

## МОДЕЛЮВАННЯ АКУСТИЧНОГО ПЕЛЕНГАТОРА

Р. С. Безуглий<sup>1</sup>, С. О. Козерук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
НН Фізико-технічний інститут

### Анотація

У статті розглянуто акустичний метод пеленгування безпілотних літальних апаратів, запропоновано пристрій пеленгування у вигляді системи з 4 мікрофонів, розташованих у вершинах правильного тетраедра та алгоритм визначення просторових кутових координат. Азимутальний кут визначається за усередненою оцінкою параметра заємокореляційної функції між парами мікрофонів, розташованих у горизонтальній площині. Кут піднесення – за часом затримки між мікрофоном вершини й одним із мікрофонів основи піраміди. Проведено комп'ютерне моделювання визначення кутів для декількох просторових напрямків. Отримано підтвердження дієвості алгоритму.

*Ключові слова:* малий безпілотний літальний апарат, акустичний пеленгатор, взаємокореляційна функція, комп'ютерне моделювання.

### Вступ

Сьогодні за рахунок свого великого видового різноманіття, простоти використання та цінової доступності зросла популярність малих безпілотних апаратів (БПЛА) або «дронів». Вони широко застосовуються як у індустріальних галузях, так і приватно завдяки своїм функціональним можливостям. Зростають й ризики, пов'язані з використанням цих апаратів у нелегальних видах діяльності: шпіонаж та отримання компромату, проникнення на закриті території, закидання вибухових пристроїв у приміщення, контрабанда тощо. Варто відзначити застосування подібного класу пристроїв і військовими для проведення розвідувальних та диверсійних операцій, а також терористами для порушення роботи критичних об'єктів та проведення терактів. Виникає й потреба в засобах виявлення, моніторингу та протидії дронам.

Результати оглядових робіт, спрямованих на порівняння можливостей та розгляд тенденцій розвитку систем виявлення й локалізації різної дії, демонструють малу ефективність класичних методів виявлення і підтверджують актуальність розробки акустичних детекторів [1]: габарити малих БПЛА досить незначні, що ускладнює оптичне розрізнення; рівень інфрачервоного випромінювання та радіолокаційних сигнатур невисокий за рахунок низького споживання та застосування радіопрозорих матеріалів; власне радіовипромінювання може бути як специфічним для кожної моделі, так і зовсім відсутнім. До істотних переваг акустичного методу також можна віднести низьку вартість застосовуваних мікрофонів, незначну залежність від погодних умов, часу доби та рельєфу, високу достовірність виявлення та широкі кути огляду [2].

### 1. Формування концепції

Пропонується обрати конструкцію у вигляді правильного тетраедра з мікрофонами у вершинах для досягнення максимального кута розкриття спостереження при мінімізації кількості мікрофонів, необхідної для роботи пристрою. Основою тетраедра є рівносторонній трикутник із стороною  $d$  з мікрофонами  $M_0$ ,  $M_1$ ,  $M_2$  у вершинах кутів. Прийнято, що азимутальні кутові координати мікрофонів основи відносно фазового центру:  $M_0 = 0^\circ$ ,  $M_1 = 120^\circ$ ,  $M_2 = 240^\circ$ . Відстань від верхнього мікрофона  $M_3$  до основи складає  $h$ . Схематичне зображення взаємного розташування мікрофонів наведено на рис. 1.

Оскільки пеленгатор призначається для виявлення шумового сигналу в смузі частот від 100 до 2000 Гц, визначимо інтервал кореляції  $\tau_k$  за формулою (??), де  $\Delta f = 1900$  Гц – ефективна смуга частот шумового сигналу.

$$\tau_k = \frac{1}{2\Delta f} \quad (1)$$

Тоді акустичну базу  $d$ , відстань між сусідніми мікрофонами системи для коректної її роботи, визначимо за співвідношенням (??), де  $c = 343$  м/с – прийнята швидкість звукової хвилі в повітрі,  $\tau_k = 263 \cdot 10^{-6}$  с – розрахований інтервал кореляції. Отримано  $d \geq 0,451$  м, прийнято  $d = 0,46$  м.

$$d \geq 5 \cdot c \cdot \tau_k \quad (2)$$

У роботі [3] описано варіант розрахунку часових затримок  $\tau_i$  відносно геометричного центра для масиву мікрофонів у вигляді рівностороннього трикутника, вписаного в коло радіуса  $r$ , відносно центра такого кола як функції від кута напрямку  $\theta$ . Вигляд набуває вигляду (??), де  $r = d/\sqrt{3} \approx 0,266$  м,

