сильно варіативною величиною залежною від: типу джерела звуку (розподілу енергій за частотами), відстані, рельєфу, тощо.

Враховуючи, що накопичення даних та навчання системи розпізнавання на всі можливі варіанти параметрів є нетривіальною задачею пропонується:

- використовувати систему розпізнавання на основі нейронних мереж лише для визначення типу джерела звуку,

- вважати, що вплив рельєфу значною мірою компенсується тим, що мікрофони буде розташовано на літальному апараті,

- вплив інших змінних факторів, а саме тиску, температури тощо вважати однаковим на всій зоні спостереження.

В такому випадку, основна задача перетворюється на сукупність незалежних задач визначення відстані до джерела звуку для одного фіксованого типу сигналів.

Математична модель

Позначмо як N — кількість вхідних сигналів, які одночасно записуються чотирма мікрофонами (каналами). Задача полягає в оцінці відстані до джерела імпульсного звукового сигналу за кожним з каналів, а також за усередненим сигналом за всіма каналами. Відносну похибку i -го спостереження за j -тим каналом позначмо r_{ij} . Середньоквадратичне відхилення відносної

похибки за j -тим каналом позначмо s_j . Цей показник i є основним в оцінюванні якості моделі.

Як модель залежності дистанції до сигналу від потужності за амплітудною характеристикою обрано функцію:

$$d(a, v, w, s) = \frac{v}{a^w + z}, \quad (6)$$

де a — потужність сигналу, d — відстань до нього, v, w, z — параметри моделі.

У якості моделі залежності дистанції до сигналу від потужності за частотною характеристикою вибрано функцію

$$d(ff, g, p) = e^{g - p \cdot a}, \quad (7)$$

де a — частотна характеристика сигналу обчислена алгоритмом, d — відстань до нього, g, p — параметри моделі.

Алгоритм фільтрації сигналу

1) Вхідні дані: звуковий сигнал X довжини M відліків із частотою F_s ; нижня та верхня межа фільтрації Tr_b та Tr_a відповідно.

2) Перетворюємо сигнал до спектру частот за допомогою швидкого перетворення Фур'є.

3) Обчислюємо реальні частоти, що відповідають значенням X_n , за формулою:

$$f_n = \begin{cases} F_s \cdot \frac{n}{M}, & \text{якщо } 0 \leq n \leq \left\lfloor \frac{M-1}{2} \right\rfloor \\ F_s \cdot \frac{M-n}{M}, & \text{якщо } \left\lfloor \frac{M-1}{2} \right\rfloor \leq n \leq M-1. \end{cases}$$

4) Обчислюємо Y_n за формулою:

$$Y_n = \begin{cases} X_n, & \text{якщо } Tr_b \leq f_n \leq Tr_a \\ 0, & \text{якщо } f_n > Tr_a \vee f_n < Tr_b \end{cases}$$

5) Здійснюємо обернене перетворення Фур'є спектру Y_n , одержуємо відфільтрований сигнал.

Алгоритм фільтрації сигналу дозволяє знехтувати низькочастотними компонентами вхідного звукового сигналу, що в проведений

серії дослідів підвищило точність оцінки дистанції до нього.

Алгоритм знаходження дистанції до сигналу

Вхідні дані: набір багатоканальних сигналів X_i , $i = 1, 2, \dots, N$ з частотою F_s ; набір дистанцій d_i для сигналів.

1) Для всіх сигналів X_i з набору, для всіх каналів $j \in \{1, 2, 3, 4\}$ вхідного сигналу:

- знаходимо позицію максимального за модулем значення сигналу $pos_{\max} x$;

- обрізаємо сигнал

$$y_{ij} = x_{ij} \lceil pos_{\max} : pos_{\max} + 0,6 * F_s \rceil;$$

- фільтруємо сигнал з кожного каналу y_{ij} за допомогою попереднього алгоритму з межами фільтрації (див. параметри наведені далі).

2) Знаходимо відповідну характеристику сигналу a_{ij} .

3) Розділяємо всі сигнали на дві множини: тренувальну та тестову. Тренувальна містить N_{tr} багатоканальних сигналів, а тестова N_{ts} сигналів, причому $N_{tr} + N_{ts} = N$.

4) Для всіх каналів $j \in \{1, 2, 3, 4\}$ вхідного сигналу знаходимо параметри для кривої $d(\cdot)$, яка найкраще описує взаємозв'язок отриманих значень характеристик сигналів a_{ij} та дистанцій до них d_i для всіх $i = 1, 2, \dots, N_{tr}$.

