

Акустичний модуль для пеленгування малих літальних апаратів

Козерук С. О., Коржук О. В., Воловик Д. І., Пуха Г. С.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

E-mail: skzrk@i.ua

Актуальність досліджуваної проблеми обумовлена використанням безпілотних малих літальних апаратів для мобільного обслуговування населення по доставці пошти, товарів, забезпечення спостереження і безпеки. Одночасно зростає і небезпека їх використання у акціях, які несуть загрозу як державним, так і приватним інтересам. Для спостереження за об'єктами застосовують пристрої різної фізичної дії, які мають як переваги, так і недоліки. Пасивні акустичні засоби спостереження забезпечують скритість спостереження, але мають невелику дальність виявлення. Збільшити відстань виявлення можна за рахунок удосконалення конструкцій прийомних мікрофонних модулів та розробки ефективних алгоритмів спостереження та локалізації. В роботі представлено акустичний модуль у вигляді тетраедру з мікрофонами розміщеними у його вершинах. Сканування простору по кутовим координатам запропоновано вести із застосуванням алгоритмів формування керованої характеристики потужності або керованої кореляційної характеристики. Для кожного способу приведені теоретичне обґрунтування алгоритмів сканування, результати розрахунку характеристик спрямованості та оцінки похибки визначення кутових координат. Порівняння двох способів встановило перевагу алгоритма керованої просторової кореляційної характеристики (КПКХ) спрямованості по завадостійкості та точності пеленгування. Були проведені лабораторні дослідження пеленгування джерела шуму макетом акустичного модуля. Не зважаючи на реверберацію приміщення вдалось перевірити теоретичні результати та підтвердити перевагу алгоритма кореляційного формування спрямованості. Результати роботи можуть бути використані для створення акустичних пеленгаторів та систем локалізації шумових об'єктів. Запропонований алгоритм КПКХ може бути використано в засобах моніторингу для оцінки акустичних характеристик приміщень, наприклад, для експериментального визначення розташування та оцінки поглинання звука огорожуючими конструкціями, локалізації порушень звукової ізоляції приміщення.

Ключові слова: малий літальний апарат; акустичний модуль; пеленгування; характеристика спрямованості

DOI: [10.20535/RADAR.2020.82.25-34](https://doi.org/10.20535/RADAR.2020.82.25-34)

Вступ

Бурхливий розвиток суспільства веде до використання безпілотних малих літальних апаратів (МЛА) для мобільного обслуговування населення по доставці пошти, товарів, забезпечення спостереження і безпеки. Очікується, що МЛА (UASs) будуть відігравати головну роль в майбутніх містах в секторі маломірних транспортних послуг. За деякими розрахунками [1] кількість МЛА тільки в США до кінця 2025 року буде становити більше 30000 одиниць. МЛА із фіксованим крилом використовувались аматорами та військовими вже багато років. Останнім часом більш популярними стали МЛА [2] з декількома електричними двигунами. Ці авіаційні системи, як правило, прості в управлінні та мають можливість вертикального зльоту та посадки, зависання та швидкого маневру у просторі.

Враховуючи низьку собівартість та економічну ефективність можна очікувати їх широке застосування громадянами і військовими. Крім позитивної ролі в розвитку суспільства, вони можуть бути використані зловмисниками для проведення фізичних та кібератак на інфраструктуру, приватну і державну власність.

Актуальними стають системи для спостереження за повітряною активністю МЛА. Серед відомих рішень [1] – пасивні датчики видимого світла, інфрачервоного випромінювання, радіочастотного моніторингу, активні радіолокаційні системи і пасивні акустичні системи спостереження. Пристрої використовують різні фізичні принципи дії тому мають як переваги, так і недоліки. Оптичні камери спостереження, доступні по ціні і прості в експлуатації, не функціонують в складних метеорологічних умовах і вночі. Використання пристроїв

інфрачервоного і радіочастотного спостереження обмежене низьким тепловим і електромагнітним випроміненням МЛА. Активні системи радіолокації можуть працювати без значного погіршення в негоду, вдень і вночі, забезпечувати виявлення на відстані до декількох кілометрів. Головні недоліки – відсутність скритності спостереження, велика тривалість часу сканування довкілля та необхідність великого масиву радіолокаційних знімків для класифікації авіаційних об'єктів. Акустичні пасивні системи спостереження, відносно недорогі і прості в експлуатації, мають суттєвий недолік – не можуть забезпечити велику дальність локалізації МЛА. Надійна відстань виявлення МЛА становить декілька сотень метрів та залежить від рівня випромінення МЛА, рівня акустичних завад в зоні прийому та метеорологічних умов. Для покриття великих площ спостереження акустичні системи збираються з багатьох мікрофонних модулів. Модулі системи мають бути недорогими з простими і надійними алгоритмами спостереження, виявлення і класифікації наземних і повітряних шумливих об'єктів. Простий акустичний модуль з використанням всенаправленого мікрофона запропоновано в роботі [3]. Алгоритм виявлення забезпечує попередню обробку прийнятих звуків для зменшення акустичної завади. Подальша обробка дає можливість встановлення інформаційних ознак і класифікації з використанням банку даних акустичних сигнатур. Попередня обробка зводиться до фільтрації вхідного звуку у смузі частот випромінювання МЛА (100-1500) Гц. В подальшому розраховується спектральна щільність потужності (СЩП) аудіо сигналу у відсутності та за наявності МЛА. Розрахований по СЩП рівень акустичної завади є пороговим для прийняття рішення про виявлення МЛА. Після очищення спектру аудіо сигналу від завади виконується операція зворотного перетворення Фур'є. Результат записується в банк даних для подальшого використання з метою класифікації шумового об'єкта. Проведені польові випробування показали надійне виявлення дронів на відстані до 40 м. Подальше удосконалення алгоритму обробки, а також створення системи на базі декількох модулів повинно, за думкою авторів, збільшити дальність та надійність виявлення МЛА. Для оцінки перспективності використання акустичних пасивних методів детектування був зроблений прогноз максимальної дальності виявлення з наперед заданими ймовірностями виявлення і хибної тривоги [4]. Отримані залежності максимальної дальності від параметру виявлення для різних значень різниці рівня шуму МЛА та рівня акустичних завад дають підставу стверджувати можливість виявлення на відстані до декількох сотень метрів. Дальність зростає за умови забезпечення приймачем надійного виявлення малих сигналів замаскованих завадою, тобто для параметрів виявлення менших за одиницю.

