

МЕТОД АКУСТИЧНОЇ ПЕЛЕНГАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

У статті описано спосіб побудови, структуру та роботу методу визначення напрямку на джерело звуку. Метод спирається на прости математичний апараті, що дозволяє реалізувати його на обладнанні мінімальної потужності, наприклад на мікропроцесорах Arduino. Розглянуто ключові елементи методу та умови використання, що впливають на результат. До них належать параметри звучання цілей, перш за все основні частоти та тривалість звучання необхідні для надійного визначення напрямку на джерело звуку. Крім того, в методі передбачено оцінювання параметрів середовища з метою визначення швидкості звуку в залежності від погодних умов, оскільки результати роботи методу сильно залежать від цього параметру. Вироблено рекомендації до БпЛА на який треба буде встановлювати обладнання, та описано спосіб використання для отримання найкращих результатів з визначення напрямків на джерела звуку. Продемонстровано доведення формули, що дозволяє визначати напрямок на джерело звуку з урахуванням того, що платформа де буде змонтовано програмно-апаратний комплекс має рухатися і виконувати визначення напрямку на джерело звуку під час руху або, в найгіршому випадку, коротких зависань на місці. Для цієї формули виконано оцінку помилки кута в градусах, в залежності від того, під яким кутом до напрямку руху і, відповідно, бази між мікрофонами, надходить звукова хвиля.

Виконано прототипування програмних засобів, для подальшої реалізації у вигляді повноцінного програмно-апаратного комплексу для установки на БпЛА. Також представлено графічний інтерфейс програмної реалізації методу. Проведено моделювання роботи системи за умов різних обставин. В ході експериментів визначено порогове значення для ключового критерію, що спирається на співвідношення сигнал/шум, оскільки в надто зашумленому середовищі метод працювати не буде. Проведені експерименти показують високу дієвість методу з урахуванням особливостей реальних джерел звуку.

Ключові слова: програмне забезпечення, безпілотний літальний апарат, визначення напрямку на джерело сигналу, обробка звуку.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Розробка систем спостереження, особливо на основі безпілотних літальних апаратів (БпЛА), останнім часом набула високої значимості. Особливо це стосується необхідності вести спостереження в областях, де немає можливості застосувати звичайні засоби спостереження, як то, наприклад, в зоні ведення бойових дій. При цьому, важливим є створення мультисенсорних систем з додаванням засобів звукової розвідки. Саме звукова розвідка потенційно може стати основним засобом фіксації використання та віднаходження розташування замаскованих озброєнь ворожих угруповань. Крім того, треба враховувати, що на відміну від візуальних зображень, які, зазвичай, не вдається знімати у всіх ракурсах та для розпізнавання яких необхідно передавати їх оператору, звук можна фіксувати з будь-якого напрямку та визначати напрямок на джерело в автоматичному режимі засобами, що розміщені безпосередньо на борту БпЛА. Значна відстань поширення звуку, особливо гарматних пострілів [1,2], також сприяє розробці засобів визначення напрямку на джерело звуку – акустичної пеленгації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми. Існує ряд робіт, які присвячені цій темі, але вони переважно концентруються на задачах розпізнавання шумів (перш за все пострілів) та визначення координат за умов значних обчислювальних ресурсів та спеціалізованих засобів, як то направлені мікрофони [3,4,5,6,7,8]. На відміну від них, дана робота зосереджується на задачі визначення напрямку на джерело звуку довільної природи за умови обмежених ресурсів та мінімальної ваги апаратних компонент.

Також, важливими елементами дослідження є те, що:

очікувані джерела звуку є, переважно, великими, складними за структурою (колона техніки, що пересувається, артилерійська батарея, тощо), та породжують звук протягом значного часу;

платформа з сенсорами є мобільною і може як переорієнтувати себе у просторі відносно джерела звуку, так і переміщуватись ближче до джерела звуку, а також мати різні параметри польоту, в першу чергу різну висоту, швидкість та кутове положення;

платформа може бути реалізована різним чином, як у вигляді квадрокоптеру, так і у вигляді БПЛА літакового типу;

відсутні фізичні ефекти типові для систем, що розробляться для приміщень, перш за все в наслідок відсутності стін, які спричиняють додаткові відбиття звуку [9];

можна вважати що фронт звукової хвилі має просту форму, і немає потреби враховувати складніші варіанти [10].

Виклад основного матеріалу дослідження.