5) Для кожного каналу обчислюємо значення середньоквадратичного відхилення s_j , вибираємо канал j з найменшим значенням s_j .

6) Для всіх сигналів із тестової вибірки за формулою (1) рахуємо значення $d(\cdot)$, які й будуть оцінками відстані до сигналу.

Звукові дані

Робота алгоритму тестувалася на багатоканальних записах мікро-вибухів на дистанціях від 20 до 100 м (по чотири вибухи на дистанціях від 20 до 80 метрів включно, три вибухи на дистанції 90 метрів і два вибухи на дистанції 100 метрів). Важливим аспектом є

те, що мікро-вибухи, на відміну від пострілів, мають значно вищу варіативність звучання, оскільки руйнація оболонки заряду значно відрізняється між різними вибухами, на відміну від пострілів, де однаковий заряд металеві вибухової речовини розганяє однакову кулю в однаковому стволі.

Сумарна кількість записів — 33.

Знаходження дистанції до сигналу за амплітудною характеристикою

Для цього алгоритму використовуються такі параметри:

- діапазон фільтрації від 10 КГц до 24 КГц;
- амплітудна характеристика сигналу

$$a_{ij} = \sqrt{\frac{(y_{ij} - \overline{y_{ij}})^2}{0,6 * Fs}}$$

де $\overline{y_{ij}}$ — середнє значення сигналу y_{ij} .

Як видно з попередньої таблиці, найкращі результати має канал № 3 із середнім відхиленням абсолютної похибки 4,5 метри. Для всіх каналів середнє значення відносних похибок є близьким до нуля, а це означає, що задана модель добре апроксимує вхідні дані.

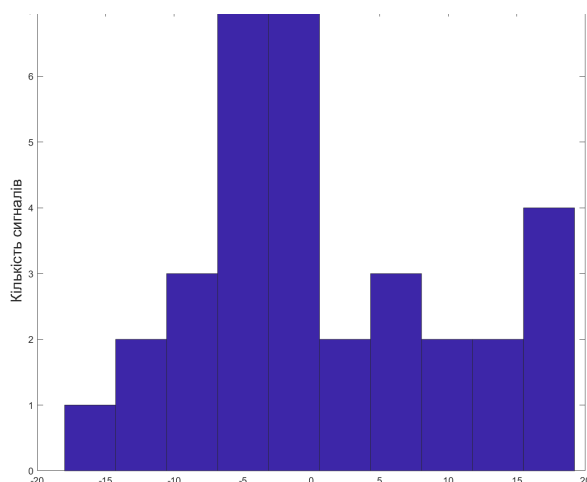


Рис. 1. Розподілення відносних похибок третього каналу

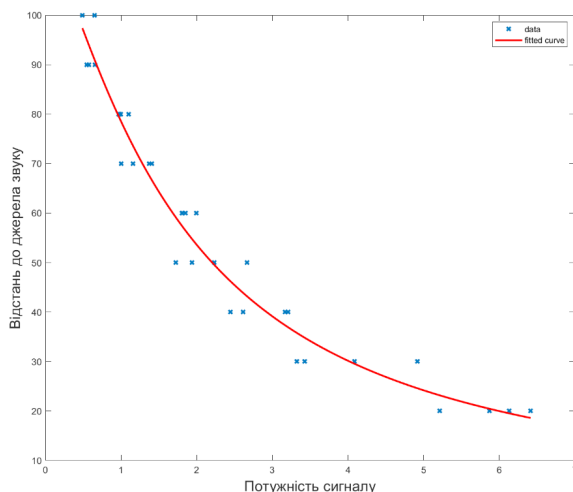


Рис. 2. Графік якості зіставлення експериментальних даних до аналітичної моделі

Таблиця 1. Значення коефіцієнтів показники якості моделі за кожним каналом

№ каналу j	Коефіцієнт			Стандартне відхилення похибок		
	V	w	z	відносних s_j	абсолютних	відносних $\overline{r_j}$
1	254830	1,466	2562,3	0,137	6,767	0,014
2	705320	1,616	7123,6	0,124	6,201	0,005
3	109850	1,274	927,9	0,095	4,482	0,007
4	308720	1,459	3380,5	0,18	10,061	0,03
Усереднений сигнал	—	—	—	0,119	6,010	0,014