Застосування кореляційного приймача [5] дало можливість отримати параметр виявлення -12 дБ та детектувати квадрокоптер Phantom 4 Pro на відстані 90 м. Дальність виявлення збільшується з використанням лінійних масивів мікрофонів, які забезпечують формування і сканування вузького променя характеристики спрямованості (ХС). Такий підхід, представлений в роботі [6], дав хороші результати пеленгування МЛА на відстані до 1000 м. Дискретний лінійний масив з 24 мікрофонів та застосований алгоритм обробки дозволив синтезувати ХС з кутом розкриття 1° та забезпечити огляд простору в секторі кутів $+/- 45^\circ$. Результат виводився на дисплей у вигляді траєкторії руху об'єкта в координатах: кут приходу звуку – час. Недоліком пристрою є застосування лінійки мікрофонів, налаштованої на частоту 700 Гц, для просторової обробки широкосмугового акустичного випромінювання в діапазоні частот (450-3000) Гц. Цим пояснюється наявність інтерференційних смуг на зображенні траєкторії руху. В роботі [7] представлено результати виявлення одномоторного МЛА, з добре вираженою гармонійною структурою спектра випромінювання. Застосування двох лінійних масивів мікрофонів, розташованих ортогонально та налаштованих на прийом хвиль з частотою нижчою 500 Гц, дала змогу забезпечити круговий огляд простору на відстані до 2 км. Використавши некогерентну обробку декількох гармонійних складових в смузі частот (100-200) Гц вдалось побудувати зображення траєкторії руху об'єкту з високою кутною роздільною здатністю і малим спотворенням. Застосування модуля з чотирьох мікрофонів [8], розташованих у вершинах тетраедру, дозволило зменшити час спостереження довкілля та зробити модуль більш дешевим. Для виявлення МЛА був використаний типовий підхід формування ХС затримкою та сумою прийнятих окремими мікрофонами хвиль. Для збільшення відношення сигнал/завада на виході формувача ХС включався фільтр Вінера з передаточною характеристикою розрахованою по експериментально визначеним СЩП сигналу і завади. Дослідження проводились у чотирьох смугах частот випромінювання МЛА: (80-2000) Гц, (250-2000) Гц, (400-2000) Гц, (800-1700) Гц. Спостерігалась тенденція збільшення відстані виявлення з підвищенням смуги частот фільтра. Максимальна відстань виявлення становила 600 м з вірогідністю 99% та хибними спрацюваннями 3%. Такий результат пояснюється зменшенням величини СЩП фонового шуму з ростом частоти та тривалим часом (4с) експозиції. Розрахунок кута траєкторії польоту МЛА вівся з використанням фільтра Кальмана по даним отриманим з формувача ХС. Результати оцінки азимутального кута співпали з показниками GPS навігатора в 60% випробувань з похибкою в межах 10° . Оцінка кута

підвищення, за ствердженням авторів, була погана. Пояснюється це наявністю реверберації від землі.

Для виявлення МЛА в умовах реверберації деякі автори [9, 10] застосовують метод ГСС-РНАТ. Суть методу ГСС-РНАТ [11] полягає в наступному. Прийняті мікрофонами M_1, M_2 сигнали $x_1(t), x_2(t)$ підлягають процедурі перетворень Фур'є та подальшій фільтрації. Спектри сигналів записують як $X_1(\omega), X_2(\omega)$. Амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) фільтрів позначають як $G_1(\omega), G_2(\omega)$. Головна функція взаємної кореляції (ГСС) $R_{12}(\tau)$ знаходиться через зворотне перетворення Фур'є від-фільтрованого взаємного спектра:

$$\begin{aligned} R_{12}(\tau) &= \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [X_1(\omega)G_1(\omega)][X_2(\omega)G_2(\omega)]^* \exp(j\omega\tau) d\omega = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{12}(\omega)X_1(\omega)X_2^*(\omega) \exp(j\omega\tau) d\omega, \end{aligned}$$

$$\psi_{12}(\omega) = G_1(\omega)G_2^*(\omega).$$

Оцінка часу затримки (параметр τ) ведеться по максимуму функції $R_{12}(\tau)$. Функція $R_{12}(\tau)$ може мати кілька локальних максимумів, які приводять до невірної оцінки τ . Амплітуди і відповідні часові затримки цих помилкових максимумів залежать від ряду факторів, зазвичай від рівнів навколишнього шуму і умов реверберації. Метою введення вагової функції $\psi_{12}(\omega)$ є виділення істинного максимуму над небажаними локальними екстремумами. Ряд таких вагових функцій був досліджений раніше та встановлена оптимальна:

$$\psi_{12}(\omega) = 1/|X_1(\omega)X_2^*(\omega)|.$$

Така вагова функція «відбілює» спектри сигналів мікрофонів, тобто нормує всі спектральні компоненти. Після процедури нормування зберігається тільки фазова інформація. Підхід дістав назву методу фазової трансформації (ГСС-РНАТ) та застосовується для визначення часової затримки в задачах пеленгування звукових джерел. Будучи ефективним у випадку багатопроменевого поширення хвиль метод фазової трансформації малоефективний при низькій реверберації та за умов високого рівня фоновому шуму.