Першим етапом методу визначення напрямку до джерела звуку є фільтрація отриманого сигналу для визначення робочого діапазону частот. Для цього сигнал перетворюється на спектр частот за допомогою швидкого перетворення Фур'є [11]. Для кожної частоти f_n маємо комплексну амплітуду синусоїдального сигналу, що разом складають вихідний сигнал. Оскільки амплітуди комплексні, то по ним можна обчислити одночасно і амплітуду, і фазу.

Після чого обчислюються реальні частоти, що відповідають значенням X_n за формулою:

$$f_n = \begin{cases} F_s \frac{n}{N}, 0 \leq n \leq \left[\frac{N-1}{2} \right]; \\ F_s \frac{N-n}{N}, \left[\frac{N-1}{2} \right] \leq n \leq N-1, \end{cases}$$

де N – кількість компонент розкладу;

F_s – частота сигналу, що одержується з мікрофонів;

Задається два порогових значення, Tr_a та Tr_b – частоти, що задають діапазон, за межами якого сигнал розглядатись не буде. Відповідно, значення X_n , які відповідають частотам $f_n \leq Tr_a$, та $f_n \geq Tr_b$ обнуляються. Відфільтрований сигнал отримується після здійснення оберненого перетворення Фур'є.

Другий етап методу – безпосереднє відшукування напрямку до джерела звуку. Для знаходження кута визначається максимальний допустимий зсув сигналів Δ за формулою:

$$\Delta = \left[\frac{F_s D}{V} \right],$$

де V – швидкість звуку, у метрах на секунду;

D – відстань між мікрофонами у метрах;

Після чого обчислюється функція крос-кореляції двох сигналів $XCORR_{lr}(k)$ для всіх $k \in [-\Delta, \Delta]$. Функція крос-кореляції вимірює подібність між першим часовим рядом і зсунутими версіями іншого часового ряду як функцію від зсуву. Використання саме цього критерію зумовлено бажанням створити систему, яку можна буде реалізувати з використанням мінімальних апаратних засобів та готових компонент, як то мікропроцесори Arduino.

Відхилення сигналів лівого та правого мікрофонів мають вигляд:

$$\sigma_l = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} (l_t - \bar{l})^2};$$

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} (r_t - \bar{r})^2}$$

Функція коваріації двох сигналів визначається за формулою:

$$COV_{lr}(k) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-k-1} (l_t - \bar{l}) (r_{t+k} - \bar{r}), k \geq 0, \\ \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-k-1} (r_t - \bar{r}) (l_{t+k} - \bar{l}), k < 0. \end{cases}$$

Тоді шукана крос-кореляція двох сигналів записується за допомогою формули:

$$XCORR_{lr}(k) = \frac{COV_{lr}(k)}{\sigma_l \sigma_r}, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, N$$

де N – кількість значень сигналу (довжина часового ряду), а також кількість компонент розкладу;

k – індекс частоти; частота, k -го сигналу дорівнює $\frac{k}{T}$, де T – період часу, протягом якого бралися вхідні дані;

l_t – значення сигналу лівого мікрофону під час відліку;

r_t – значення сигналу правого мікрофону під час відліку;

$\bar{l} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} l_i$ – середнє значення сигналу лівого мікрофону;

$\bar{r} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} r_i$ – середнє значення сигналу правого мікрофону.

Після обчислення функції крос-кореляції метод розраховує максимум функції крос-кореляції та зсув S , на якому цей максимум досягається. Якщо $XCORR_{lr}(S)$ менше порогового значення 0.2, робота алгоритму завершується (співвідношення сигнал/шум надто низьке для якісного визначення напрямку до звуку). Значення $S > 0$ означає, що сигнал від джерела звуку першим дійшов до мікрофона на лівому кінці бази, у той час як від'ємне значення сигналізує про те, що правий мікрофон отримав звук першим.

Остаточний кут до джерела звуку визначається за формулою:

$$\alpha(S) = -\arcsin\left(\frac{S}{\Delta}\right) \frac{180}{\pi}. \quad (1)$$

Кут обчислюється перпендикулярно до бази, і у випадку двох мікрофонів це відповідає повздовжній осі БПЛА. Нульовий кут означає, що джерело шуму прямо по курсу. Додатний кут у 90° означає, що джерело знаходиться у напрямку правого кінця бази, а кут -90° означає, що джерело знаходиться у напрямку лівого кінця бази.

У розрахунках швидкість звуку є одним з ключових параметрів алгоритму, і її точне значення є важливим для точного обчислення положення джерела звуку. Для обчислення швидкості звуку найчастіше використовується формула:

$$c = \sqrt{\frac{p}{\rho}} k \quad (2)$$

де p – тиск повітря у Паскалях;

ρ – густина повітря;

k – тут показник адиабати, що для повітря дорівнює 1.4.