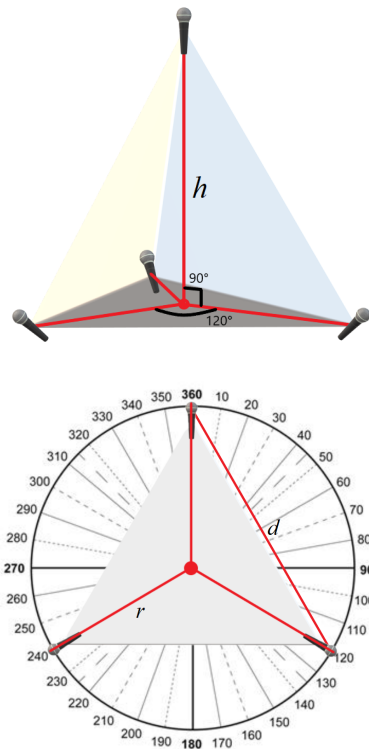


Рис. 1. Схема взаємного розташування мікрофонів детектору

$\theta$  – кут напрямку на джерело сигналу,  $\beta_i$  – кутові координати мікрофонів.

$$\tau_i = \frac{-r \cos(\theta - \beta_i)}{c}, i = 0, 1, 2 \quad (3)$$

Час затримки сигналу між парою мікрофонів основи відносно центра описаного кола  $\tau_{ij}$  можна виразити через залежність (??).

$$\tau_{ij} = \frac{-2r}{c} \sin \frac{\beta_j - \beta_i}{2} \sin \frac{2\theta - (\beta_j + \beta_i)}{2} \quad (4)$$

Щоб знайти значення часових затримок  $\tau_{ij}$  для отриманого сигналу, розраховують взаємкореляційну функцію (ВКФ) для сигналів пар мікрофонів  $M_0 - M_1, M_1 - M_2, M_0 - M_2$  на деякому проміжку часу  $T$  (??), де  $x(t)$  – корисний сигнал,  $n(t), m(t)$  – акустичні завади,  $R_{xx}(\tau - \tau_{ij})$  – кореляційна функція вхідного сигналу,  $R_{xm}(\tau), R_{nx}(\tau - \tau_{ij}), R_{nm}(\tau)$  – кореляційні функції завадових процесів, величина яких зі збільшенням часу спостереження наближаються до нуля за умови статистичної незалежності цих процесів.

$$\begin{aligned} R_{ij}(\tau) &= \\ &= \int_0^T (x(t) + n(t))(x(t - \tau_{ij} + \tau) + m(t + \tau)) dt = \\ &= R_{xx}(\tau - \tau_{ij}) + R_{xm}(\tau) + R_{nx}(\tau - \tau_{ij}) + R_{nm}(\tau) \end{aligned} \quad (5)$$

## 2. Моделювання пеленгатора

Пропонується наступний алгоритм роботи пеленгатора: розрахунок таблиць відповідності часових затримок між мікрофонами до кута напрямку на джерело звуку; обрахунок ВКФ мікрофонів основи у парах  $M_0 - M_1, M_1 - M_2, M_0 - M_2$ , визначення взаємної затримки між їхніми сигналами; співставлення отриманим значенням часових затримок можливих кутів напрямку; усунення неоднозначності через визначення набору кутів найменшої розбіжності; усереднення значень кутів отриманого набору для визначення азимутального кута напрямку на ціль; обрахунок ВКФ мікрофона вершини з мікрофоном основи відповідального сектора, визначення часової затримки; зіставлення часової затримки куту піднесення.

У якості середовища моделювання було обрано програмне забезпечення MathLAB Simulink. Цей пакет візуального моделювання дозволяє створювати моделі інформаційних систем для дослідження зв'язків між їхніми функціональними блоками та процесів, які в них відбуваються. У редакторі моделей Simulink створюється графічна модель системи, яка описує математичні співвідношення між входами, виходами та станами системи в часі. Оскільки обробка сигналу відбуватиметься переважно програмно, завдання імітаційного моделювання в першу чергу полягає в зображенні процесу формування акустичного сигналу на мікрофонах пристрою, рознесених у просторі.