Цей підхід був застосований для формування керованої просторової характеристики потужності та дістав назву методу SRP-РНАТ [11, 12]. Він базується на обробці вхідних сигналів методом ГСС-РНАТ з подальшим складанням отриманих результатів. Метод забезпечує формування характеристики потужності (ХП) нечутливої до випадкових амплітудних значень сигналу. Для локаційної системи із декількох мікрофонів $i = k = 1, 2, \dots, N$ керування

ХП можна записати як:

$$P(\mathbf{q}) = \sum_{i,k}^N R_{ik}(\tau_{ik}), \quad i \neq k,$$

де $P(\mathbf{q})$ – результуюча потужність на виході суматора; \mathbf{q} – вектор управління в вибраному напрямку; N – кількість мікрофонів; $R_{ik}(\tau_{ik})$ – функція обчислена методом ГСС-РНАТ між акустичними каналами i та k ; τ_{ik} – очікувана різниця часу прибуття плоскої хвилі на мікрофони з номерами i та k вздовж вектору управління \mathbf{q} .

Метод SRP-РНАТ був застосований в акустичних модулях системи трекування DADS [13] для визначення його кутових координат. Акустичний модуль мав чотири мікрофони розташовані у вершинах тетраедру. Алгоритм був реалізований в програмному забезпеченні LabVIEW, що дозволяло обробляти сигнал в режимі реального часу. Графічний інтерфейс відтворював траєкторію руху об'єкта в координатах «азимут»-«кут підвищення». Яскравість елементів зображення треку залежала від потужності прийнятого сигналу. Експериментальні дослідження проводились різними конфігураціями системи DADS з декількома типами МЛА в різних натурних умовах. Наприклад, локалізація МЛА «Inspire2» велась триангуляційним методом із застосуванням двох акустичних модулів рознесених на відстань 60 м і вузла обробки та відображення інформації. Результат локалізації виводився на екран у вигляді 3D треку одночасно з доріжкою GPS навігатора, розміщеного на МЛА. Максимальна дальність трекування становила 250 м за умови присутності акустичних шумів (45-50) дБА. В подальшому досліджувалась система спостереження з трьома акустичними модулями, розміщеними на поверхні землі в вершинах рівностороннього трикутника. Максимальна відстань виявлення була досягнута в момент знаходження МЛА на нормалях до акустичних баз (сторін трикутника) і становила 200 м з достовірністю 50% і 100 м з достовірністю 100%. Треба зауважити, що дальність виявлення суттєво зменшувалась в напрямку продовження акустичних баз. Для порівняння системи DADS з іншими акустичними пристроями пеленгування були проведені експерименти та представлені результати по локалізації МЛА акустичною дворівневою перехресною матрицею із 16 мікрофонів, параболічною мікрофонною системою, мікрофонною «гвинтівкою» з гострою ХС, матрицею мікрофонів з 40 цифрових мікрофонів на базі (40*40) см з фазовим скануванням простору. Авторами встановлено перевагу системи DADS по дальності та достовірності виявлення і трекування МЛА перед іншими засобами.

Система з двох акустичних модулів у вигляді тетраедра та вузла обробки інформації [14] застосовувалась для локалізації МЛА в умовах міста. Акустичні модулі розташовувались на даху будинку. Для зменшення реверберації поверхня під модулями

оброблялась поглинаючим звук матеріалом. Обробка сигналів прийнятих мікрофонами велась з використанням алгоритму GCC-PHAT. Розрахований параметр – час затримки сигналу між мікрофонами, носив випадковий характер. Для забезпечення достовірності оцінки параметра автори запропонували порівнювати розраховані оцінки для деякого часового інтервалу спостереження з нормальним законом Гауса, побудованим для попереднього часового інтервалу. Такий підхід дав можливість відкинути хибні оцінки параметра. В подальшому для побудови траєкторії руху МЛА отримані дані оброблялись фільтром Кальмана. Проведені експерименти з МЛА Phantom 2 показали можливість його виявлення в умовах міста на відстані 100 м за умови, що відношення сигнал-завада дорівнює -5 дБ. Оцінка похибки визначення траєкторії велась відносно показників навігатора GPS і не перевищувала 4 м.

Із розглянутого вище можна зробити висновок про перспективність побудови систем локалізації і трекування МЛА на основі простих акустичних модулів із чотирьох мікрофонів розташованих в вершинах тетраедру. Дослідження відомих і пошук нових алгоритмів обробки шумових сигналів прийнятих такими модулями становить мету роботи.

1 Алгоритми пеленгування

Для пеленгування МЛА застосуємо акустичний модуль з чотирьох мікрофонів розташованих у вершинах тетраедра (рис. 1). Основа тетраедра – рівносторонній трикутник, навколо якого можна описати коло радіусом r . Мікрофони знаходяться в вершинах трикутника. Кутіві координати мікрофонів M1, M2, M3 $\beta_i = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$; $i = 1, 2, 3$ відповідно. Мікрофон M4 розташовано в вершині тетраедра.