Проте дана формула розрахунку не враховує вологість повітря та його температуру. У роботі [12] пропонується більш точний метод вимірювання швидкості звуку $c(t, p, x_{\omega}, x_c)$ з урахуванням вологості та температури:

$$\begin{aligned} c(t, p, x_{\omega}, x_c) = & 331.5024 + 0.603055t - 0.000528t^2 + \\ & + (51.471935 + 0.1495874t - 0.000782t^2)x_{\omega} + \\ & + (-1.82 \cdot 10^{-7} + 3.73 \cdot 10^{-8}t - 2.93 \cdot 10^{-10}t^2)p + \\ & + (-85.20931 - 0.228525t + 5.91 \cdot 10^{-5}t^2)x_c - \\ & - 2.835149x_{\omega}^2 - 2.15 \cdot 10^{-13}p^2 + 29.179762x_c^2 + 0.000486x_{\omega}px_c, \end{aligned}$$

де t – температура у градусах Цельсія;

p – тиск повітря;

x_{ω} – мольна частка водяної пари;

x_c – мольна частка CO_2 , яку приймають на рівні $x_c = 0.0004$.

Мольну ж частку водяної пари обчислюють за формулою:

$$x_{\omega} = hf \frac{p_{sv}}{p},$$

Де h – відносна вологість;

f – фактор підсилення;

p_{sv} – тиск насичених парів водяної пари в повітрі.

Останні дві величини обчислюються за формулами:

$$\begin{aligned} f &= 1.00062 + 3.14 \cdot 10^{-8}p + 5.6 \cdot 10^{-7}t^2, \\ p_{sv} &= \exp(1.28 \cdot 10^{-5}T^2 - 1.95 \cdot 10^{-2}T + 34.05 - 6.354 \cdot 10^3/T), \end{aligned}$$

де T – температура у градусах Кельвіна.

Такий розрахунок дає точне значення швидкості звуку у діапазоні $0^{\circ}C - 30^{\circ}C$. За замовчуванням припускається, що швидкість звуку складає 340 м/с, якщо немає можливості її уточнити. Також ця швидкість використовується у подальших оцінках, які можуть змінитися для іншої швидкості звуку.

Перед програмною реалізацією алгоритму необхідно також визначити його ключові параметри: вікно фільтрування сигналів Tr_a, Tr_b та відстань між мікрофонами (база B). У якості джерела звуку для налаштування алгоритму було використано шум квадрокоптеру. Після аналізу спектральних характеристик звуку виявлено, що домінуючі частоти є 1 кГц, 4.5 кГц та близько 8 кГц (рис. 1).

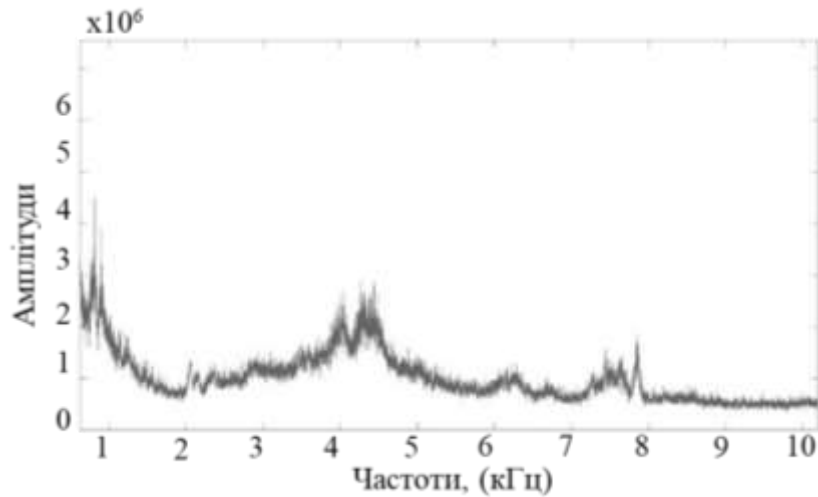


Рис. 1. Аналіз спектральних характеристик

Частоти шуму (у даному випадку вітру) знаходяться у діапазоні нижче 1 кГц. Хоча високі частоти понад 8 кГц мають значно менший вклад у результуючий сигнал (досить мала амплітуда), але шум там теж нижчий. Таким чином, було вирішено взяти вікно фільтрування сигналів $Tr_a = 0.9$ кГц, $Tr_b = +\infty$ кГц.

Довжина звукової хвилі складає:

$$\lambda(\omega) = \frac{c}{\omega},$$

де ω – частота хвилі у Герцах;
 c – швидкість звуку.