Імітаційна модель (рис. 2) побудована з 4 окремих каналів із послідовним використанням наступних блоків: «Шумовий сигнал», «Затримка», «Завада», «СФ», «Мікрофон». Блоки «Шумовий сигнал» і «Завада» генерують шумовий процес із використанням вбудованої функції MathLAB  $normrnd(\mu, \sigma)$ , що повертає випадкове значення з нормального розподілу із заданим математичним сподіванням  $\mu = 0$  та відхиленням  $\sigma = 1$ . Вихідні значення блоку «Шумовий сигнал» по кожному каналу надходять із встановленими значеннями «Затримки», що відповідають імітованому напрямку приходу звукової хвилі. «Завада» кожного каналу імітує статистично незалежні завадові сигнали, що також надходять на мікрофони. Сума затриманого шумового сигналу і відповідного завадового надходить на блок «СФ» – смуговий фільтр із смугою частот 100-2000 Гц. Після попередньої фільтрації сигнал потрапляє на блок «Мікрофон», який формує масив миттєвих значень, імітуючи формування цифрового сигналу. Часовий крок моделі складає 25 мкс, що відповідає частоті дискретизації 40 кГц і є справедливим для сучасних звукових карт, наявних на ринку, час роботи – 0,25 с.

За формулою (??) для попередньо визначених параметрів системи розраховано таблицю відповідності часових затримок сигналу мікрофонів відносно фазового центра з кроком в  $1^\circ$ . У імітаційному блоці «Затримка» неможливо вказати значення часу менше одного кроку симуляції (25 мкс), тому забезпечення

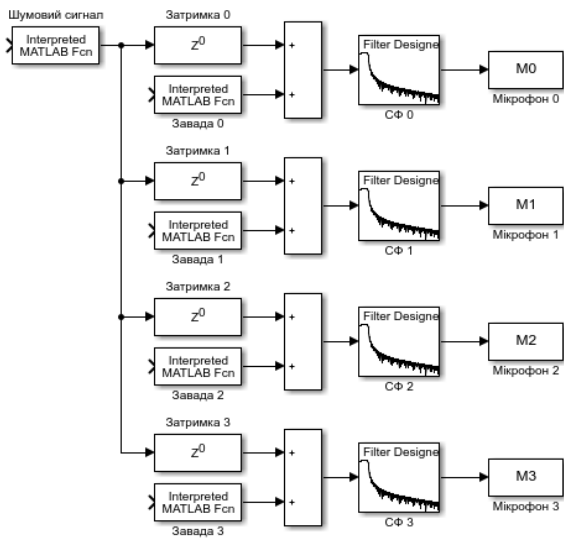


Рис. 2. Імітаційна модель формування сигналів

таблицею більшої точності не має практичного сенсу. Графіки залежності, побудовані за отриманими значеннями, наведені на рис. 3.

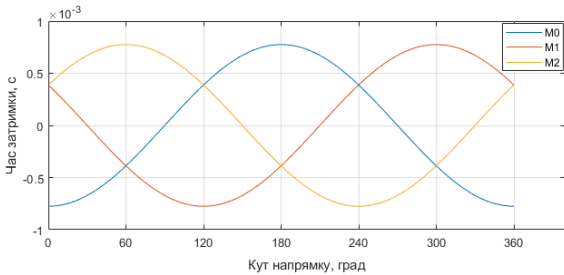


Рис. 3. Графік залежності часу затримки від кута напрямку

Залежність взаємної часової затримки між мікрофонами, об'єднаними у пари  $M_0 - M_1$ ,  $M_1 - M_2$ ,  $M_0 - M_2$ , від кута напрямку відносно фазового центра основи можна розрахувати просто як різницю часових затримок відповідних мікрофонів  $\tau_j - \tau_i$ . Отримані значення будуть аналогічні розрахованим за формулою (??), вони нанесені на графік, наведений на рис. 4.