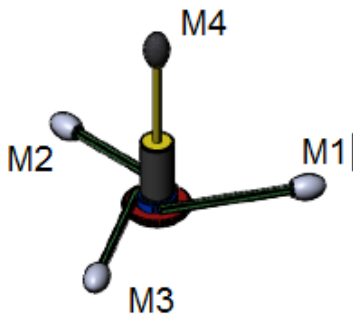


Рис. 1. Схема розташування мікрофонів у вершинах тетраедра

Пеленгування шумового джерела – визначення азимутального кута і кута підвищення, будемо вести в наступній послідовності [15]. Спочатку визначимо кут приходу звуку в горизонтальній площині, а потім для встановленого сектору спостереження визначимо кут підвищення. Пеленгування ведемо методом сканування довкілля керованою просторовою

характеристикою потужності (КПХП) акустичної системи із трьох мікрофонів M1, M2, M3 розміщених в основі тетраедра.

Реалізація способу сканування зводиться до затримки і суми прийнятих мікрофонами сигналів:

$$y(t) = \sum_i x_i(t - \tau_i), \quad (1)$$

де $y(t)$ – результат на виході суматора, $x_i(t - \tau_i)$ – прийняті і затримані на час τ_i сигнали мікрофонів.

В подальшому розраховуємо потужність на деякому проміжку часу T :

$$P(T) = \int_T y(t)^2 dt. \quad (2)$$

Керуючі затримки τ_i знаходимо із співвідношення [8, 10]:

$$\tau_i = -\frac{p' m_i}{c}, \quad (3)$$

де p – напрямок прийому акустичної плоскої хвилі; m_i – координата i -го мікрофона; $'$ – операція транспонування; c – швидкість звука.

Для масива мікрофонів у вигляді рівностороннього трикутника, вписаного в коло радіуса r , час затримки τ_i для кожного мікрофона розраховуємо відносно центру кола як функцію кута керування θ :

$$\tau_i = -\frac{r \cos(\theta - \beta_i)}{c}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (4)$$

де β_i – кутова координата мікрофона; c – швидкість звука.

Розглянемо приклад сканування простору трьома мікрофонами розміщеними еквідистантно по колу радіуса $r = 0.4$ м, з кутівіми координатами $\beta_i = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$; $i = 1, 2, 3$. Швидкість звуку прийемо $c = 340$ м/с. Введемо затримки, розраховані по (4) та представлені на рис. 2, в кожний мікрофонний канал відповідно. В подальшому виконуються операції суми затриманих сигналів, зведення в квадрат та накопичення згідно виразів (1,2). У разі компенсації керованими затримками часу запізнення прийнятих мікрофонами акустичних хвиль результат на виході каналу обробки буде максимальним, а час затримки вкаже на кутіву координату джерела. Треба зауважити, що визначення максимуму залежить від гостроти КПХП мікрофонної системи. Кут розкриття КПХП, який визначає кутіву роздільну здатність по рівню -3 дБ, суттєво залежить від хвильового розміру системи та частотної смуги прийнятого сигналу.

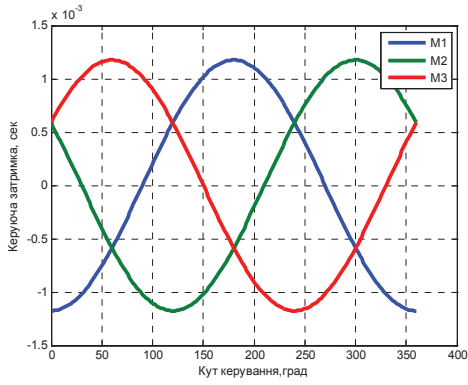


Рис. 2. Графіки керуючих затримок

На рис. 3 приведені діаграми КППХ трикутної матриці мікрофонів, вписаної в коло радіуса $r = 0.4$ м, для широкосмугового сигналу із смугою частот $f = (100 - 1100)$ Гц і декількох кутів керування $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$.

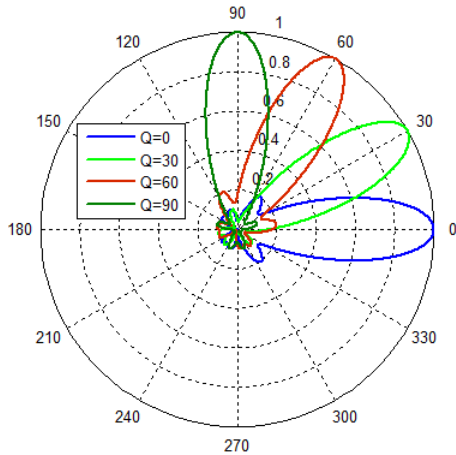


Рис. 3. Діаграми КППХ трикутного масиву мікрофонів

Для приведеного прикладу оцінка похибки визначення кутової координати дорівнює оцінці кута розкриття КППХ та становить $\theta_{e\phi} = 24^\circ$. Така точність незначна, тому застосовують інші способи пеленгування.