Таким чином, довжина хвилі на частоті 1кГц складає 0.34 м. для вибраної швидкості звуку. У випадку ідеального гармонічного сигналу алгоритм дозволяє знайти зсув сигналів з точністю до пів довжини хвилі. Отже, незважаючи на те, що збільшення відстані між мікрофонами збільшує точність визначення кута, збільшується також і ймовірність помилки. Тому у якості бази було обрано величину $B = 0.3$ м.

При такому значенні бази, швидкості звуку і частоті дискретизації сигналу 44100 Гц значення максимального зсуву $\Delta = 40$ відліків, і всього можливо $[-40, 40] = 81$ варіантів знаходження кута. Проте точність знаходження кута падає зі збільшенням відхилення джерела кута від перпендикуляра до бази. Так, якщо взяти різницю між значеннями за формулою (1), то $|\alpha(1) - \alpha(0)| = 1.43^\circ$, тоді як, $|\alpha(40) - \alpha(39)| = 12.65^\circ$.

Метод визначення напрямку на джерело звуку розрахований на політ невеликого та нешвидкого БпЛА на невеликій висоті, тобто для квадрокоптеру. У такому випадку кут до джерела звуку перш за все визначається азимутом і лише незначно – кутом нахилу у сферичній системі координат. Враховуючи, що джерело звуку даватиме сигнал протягом тривалого часу, та те, що БпЛА зможе виконувати виміри по мірі наближення до джерела звуку, то похибкою визначення напрямку на джерело звуку через неврахований кут нахилу можна знехтувати. Крім того, БпЛА має можливість скоригувати своє кутове положення в просторі після того, як буде зафіксовано початок звуку, а отже це дозволить знехтувати помилками, що зумовлені кутами нахилу БпЛА (тангажу і крену).

Використання трьох мікрофонів, розташованих у вершинах рівностороннього трикутника дозволяє утворити три бази та гарантувати, що звукова хвиля, яка набігає на БпЛА, завжди матиме принаймні одну базу, кут до якої складає 30° або менше. Найближчому значенню $\alpha(S)$ до кута 30° відповідає 20 відлік. Таким чином, у найгіршому випадку помилка при оцінюванні кута складе не більше, ніж $|\alpha(21) - \alpha(20)| = 1.67^\circ$, що значно менше за помилки, що породжуються іншими факторами, які виникають під час польоту БпЛА. Передбачається, що

після того, як оператор БпЛА вирішить, що джерело звуку треба дослідити, БпЛА буде зорієнтовано на джерело, що дозволить використовувати дані лише з двох мікрофонів для подальшого супроводження джерела.

Якщо БпЛА не може зависнути для точного визначення звуку (наприклад, БпЛА літакового типу), то це означає, що вибрана база вимірювання рухається відносно звукової хвилі, що набігає і, відповідно, помилка методу може складати значну величину. Проте, навіть така помилка дозволяє віднайти сектор, у якому знаходиться джерело звуку та зорієнтувати БпЛА так, щоб напрямком набігання звуку був якомога ближче до перпендикуляру до вибраної бази вимірювання.

При цьому формула (2) набуває такого вигляду:

$$c = \sqrt{\frac{P}{\rho} k + V_D}. \quad (3)$$

Для застосування методу на БпЛА літакового типу з притаманними такому типу БпЛА параметрами і характеристиками польоту, розроблений метод набув подальшого розвитку. Він передбачає, що є необхідність відстежувати джерело звуку без того, щоб зорієнтувати напрямком руху БпЛА на джерело звуку та за умови, що БпЛА не може або не повинен зависати на місці (рис.2).