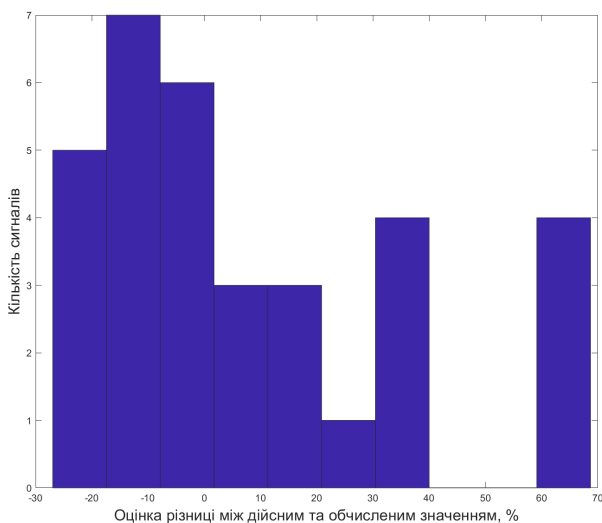


Рис. 3. Розподілення відносних похибок четвертого каналу

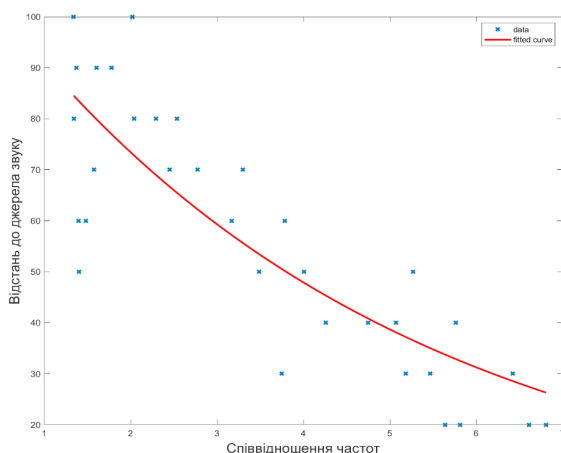


Рис. 4. Графік якості співставлення експериментальних даних до аналітичної моделі

Було проведено перевірку нормальності відносних похибок за допомогою тестів Андерсона-Дарлінга, Харке-Бера та Лілієфорса. Усі тести не змогли відхилити нуль-гіпотезу про нормальність відносних похибок. Тобто відносні похибки ймовірно мають нормальний розподіл.

Як бачимо з попереднього рисунку, абсолютна похибка оцінювання відстані не перевищує 20 відсотків.

Оцінка відстані до сигналу є близькою до реальних значень відстані.

Знаходження дистанції до сигналу за частотною характеристикою

Початкові дані:

- діапазон фільтрації від 12 КГц до 24 КГц;
- значення частот згладжуються за допомогою плаваючого вікна розміром 200 значень, щоб уникнути різкого обвалу на краях;
- з усього діапазону частот обираються по 1500 значень із відповідних кінців діапазону; слід зауважити, що кількість частот у цьому діапазоні (9500) не збігається з шириною діапазону (12000);
- частотна характеристика сигналу обчислюється як співвідношення сум частот на

кінцях діапазону:
$$ff_{ij} = \frac{\sum_{l=0}^{l=1500} f_l}{\sum_{l=8000}^{l=9500} f_l}$$

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів та показники якості моделі за кожним каналом (частотна характеристика)

№ каналу	Коефіцієнт		Стандартне відхилення похибок		Середнє значення відносних похибок \bar{r}_j
	g	p	відносних s_j	абсолютних	
1	5,047	0,406	0,5	17,731	0,233
2	4,937	0,351	0,54	16,928	0,139
3	4,949	0,364	0,587	16,383	0,124
4	4,937	0,402	0,276	13,805	0,07
Усереднений сигнал	—	—	0,399	12,8	0,114

де f_l — амплітуда частоти l з обраного проміжку.

Як видно з попередньої таблиці, найкращі результати має канал № 4, із середнім відхиленням абсолютної похибки 13,8 метрів. Для більшості каналів середнє значення відносних похибок є меншим від 3 відсотків, відповідно задана модель задовільно апроксимує вхідні дані.

Було проведено перевірку нормальності абсолютних похибок за допомогою тестів Андерсона-Дарлінга, Харке-Бера та Лілієфорса. Усі тести не змогли відхилити нуль-гіпотезу про нормальність абсолютних похибок. Тобто абсолютні похибки ймовірно мають нормальний розподіл.