Для визначення часових затримок [11–14] використовують процедуру взаємної кореляційної обробки акустичних хвиль прийнятих мікрофонами. Враховуючи те, що на вхід мікрофонів одночасно з корисним сигналом поступає завада, взаємна кореляційна функція (ВКФ) може мати декілька локальних максимумів, що приводить до похибок в оцінці часового параметра. Для покращення точності визначення часу затримки застосовують процедуру спектральної обробки та фільтрації прийнятої суміші сигналу та завади фільтрами з різними частотними характеристиками. Подальше зворотне перетворення Фур'є очищеного спектра дає можливість отримати ВКФ з добре локалізованим максимумом. Такий підхід, як зазначають автори, дає

хороший результат, але потребує великих апаратних і часових ресурсів обробки.

Для зменшення кількості розрахунків розраховують ВКФ для сигналів мікрофонів згрупованих у пари [16]. Взаємна кореляційна функція $R_{ij}(\tau)$ між сигналами прийнятими парою мікрофонів M_i, M_j ($i = 1, 2; j = 2, 3; i \neq j$) на деякому часовому проміжку спостереження T визначається як:

$$R_{ij}(\tau) = \int_0^T [x(t) + n(t)][x(t - \tau_{ij} + \tau) + m(t + \tau)] dt = R_{xx}(\tau - \tau_{ij}) + R_{xm}(\tau) + R_{nx}(\tau - \tau_{ij}) + R_{nm}(\tau), \quad (5)$$

де $x(t), n(t), m(t)$ – корисний сигнал та акустичні завади на входах мікрофонів відповідно; $R_{xx}(\tau - \tau_{ij})$ – кореляційна функція (КФ) вхідного сигналу з затримкою у часі на τ_{ij} ; $R_{xm}(\tau), R_{nx}(\tau - \tau_{ij}), R_{nm}(\tau)$ – ВКФ процесів, які діють на входи приймачів. За умови відсутності кореляції між цими процесами та великого проміжку часу спостереження величини ВКФ дорівнюють нулю.

Для шумового сигналу, яким є випромінювання МЛА, КФ записується виразом:

$$R_{xx}(\tau_{ij}) = \sigma_x^2 \frac{\sin(2\pi\Delta f\tau_{ij})}{2\pi\Delta f\tau_{ij}}, \quad (6)$$

де $\sigma_x^2, \Delta f$ – дисперсія та смуга частот шуму випромінювання.

Затримки τ_{ij} між парами мікрофонів в залежності від кута приходу хвилі θ можуть бути знайдені із виразу (4):

$$\tau_{ij} = \tau_i - \tau_j = -\frac{2r}{c} \sin\left(\frac{\beta_j - \beta_i}{2}\right) \sin\left(\frac{2\theta - (\beta_j + \beta_i)}{2}\right), \quad i = 1, 2; j = 2, 3; i \neq j. \quad (7)$$

Для прикладу розглянутому вище, графіки затримок часу приходу хвиль на пари мікрофонів M1-M2, M1-M3, M2-M3 в залежності від кута приходу приведено на рис. 4.

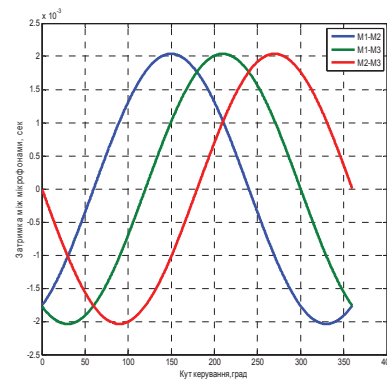


Рис. 4. Графіки затримок між парами мікрофонів

Визначивши по ВКФ (рис. 4) затримки τ_{ij} , встановлюють кути приходу звукової хвилі. У разі розбіжності отриманих для пар мікрофонів кутових оцінок користуються статистичним усередненням результатів. Застосування ВКФ підвищує завадостійкість приймача та зменшує похибку пеленгування.

Подальшим вдосконаленням способу сканування докільця системою із трьох мікрофонів є застосування алгоритму керованої просторової кореляційної характеристики (КПКХ). Для цього між парами мікрофонів вводять затримки керування (7) послідовно для кожного кутового напрямку (кута керування θ), розраховують та складають відповідні ВКФ:

$$P(p) = \sum_{i,j} R_{ij}(\tau_{ij}); i = 1, 2; j = 2, 3; i \neq j, \quad (8)$$

де $P(p)$ – потужність на виході суматора в напрямку прийому акустичної хвилі.

Максимальне значення потужності буде дорівнювати потроєному значенню потужності прийнятих акустичних хвиль за умови компенсації затримками τ_{ij} часу їх приходу до пар мікрофонів. Розглянемо застосування КПКХ для сканування простору системою трьох мікрофонів приведеною у попередньому прикладі. Були розраховані та побудовані діаграми КПКХ (рис. 5) прийнятого шуму з параметрами $\sigma_x^2 = 1$, $\Delta f = 1000$ Гц для декількох значень кута керування $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. Кут приходу хвилі визначається по максимуму КПКХ. Похибка оцінки кута приходу хвилі велась по куту розкриття КПКХ на рівні -3дБ, як і у випадку оцінки похибки методом КППП. Кут розкриття КПКХ становить $\theta_{\text{эф}} = 18^\circ$. Він менше за кут розкриття $\theta_{\text{эф}} = 24^\circ$ КППП. Порівнюючи оціночні похибки визначення кутових координат методами КППП та КПКХ можна очікувати на перевагу кореляційного способу формування характеристики спрямованості по точності визначення кута та по параметру виявлення.