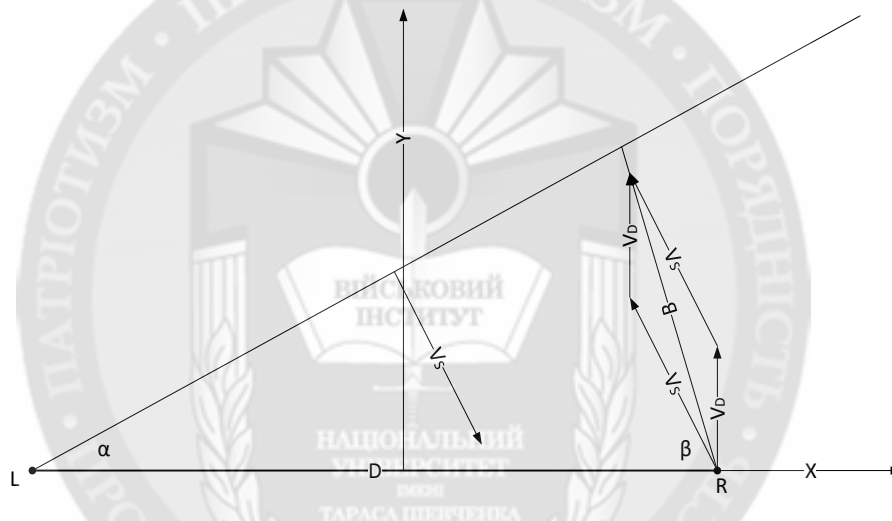


Рис. 2. Набігання звукової хвилі на БпЛА, що рухається

На рис. 2 прийнято такі позначення: L, R – лівий та правий мікрофони, які розташовані на крилі БпЛА; D – відстань між мікрофонами (база); β – кут між базою (D) та відрізком B , який у свою чергу паралельний вектору, що є сумою векторів V_S та V_D ; V_S – вектор, що задає напрямком руху звукової хвилі; α – кут набігання хвилі; V_D – швидкість БпЛА, що направлена вздовж повздовжньої осі Y БпЛА. Тоді:

$$V_S^x = V \sin \alpha,$$

$$V_S^y = V \cos \alpha,$$

де V – швидкість звуку (скаляр).

Розглянемо рух БпЛА відносно фронту хвилі. Тоді вектор наближення точки R до хвилі запишеться як:

$$V_{tot} = (V \sin \alpha, V \cos \alpha + V_D).$$

За теоремою синусів:

$$B = \frac{D \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}.$$

Час до зустрічі точки R з фронтом хвилі:

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{B}{\sqrt{(V \sin \alpha)^2 + (V \cos \alpha + V_D)^2}} = \frac{B}{\sqrt{V^2 + 2V \cos \alpha V_D + V_D^2}} = \\ &= \frac{D \sin \alpha}{(\sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta) \sqrt{V^2 + 2V \cos \alpha V_D + V_D^2}}. \end{aligned}$$

Кут β можна записати у вигляді:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{V \cos \alpha + V_D}{\sqrt{V^2 + 2V \cos \alpha V_D + V_D^2}}\right),$$

або:

$$\beta = \arccos\left(\frac{V \sin \alpha}{\sqrt{V^2 + 2V \cos \alpha V_D + V_D^2}}\right).$$

Тоді час до зустрічі точки R з фронтом хвилі приймає вигляд:

$$\Delta = \frac{D \sin \alpha}{(\sin \alpha (V \sin \alpha) + \cos \alpha (V \cos \alpha + V_D))} = \frac{D \sin \alpha}{V + V_D \cos \alpha}.$$

Виразимо кут α через Δ :

$$\begin{aligned} (V + V_D \cos \alpha) \Delta &= D \sin \alpha, \\ D \sin \alpha - \Delta V_D \cos \alpha &= \Delta V. \end{aligned}$$

Цю формулу можна переписати у вигляді:

$$\sqrt{D^2 + \Delta^2 V_D^2} \sin(\alpha - \phi),$$

де:

$$\phi = \arcsin\left(\frac{\Delta V_D}{\sqrt{D^2 + \Delta^2 V_D^2}}\right) = \arccos\left(\frac{D}{\sqrt{D^2 + \Delta^2 V_D^2}}\right) = \arctan 2(\Delta V_D, D),$$

де:

$$\arctan 2(y, x) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right), x > 0; \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi, x < 0, y \geq 0; \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi, x < 0, y < 0; \\ \frac{\pi}{2}, x = 0, y \geq 0; \\ -\frac{\pi}{2}, x = 0, y < 0. \end{cases}$$

Остаточно формула шуканого кута запишеться у вигляді:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\Delta V}{\sqrt{D^2 + \Delta^2 V_D^2}}\right) + \arctan 2(\Delta V_D, D).$$

Для точнішого визначення напрямку на джерело звуку є бажаним, але не обов'язковим, перехід БпЛА в режим планування на короткий час (0,5-2 с), що даватиме невисоку швидкістю руху БпЛА відносно джерела звуку, і це дозволить зменшити помилку, що зумовлена рухом відносно джерела звуку.

На базі запропонованого методу було створено програмне забезпечення, що реалізує динамічний пошук джерела звуку за даними двох мікрофонів. Вигляд інтерфейсу показано на рис. 3.