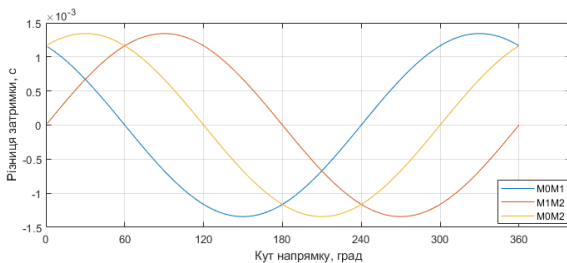


Рис. 4. Графік залежності взаємної часової затримки пар мікрофонів від кута напрямку

Для визначення кута піднесення достатньо мікрофона вершини тетраедра та одного мікрофона основи. Для збільшення точності локалізації під час розрахунку залежності затримки між обраними двома мікрофонами слід враховувати нахил утвореного лі-

нійного масиву. При висоті  $h = d\sqrt{\frac{2}{3}} \approx 0,376$  м, нахил пари складає  $\arctan(\frac{h}{r}) \approx 55^\circ$ . Тоді скласти таблицю залежності взаємної часової затримки від кута піднесення можна за виразом (??) для випадку  $M_3 = 0 - 55^\circ$ ,  $M = 180 - 55^\circ$ . Графік за значеннями таблиці побудовано на рис. 5.

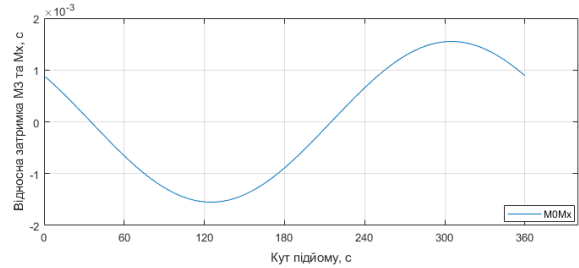


Рис. 5. Графік залежності взаємної часової затримки від кута піднесення

Щоб мінімізувати варіативність цього параметра від азимутального кута, пропонується розділити простір спостереження на 6 зон (рис. 6): 1, 3, 5 – мікрофони  $M_0, M_1$  та  $M_2$  відповідно з негативним нахилом, а 2, 4, 6 – з позитивним.

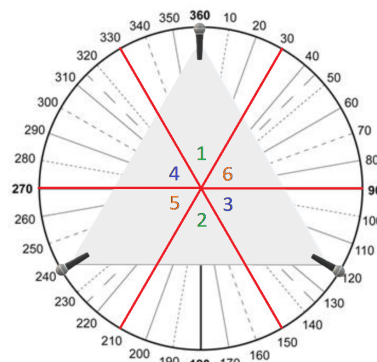


Рис. 6. Розподіл на зони

Для пар мікрофонів основи розраховуються ВКФ. Локалізується абсолютний максимум отриманої функції, за його часовою координатою визначається поточна взаємна часова затримка (приклад для  $240^\circ$  – рис. 7).

З наявних у таблицях взаємних затримок мікрофонів підбираються найближчі значення до розрахованих за ВКФ. Кожному значенню часової затримки відповідає два можливих кути напрямку (приклад для  $240^\circ$  – рис. 8). Ця неоднозначність вирішується алгоритмом підбору комбінації кутів із найменшим розкидом. Для згенерованого набору-прикладу сигналів можливі значення кутів складають  $60^\circ, 240^\circ, 179^\circ, 241^\circ, 239^\circ, 301^\circ$ . Відібрана алгоритмом трійка кутів:  $240^\circ, 241^\circ, 239^\circ$ .

Значення трьох кутів отриманого набору усереднюються наступним чином: спочатку наближено розраховується кутова координата бісектриси двох найбільш рознесених значень, після чого процес по-

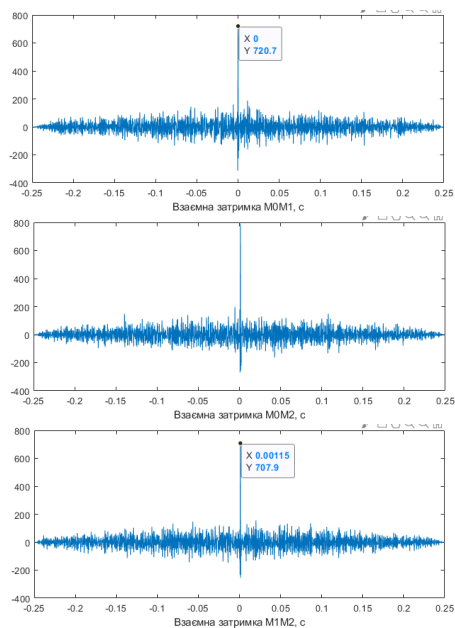


Рис. 7. ВКФ сигналів з пар  $M_0 - M_1$ ,  $M_1 - M_2$ ,  $M_0 - M_2$  для  $240^\circ$  ( $\tau_{01} = 0$  мкс,  $\tau_{12} = \tau_{02} = 1,25$  мс)