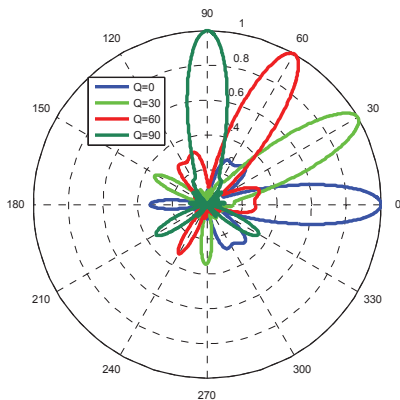


Рис. 5. Діаграми КПКХ для різних кутів керування

2 Експеримент

Для перевірки розглянутих вище алгоритмів сканування були проведені декілька експериментів по пеленгуванню джерела шуму в приміщенні розмірами (12*8*6) м при температурі 18°C. Макет акустичного модуля (АМ) мав конструкцію тетраедра, в основі якого були розміщені еквідистантно 3 мікрофони по колу радіуса 0.4 м. Четвертий мікрофон був розміщений в вершині тетраедру (рис. 6).



Рис. 6. Макет акустичного модуля

Застосовувались конденсаторні мікрофони МК202 з вбудованими підсилювачами MV201. Поряд розміщувався блок живлення мікрофонів та звукова карта, яка забезпечувала запис чотирьох аудіо файлів в пристрій пам'яті з частотою дискретизації 100 кГц. АМ був встановлений на тринозі висотою 1.1 м.

Джерелом шуму була активна акустична система (АС) з смугою частот випромінювання від 200 Гц до 8 кГц. АС переміщувалась по колу радіусом 3 м з фіксацією кута відносно АМ. Білий шум різної тривалості генерувався в програмному середовищі Matlab на ПК та подавався на АС.

Експеримент проводився в декілька етапів. На першому вівся запис звукового фону приміщення, який дав змогу оцінити його рівень та кутову рівномірність. На другому були проведені записи імпульсних шумів, які дали змогу оцінити час реверберації приміщення. В подальшому, підібравши параметри тестових сигналів, провадилися записи звуку для різних кутових положень АС.

Обробка записів аудіо файлів по запропонованим алгоритмам була реалізована на ПК із застосуванням програм написаних в MATLAB. Результати розрахунків представлені у вигляді графіків.

3 Обговорення результатів досліджень

По результатам обробки записів звукового фону у приміщенні були побудовані графіки (рис. 7) залежності рівня фону від кута спостереження методами КПХП та КПКХ. Як і очікувалось фонове поле у приміщенні близьке до ізотропного, а рівень шуму отриманий по алгоритму КПКХ суттєво менше рівня отриманого по алгоритму КПХП.

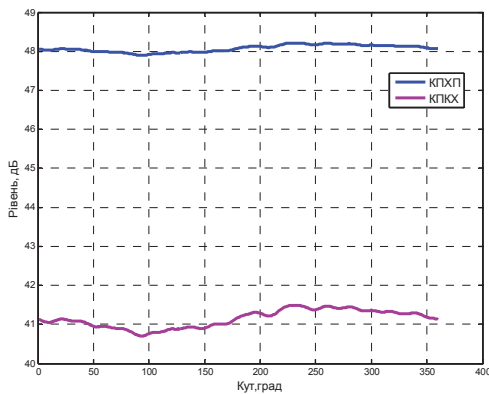


Рис. 7. Кутові характеристики рівня звукового фону

Інша ситуація при випромінюванні неперервного у часі звуку (рис. 8). Акустичне поле стає анізотропним тому, що формується хвилями відбитими від поверхонь приміщення різних за розміром і відбиваючими властивостями.

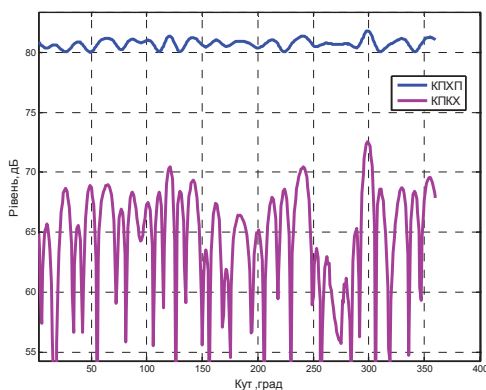


Рис. 8. Кутові характеристики рівня звуку за наявності випромінювача

Дослідження акустичних характеристик приміщення показало досить великий час реверберації. Оцінка середнього часу реверберації становила 0.3 с

по рівню -30 дБ. Ревербераційний процес для білого шуму тривалістю 10 мс в смузі частот (200-2000) Гц приведено на рис. 9. З аналізу осцилограми можна зробити висновок про реверберацію як суму багатьох відбитих від поверхонь приміщення акустичних хвиль різної інтенсивності, які приходять з різних напрямків у різний час. Акустичною моделлю приміщення може бути набір уявних джерел розмічених у місці розташування відбивачів. Тому при дослідженні кутових характеристик потужності прийнятого звуку слід очікувати максимум потужності дійсного джерела та багато локальних максимумів уявних джерел.