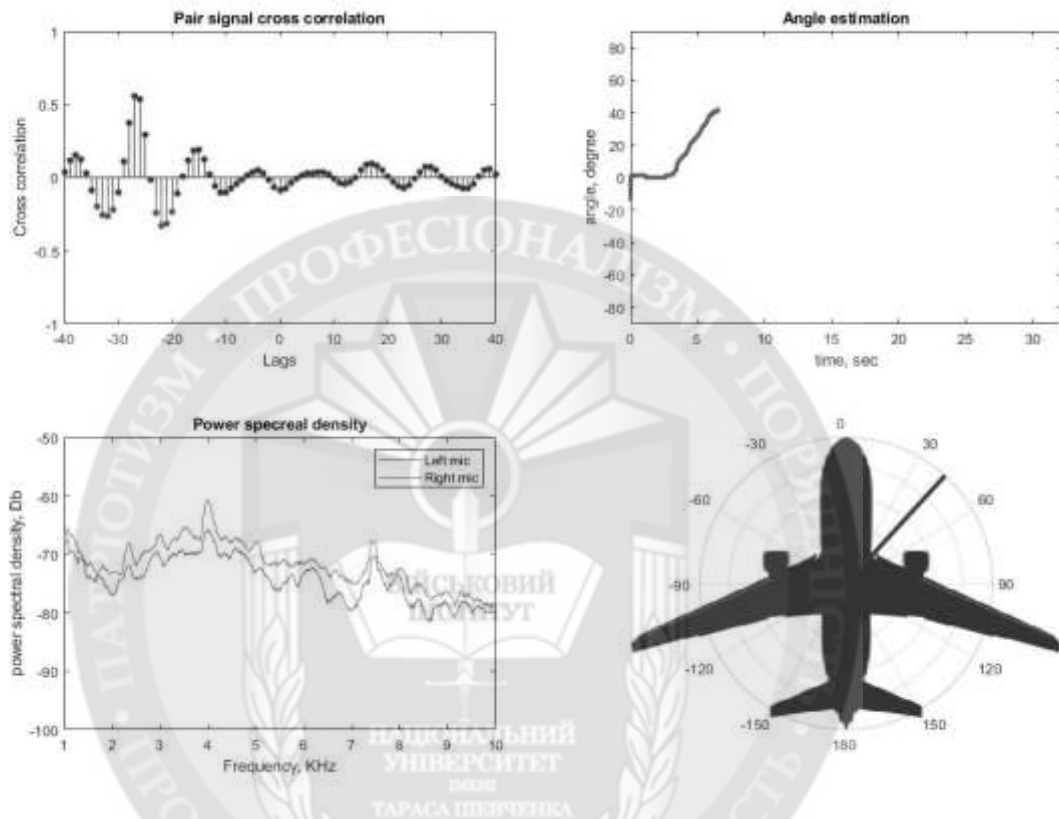


Рис. 3. Графічний інтерфейс розробленого методу

У лівому верхньому вікні (рис. 3) виводиться обчислена крос-кореляція пари сигналів. На рис. 3, максимум досягається при зсуві сигналу з правого мікрофона на -25 відліків. Таким чином, звук на правий мікрофон приходить раніше.

У лівому нижньому вікні виводиться обчислена спектральна густина сигналів. На ілюстрації обидва сигнали мають виражений пік на частоті 4 кГц.

У правому верхньому вікні проводиться візуалізація обчисленого кута у декартовій системі координат зі збереженням попередніх значень кутів.

У правому нижньому вікні відбувається анімація зміни кута у полярній системі координат.

Під час динамічного визначення кута використовувалось плаваюче вікно довжиною 0.5 с (22050 відліків), яке зсувалось на 1000 відліків кожен наступну ітерацію.

Висновки

В роботі було запропоновано та отримано метод, що дозволяє з достатньою надійністю визначати напрямок до джерела складного звуку. На відміну від імпульсного звуку (вибухи, постріли), саме такий звук важче локалізувати, з огляду на відсутність чітко вираженого звукового фронту, який сприймається мікрофонами. Також, значна кількість частот джерела звуку робить використання більш простих методів, як то фазового, неефективними.

Варіант тестової системи з трьома мікрофонами дозволяє визначити напрямок на джерело звуку з точністю до 1.67°.