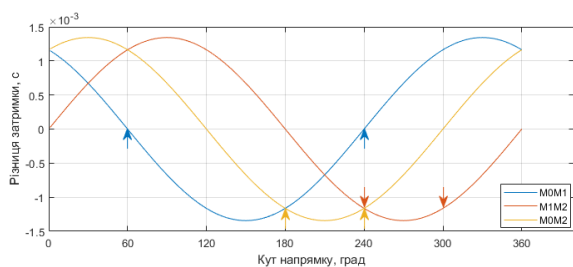


Рис. 8. Приклад неоднозначності в межах пар мікрофонів при істинному напрямку на  $240^\circ$

вторюється для отриманого кута і кута, що залишився. Отримане в результаті значення вважається азимутальним кутом напрямку на джерело звуку (рис. 9).

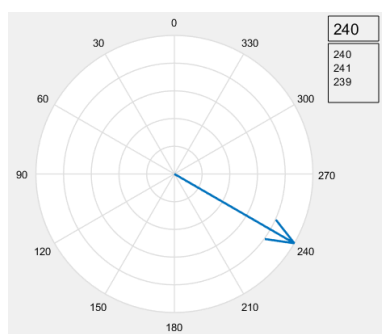


Рис. 9. Розрахований алгоритмом азимутальний кут

Прийнявши азимутальний кут напрямку, визначається відповідальний мікрофон основи для розрахунку кута піднесення. Розраховується ВКФ для обраного мікрофону з мікрофоном вершини (приклад для  $30^\circ$  – рис. 10). Оскільки заздалегідь відомо азимутальний кут напрямку на апарат, неоднозначності, притаманні локалізації двома мікрофонами, нівелюються: у залежності від номера сектора ро-

биться поправка на позитивний або негативний кут нахилу. За розрахованою ВКФ знаходиться взаємна часова затримка, значення якої порівнюється з таблицями. Кут піднесення визначається в межах від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , де вісь  $90^\circ$  прийнято за горизонт (рис. 11).

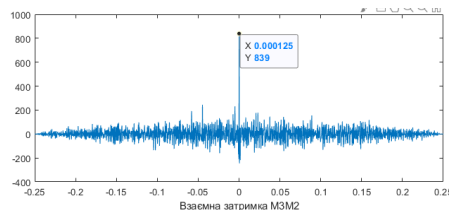


Рис. 10. ВКФ сигналів з пари  $M_3 - M_2$  для кута  $30^\circ$  ( $\tau_{32} = 125$  мкс)

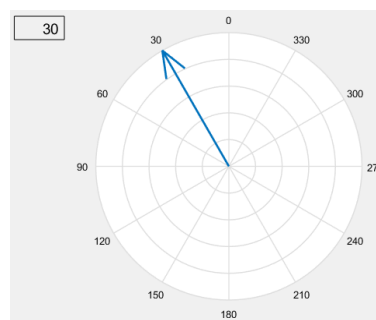


Рис. 11. Розрахований алгоритмом кут піднесення

## Висновки

Було розглянуто метод пеленгування БПЛА за акустичним випромінюванням, запропоновано простий пристрій пеленгування у вигляді системи з 4 мікрофонів, розташованих у вершинах правильного тетраедра, розроблено алгоритм визначення азимутального кута напрямку на ціль за усередненою оцінкою параметра ВКФ між парами мікрофонів основи тетраедра та кута піднесення за часом затримки між мікрофоном вершини й одним із мікрофонів основи тетраедра. Проведено комп'ютерне моделювання за допомогою програмного засобу MathLAB Simulink, що підтвердило дієвість концепції та алгоритму. Перспективними є розробка фізичної моделі та проведення випробувань у реальних умовах.

## Перелік використаних джерел

1. V.M. Kartashov. Methods for detection-recognition of radar, acoustic, optical and infrared signals of unmanned aerial vehicles // Radiotekhnika. — 2021. — P. 138–153.
2. Sokolskyi S.O., A.V. Movchanyuk. Overview of Detection and Localization Methods of Small Unmanned Aerial Vehicles // Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannya. — 2021. — P. 46–55.
3. Kozheruk S.O., O.V. Korzhyk. Correlation direction finder for small aircraft. // Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannya. — 2019. — P. 41–47.