Як бачимо з попереднього рисунку, похибка оцінювання відстані переважно розташована у діапазоні 20 відсотків від істинної відстані.

Як бачимо, оцінка відстані до сигналу є співмірною з реальними значеннями відстані.

ВИСНОВКИ

Розроблено та реалізовано алгоритм визначення відстані до джерела звуку на основі амплітудних та частотних характеристик. Частотна складова була розроблена через те, що для низки типів джерел звуку критично важливою є їхня просторова орієнтація, що впливає на потужність спостережуваного звукового сигналу і може ввести амплітудний алгоритм в оману та спричинити значні регулярні похибки (>30 %).

Алгоритм передбачає виконання цифрової низькочастотної фільтрації записаного сигналу. Внаслідок такої фільтрації, підхід дає змогу розраховувати відстані до джерела звуку з відносно невеликою похибкою. Алгоритм реалізовано в програмному середовищі *Matlab*.

Загалом даний метод надається для достатньо точного визначення відстані до джерел в умовах обмеженої видимості та шумів.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Sree Divya Chitte, Soura Dasgupta, Zhi Ding*. Distance Estimation From Received Signal Strength Under Log-Normal Shadowing: Bias and Variance. *IEEE Signal Processing Letters*. 2009. vol. 16, № 3. pp. 216–218.
2. *Paul Cochran, Janet Throop and W.E. Simpson*. Estimation of Distance of a Source of Sound. *The American Journal of Psychology*. vol. 81. № 2. pp. 198–206.
3. *Futoshi Asano, Hideki Asoh, Kazuhiro Nakadai*. Sound Source Localization Using Joint Bayesian Estimation With a Hierarchical Noise Model. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*. 2013. Vol. 21. Issue 9.
4. *Dong Hoon Kim, Yunmo Chung*. Accurate Position Detection of Sound Source by Lab View. *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics*. 2010.
5. *Jelmer Wind, Hans-Elias de Bree, Buye Xu*. 3D Sound Source Localization and Sound Mapping using a PU Sensor Array. *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. 2012.
6. *Bahaa Al-Sheikh, Ayah Elshebli, Anwar H Al Assaf, Sami Almashaqbeh, Wala a Alrawabdeh, Azhar Al-Tahat, Ahmad Baker Abubaker, Ja 'Far Batayneh, Fadi Jabra*. Sound Source Direction Estimation in Horizontal Plane Using Microphone Array. *IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies*. 2013.
7. *Ashutosh Saxena and Andrew Y. Ng*. Learning Sound Location from a Single Microphone. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2009.
8. *Jing Fan, Qian Luo, Ding Ma*. Estimation of Sound Source by Microphones Array. *Symposium on Security Detection and Information Processing*. 2010. vol. 7. pp. 312–317.
9. *Bhanu Priya R, Lavanya H, Lavanya Ganesh, Althuru Pranathi and Girish G.K*. Direction and Distance Finding using Microphone Array of a Sound Source. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2017. vol. 7. № 4.

10. *Weisen Jiang, Zebin Cai, Meifeng Luo, Zhu Liang Yu.* A simple microphone array for source direction and distance estimation. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2011.
11. *Jean-Marc Valin, Francois Michaud, Jean Rouat, Dominic Letourneau.* Robust Sound Source Localization Using a Microphone Array on a Mobile Robot. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2003. pp. 1228–1233.
12. *Despoina Pavlidi, Anthony Griffin, Matthieu Puigt, Athanasios Mouchtaris.* Real-Time Multiple Sound Source Localization and Counting Using a Circular Microphone Array. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. 2013. vol. 21. Issue 10. pp. 2193–2206.
13. *Ali Pourmohammad, Seyed Mohammad Ahadi.* Real Time High Accuracy 3-D PHAT-Based Sound Source Localization Using a Simple 4-Microphone Arrangement. IEEE Systems Journal. 2012. Vol. 6. Issue 3. pp. 455–468.
14. *Pourmohammad, A., Ahadi, S.M.* N-dimensional N-microphones sound source localization. J AUDIO SPEECH MUSIC PROC. 2013. 27.
15. *Xuan Zhong, Liang Sun, William Yost.* Active binaural localization of multiple sound sources. Robotics and Autonomous Systems. 2016. pp. 83–92.
16. *Maximo Cobos, Fabio Antonacci, Anastasios Alexandridis, Athanasios Mouchtaris, Bowon Lee.* A Survey of Sound Source Localization Methods in Wireless Acoustic Sensor Networks. Wireless Communications and Mobile Computing. 2017.
17. *Mariam Yiwere, Eun Joo Rhee.* Distance Estimation and Localization of Sound Sources in Reverberant Condition using Deep Neural Networks. International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Volume 12. № 22. pp. 12384–12389.
18. *Eleftheria Georganti, Tobias May, Steven van der Par, Aki Hämäläinen, John Mourjopoulos.* Single channel sound source distance estimation based on statistical and source specific features. 126th Audio Engineering Society Convention. 2009. 1.
19. *Xinwang Wan, Zhenyang Wu.* Sound source localization based on discrimination of cross-correlation functions. Applied Acoustics. 2013. vol. 74, Issue 1. pp. 28–37.
20. *Pater, Larry & Shea, John.* (1981). Techniques for Reducing Gun Blast Noise Levels: An Experimental Study. 61.
21. ISO D.I.N. 9613–1: 1993. acoustics. Attenuation of sound during propagation outdoors. part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. International Organization for Standardization, Geneva. 1993. 50 p.