У подальшому планується підвищити точність локалізації джерела звуку шляхом збільшення кількості мікрофонів та покращення якості записуючого обладнання. Крім того, подальша робота буде спрямована на покращення методу таким чином, щоб за його допомогою можна було визначати напрямки на декілька менших джерел, що звучать одночасно, оскільки зараз метод не передбачає виділення окремих малих джерел у межах одного великого джерела звуку.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Луценко В.И., Луценко И.В, Соболяк А.В. Дальность действия систем акустической разведки. *Прикладная радиоэлектроника*. 2015. Т. 14, № 2. С.125-136.
2. Tactical Infrasound /Ch. Stubbs et al. JASON The MITRE Corporation. 2005. 72p.
3. Izabela L. Freire and Jose A. Apolinario Jr. Gunshot detection in noisy environments in *Proceeding of the 7th International Telecommunications Symposium*. Manaus, Brazil. 2010 pp. 1-4 .
4. Talal U. Momin and Abubakr M. Improving efficiency and reliability of gunshot detection systems. in *Proc. of 38th International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. 26-31 May 2013. Vancouver, Canada. pp. 513-517
5. Nandwana, M.K., Ziaei A., Hansen J.H.L. Robust Unsupervised Detection of Human Screams in Noisy Acoustic Environments. in *Proc. of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. April 19-24 2015 South Brisbane, Queensland, Australia. pp.161–165.
6. Almaadeed N. Et al. Automatic Detection and Classification of Audio Events for Road Surveillance Applications. *Sensors* 2018.Vol 18(6). [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/6/1858/pdf> (дата звернення: 2.08.2019).
7. Izabela L. Freire and Jose A. Apolinario Jr. GCC-based DoA Estimation of Overlapping Muzzleblast and Shockwave Components of Gunshot Signals in *Proc. of Second IEEE Latin American Symposium on Circuits and Systems*, 23-25 Feb. 2011 Bogotá, Colombia, 2011. pp. 1-4.
8. Valenzise G., Gerosa, L., Tagliasacchi M., Antonacci F. and Sarti A. Scream and gunshot detection and localization for audio-surveillance systems. in *Proc. of IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, 2007, pp. 21–26
9. Абракітов В.Е. Багаторазові відбиття звуку в акустичних розрахунках: [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/6053/1/%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F2.pdf> (дата звернення: 2.08.2019).
10. Селіванов С. Є., Абракітов В. Е., Нікітченко О. Ю., Чупріна Я. І. Визначення інтенсивності випромінювання на відстані від джерела залежно від форми хвильового фронту. *Коммунальное хозяйство городов*, 2007 №79, С. 356-363.
11. Р. Лайонс, Цифровая обработка сигналов: монография. Москва.: Бином, 2006. 656 с.
12. Cramer, O. The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity and CO2 concentration. *J.Acoust.Soc.Am* 1993 №93. pp. 2510-2516.

REFERENCES:

1. Lutsenko, V.E., Lutsenko, E.V., Sobolyak, A.V. (2015) “Dalnost deystviya sitem akusticheskoy razvedky” [Acoustic reconnaissance systems range]. *Applied radioelectronics* Т. 14, № 2. pp.125-136.
2. Ch. Stubbs et al. (2005) *Tactical Infrasound* JASON, The MITRE Corporation. 72p.
3. Izabela L. Freire and Jose A. Apolinario Jr. (2010) “Gunshot detection in noisy environments” in *Proc. of the 7th International Telecommunications Symposium*. Manaus, Brazil. 2010 pp. 1-4 .
4. Talal, U. Momin and M. Abubakr (2013) “Improving efficiency and reliability of gunshot detection systems” in *Proc. of 38th International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. 26-31 May 2013. Vancouver, Canada. pp. 513-517

5. Nandwana, M. K., Ziaei, A., Hansen, J. H. L. (2015) "Robust Unsupervised Detection of Human Screams in Noisy Acoustic Environments." In *Proc. of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. April 19-24 2015 South Brisbane, Queensland, Australia. pp.161–165.
6. Almaadeed N. Et al. (2018) "Automatic Detection and Classification of Audio Events for Road Surveillance Applications". *Sensors*. Vol 18(6) . www.mdpi.com/1424-8220/18/6/1858/pdf (accessed 2 August 2019)
7. Izabela L. Freire and Jose A. Apolinario Jr. (2011) "GCC-based DoA Estimation of Overlapping Muzzleblast and Shockwave Components of Gunshot Signals" in *Proc. of Second IEEE Latin American Symposium on Circuits and Systems*, 23-25 Feb. 2011 Bogotá, Colombia, 2011. pp. 1-4.
8. Valenzise, G., Gerosa, L., Tagliasacchi, M., Antonacci, F. and Sarti., A (2007). "Scream and gunshot detection and localization for audio-surveillance systems." In *Proc. of IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, pp. 21–26
9. Abrakitov, V.Ye. (2007) *Bagatorazovi vidbuttya zvuku v akustichnuh rozrahunkah* [Multiple sound reflections in acoustic calculations]: eprints.kname.edu.ua/6053/1/%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F2.pdf (accessed 2 August 2019)
10. Selivanov, S.Ye., Abrakitov, V.Ye., Nikitchenko, O.Yu., Chuprina, Ya.E. (2007) "Vusnachennya intensyvnyosti vyprominyuvannya na vidstani vid dzhherela zalezho vid formy hvulyovogo frontu". [Evaluation of intensity of emission at distance from source in dependence on wave front form] *City utilities*, №79, pp. 356-363.
11. Layons, R. (2006) *Cifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. Binom Moscow, 656 p.
12. Cramer, O. (1993) "The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity and CO2 concentration", *J.Acoust.Soc.Am* №93. pp. 2510-2516.