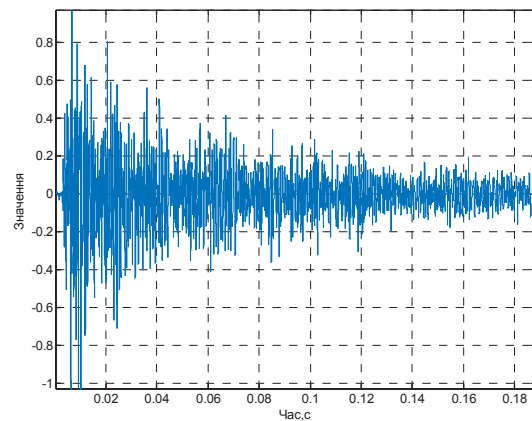


Рис. 9. Осцилограма реверберації імпульса шуму

Експеримент по визначенню кутового положення джерела проводився наступним чином. Акустична система фіксувалась в деяких кутах на колі радіусом 3 м. Центр кола був суміщений з центром АМ. Кутове положення АС відраховувалось від кутової координати $\beta_1 = 0^\circ$ першого мікрофону АМ. Точність визначення центра АС по теодоліту становив $\Delta\theta = \pm 2^\circ$. У якості тестового сигналу використовувався білий шум із смугою частот (200-2000) Гц тривалістю 10 мс. Обробка записів велась алгоритмами КПХП та КПКХ.

На рис. 10 приведені залежності нормованої потужності шуму від кута спостереження, отримані двома способами, для кутового положення АС $\theta = 300^\circ$. Графіки мають багато локальних максимумів, які визначають координати відбивачів. Головний максимум вказує на кутове положення АС, яке однакове для двох методів і становить $\theta^* = 299^\circ$. По графікам можна оцінити кутове положення тильного відбивача (стіни, нормальної до падіння звукової хвилі), яке дорівнює $\theta^{**} = 119^\circ$.

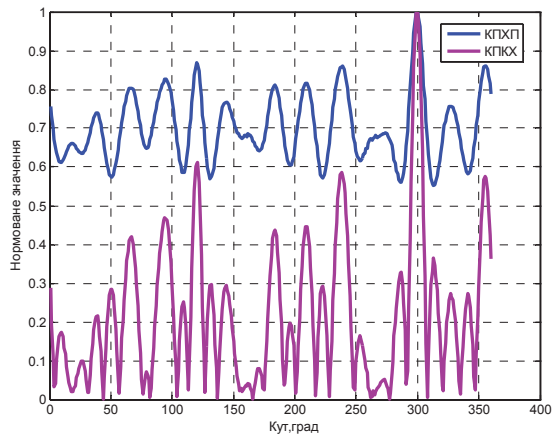


Рис. 10. Кутова залежність потужності прийнятого шуму (кутове положення АС $\theta = 300^\circ$)

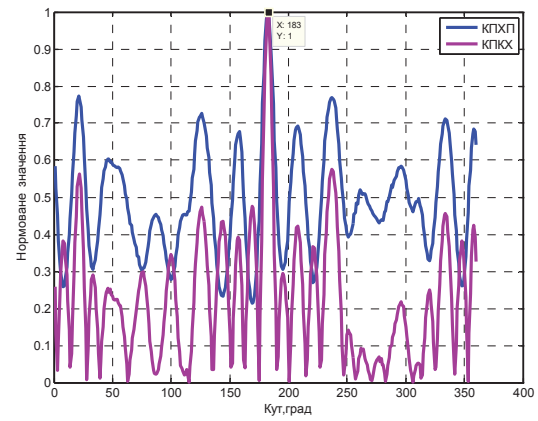


Рис. 12. Кутова залежність потужності прийнятого шуму (кутове положення АС $\theta = 180^\circ$)

Похибка вимірювання кута була оцінена по куту розкриття на рівні -3 дБ головного максимуму характеристик (рис. 11) і становила $\theta_{ef} = 22^\circ$ та $\theta_{ef} = 12^\circ$ для КPHП та KPKX відповідно.

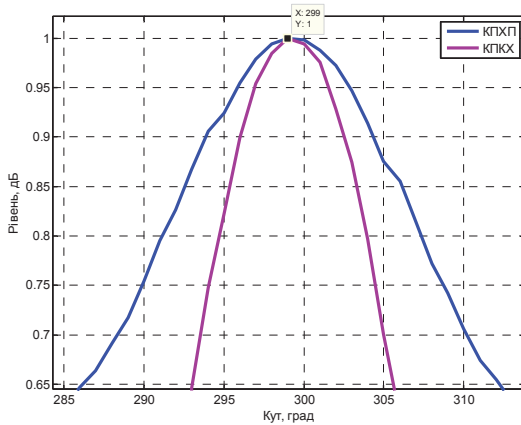


Рис. 11. Оцінка кутів розкриття максимумів характеристик

На рис. 12 приведено графіки залежності нормованої потужності шуму від кута спостереження для кутового положення АС $\theta = 180^\circ$. Графіки мають багато локальних максимумів та головним, спрямованим на джерело, кут якого $\theta^* = 183^\circ$ близький до достовірного.

Висновки

1. В роботі розглянуто можливість застосування акустичного модуля з чотирьох мікрофонів, розташованих в вершинах тетраедра, для визначення кутових координат МЛА. Перевага такого модуля полягає у використанні пасивних методів спостереження, виявлення та пеленгування МЛА. Проста конструкція, відносно незначні апаратні та часові затрати на обробку акустичних сигналів, невелика собівартість роблять модуль перспективним для застосування в системах локалізації МЛА.
2. Для визначення кутових координат запропоновано алгоритми КPHП та KPKX. Теоретично встановлено переваги KPKX перед КPHП, які полягають у зменшенні похибки визначення кута та більшій завадостійкості.
3. Проведено лабораторні дослідження пеленгування джерела шуму - акустичної системи з параметрами шуму моделюючими випромінювання МЛА. Не зважаючи на суттєву реверберацію, вдалось виявити і розрахувати кутові координати джерела. Встановлена перевага способу KPKX перед КPHП по похибці визначення кутової координати.
4. Акустичний модуль у вигляді тетраедра з застосуванням алгоритма KPKX може бути складовою системи локалізації та трекування малих літаючих апаратів та інших джерел звукового випромінювання. Розробка таких систем перспективна та актуальна.
5. Запропоновані алгоритми обробки звуку можуть бути застосовані для експертної оцінки

приміщення в задачах архітектурної акустики, а саме для експериментального визначення розташування та оцінки поглинання огорожуючих конструкцій, локалізації порушень звукової ізоляції приміщення і т. ін.