Надійшла 29.07.2020

O.Ye. Volkov, Head of the Department, International Research and Training Center for Information Technologies and Systems NASU and MESU, Glushkov ave., 40, Kyiv, 03187, Ukraine, lexvolk@ukr.net,

V.Yu. Taranuha, Ph.D (Physics and Math.), Senior Research Associate, International Research and Training Center for Information Technologies and Systems NASU and MESU, Glushkov ave., 40, Kyiv, 03187, Ukraine, dep185@irtc.org.ua,

Ya.M. Linder, Ph.D.(Physics and Math.), Senior Research Associate, International Research and Training Center for Information Technologies and Systems NASU and MESU, Glushkov ave., 40, Kyiv, 03187, Ukraine, dep185@irtc.org.ua,

D.O. Volosheniuk, Research Associate, International Research and Training Center for Information Technologies and Systems NASU and MESU, Glushkov ave., 40, Kyiv, 03187, Ukraine, dep185@irtc.org.ua,

A.K. Sieriebriakov, Ph.D. candidate, Leading Engineer, International Research and Training Center for Information Technologies and Systems NASU and MESU, Glushkov ave., 40, Kyiv, 03187, Ukraine, sier.artem1002@outlook.com,

TECHNOLOGY OF ACOUSTIC MONITORING, DETECTION AND LOCALIZATION OF OBJECTS IN THE CONTROLLED AREA

Introduction. The problem of sound source localization is based on the solution of two subtasks: determination of the direction onto the sound source and estimation of the distance to it. In practice, the precise distance to the sound source is often unknown, which motivates its estimation with the help of other input parameters, such as the incoming sound intensity and its time of arrival.

Solution of such problem according to the mentioned criteria becomes dominant, when alternative methods of object localization are limited or too complex, for example, in the case of restricted visibility.

Tasks concerned with the audio signal recording and estimation are usually solved with the help of the group of sensors, or microphones, connected together, in a quantity from 1 to 6.

Such approach allows to apply algorithm of sound localization for monitoring movable or immovable objects with possible restricted visibility.

Purpose. This article suggests method of sound source distance estimation based on impulse signal recording and its further processing with the help of amplitude and frequency algorithms. Each algorithm allows to obtain accurate enough estimation of the distance, even in the case sound signal is distorted with the noise or echoes.

Methods. Distance determination was conducted experimentally with the help of incoming sound intensity estimation and estimation of its frequency changes over distance. The audio signal was recorded with the help of a group of 4 interconnected microphones.

Results. An algorithm for determining the distance to the sound source based on amplitude and frequency characteristics was developed. Algorithm is implemented in the Matlab software environment.

Conclusion. The algorithm of sound source distance estimation involves performing digital low-pass filtering of the recorded signal. Due to this filtering, this approach allows to calculate the distance to the sound source with a relatively small error.

The frequency component of the algorithm was developed because for certain types of sound sources their spatial orientation is critical, which affects the intensity of the observed sound signal, which in turn can mislead the amplitude algorithm and cause significant regular errors (> 30%).

In general, proposed method is suitable for fairly accurate determination of the distance to the sound sources in the conditions of restricted visibility and noises.

Keywords: *acoustic signal, sound source, sound localization, sound intensity, distance determination algorithm, restricted visibility, cross-correlation function, impulse signal, Fourier transform, multi-channel recording, performance index, relative error, normal distribution, low-pass filtering.*