**д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. НАНУ Анисимов А.В., с.н.с. Волков А.Е.,
к.ф.-м.н. Линдер Я.Н., к.ф.-м.н. Тарануха В.Ю., Волошенюк. Д.А.**

МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ ПЕЛЕНГАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В статье описывается способ создания, структура и работа метода определения направления на источник звука. Метод опирается на простой математический аппарат, что позволяет реализовать его на оборудовании минимальной мощности, например на микропроцессорах Arduino. Рассмотрены ключевые элементы метода и условия использования, влияющие на результат. К ним относятся параметры звучания целей, прежде всего основные частоты и продолжительность звучания, необходимые для надежного определения направления на источник звука. Кроме того, в методе предусмотрено оценивание параметров среды с целью определения скорости звука в зависимости от погодных условий, поскольку результаты работы метода сильно зависят от этого параметра. Выработаны рекомендации к БПЛА на который надо будет устанавливать оборудование, и описывается использование для получения лучших результатов по определению направлений на источники звука. Продемонстрировано доказательства формулы, позволяющей определять направление на источник звука с учетом того, что платформа, где будет смонтировано программно-аппаратный комплекс должна двигаться и выполнять определения направления на источник звука во время движения или, в худшем случае, коротких зависаний на месте. Для этой формулы выполнена оценка ошибки угла в градусах, в зависимости от того, под каким углом к направлению движения и, соответственно, базе между микрофонами, приходит звуковая волна.

Выполнено прототипирование программных средств, для дальнейшей реализации в виде полноценного программно-аппаратного комплекса для установки на БПЛА. Также представлены графический интерфейс программной реализации метода. Проведено моделирование работы системы при различных обстоятельствах. В ходе экспериментов определено пороговое значение для

ключевого критерия, которое опирается на соотношение сигнал/шум, поскольку в слишком зашумленной среде метод работать не будет. Проведенные эксперименты показывают высокую действенность метода с учетом особенностей реальных источников звука.

Ключевые слова: программное обеспечение, беспилотный летательный аппарат, определения направления на источник сигнала, обработка звука.

**Prof. Anisimov A.V., Volkov O.E., Ph.D. Linder Ya.M., Ph.D. Taranukha V. Yu.,
Volosheniuk D. O.**

THE METHOD OF ACOUSTIC DIRECTION FINDING OF DYNAMIC OBJECTS USING AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

The article describes the method of creation, structure and operation of the method for determining the direction to the sound source. The method relies on a simple mathematical apparatus, which allows it to be implemented on equipment of minimal power, for example, on Arduino microprocessors. The key elements of the method and conditions of use affecting the result are considered. These include the sound parameters of targets, primarily the main frequencies and duration of sound necessary to reliably determine the direction to the sound source. In addition, the method provides means for estimating environmental parameters in order to determine the speed of sound depending on weather conditions, since the results of the method are highly dependent on this parameter. Recommendations have been developed for UAVs on which it will be necessary to install equipment, and the use is described to obtain better results in determining directions to sound sources. Demonstrated proof of the formula that allows one to determine the direction to the sound source, given that the platform where the hardware-software complex will be mounted must move and carry out the determination of the direction to the sound source during movement or, in the worst case, short stops for hovering. For this formula the angle error in degrees is estimated depending on the angle at which the sound wave arrives relatively to direction of movement.

Software prototyping was performed for further implementation in the form of a full-fledged software and hardware complex for installation on UAVs. The graphical interface of the software implementation of the method is also presented. The simulation of the system under various circumstances was performed. During the experiments, a threshold value was determined for the key criterion, it is based on the signal-to-noise ratio since the method will not work in a too noisy environment. The experiments performed shown the high efficiency of the method taking into account the features of real sound sources.

Keywords: Software, Unmanned aerial vehicle, Definition of the Direction to the Source of the Signal, Sound Processing.