References

- [1] Birch G. C., Griffin J. C. and Erdman M. K. (2015) *UAS Detection Classification and Neutralization: Market Survey 2015*. United States. DOI: 10.2172/1222445.
- [2] Hassanalian M. and Abdelkefi A. (2017) Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 91, pp. 99-131. DOI: 10.1016/j.paerosci.2017.04.003.
- [3] Mandal S., Chen L., Alaparthi V. and Cummings M. L. (2020) Acoustic Detection of Drones through Real-time Audio Attribute Prediction. *AIAA Scitech 2020 Forum*. DOI: 10.2514/6.2020-0491.
- [4] Kozeruk S. O. and Korzhik O. V. (2019) Detection Small Aircraft by Acoustic Radiation. *Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparato buduvannia*, Iss. 76, pp. 15-20. DOI: 10.20535/radap.2019.76.15-20.
- [5] Kozeruk S. O. and Korzhik O. V. (2019). Correlation direction finder for small aircraft. *Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparato buduvannia*, Iss. 79, pp. 41-47. DOI: 10.20535/RADAP.2019.79.41-47
- [6] Case E. E., Zelnio A. M. and Rigling B. D. (2008) Low-Cost Acoustic Array for Small UAV Detection and Tracking. *2008 IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, pp. 110-113. DOI: 10.1109/naecon.2008.4806528.
- [7] T. Pham and L. Sim (2002) Acoustic detection and tracking of small low-flying threataircraft. *23rd Army Science Conference*.
- [8] Benyamin M. and Goldman G.H. (2014) *Acoustic Detection and Tracking of a Class I UAS with a Small Tetrahedral Microphone Array*. DOI: 10.21236/ada610599.
- [9] Sedunov A., Sutin A., Sedunov N., Salloum H., Yakubovskiy A. and Masters D. (2016) Passive acoustic system for tracking low-flying aircraft. *IET Radar, Sonar & Navigation*, Vol. 10, Iss. 9, pp. 1561-1568. DOI: 10.1049/iet-rsn.2016.0159.
- [10] Sedunov A., Salloum H., Sutin A., Sedunov N. and Tsyuryupa S. (2018) UAV Passive Acoustic Detection. *2018 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)*, pp. 1-6. DOI: 10.1109/thst.2018.8574129.
- [11] DiBiase J. H., Silverman H. F. and Brandstein M. S. (2001) Robust Localization in Reverberant Rooms. *Digital Signal Processing*, pp. 157-180. DOI: 10.1007/978-3-662-04619-7_8.
- [12] Damarla T. (2015) *Battlefield Acoustics*, 262 p. DOI: 10.1007/978-3-319-16036-8.
- [13] Sedunov A., Haddad D., Salloum H., Sutin A., Sedunov N. and Yakubovskiy A. (2019) Stevens Drone Detection Acoustic System and Experiments in Acoustics UAV Tracking. *2019 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)*, pp. 1-7. DOI: 10.1109/hst47167.2019.9032916.
- [14] Chang X., Yang C., Wu J., Shi X. and Shi Z. (2018) A Surveillance System for Drone Localization and Tracking Using Acoustic Arrays. *2018 IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, pp. 573-577. DOI: 10.1109/sam.2018.8448409.
- [15] Didkovskiy V., Kozeruk S. and Korzhik O. (2019) Simple Acoustic Array for Small UAV Detection. *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, pp. 656-659. DOI: 10.1109/elnano.2019.8783262.
- [16] Kozeruk S. and Serhienko O. (2018) Approbation of Evaluation Techniques of Acoustic Waves Time Delay for Sound Sources Localization. *2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, pp. 582-586. DOI: 10.1109/elnano.2018.8477565.

Акустический модуль для пеленгования малых летательных аппаратов

Козерук С. А., Коржик А. В., Воловик Д. И., Пуха Г. С.

Введение. Актуальность исследуемой проблемы обусловлена использованием беспилотных малых летательных аппаратов для мобильного обслуживания населения по доставке почты, товаров, обеспечения наблюдения и безопасности. Одновременно растет и опасность их использования в акциях, которые несут угрозу как государственным, так и частным интересам. Для наблюдения за объектами применяют устройства различного физического действия, которые имеют как преимущества, так и недостатки. Пассивные акустические средства наблюдения обеспечивают скрытость наблюдения, но имеют небольшую дальность обнаружения. Увеличить расстояние обнаружения можно за счет совершенствования конструкций приемных микрофонных модулей и разработки эффективных алгоритмов наблюдения и локализации.

Теоретические результаты. В работе представлена конструкция акустического модуля в виде тетраэдра с микрофонами, размещенными в его вершинах. Сканирование пространства по угловым координатам предложено вести с применением алгоритмов формирования управляемой характеристики мощности или управляемой корреляционной характеристики. Для каждого способа приведены теоретическое обоснование алгоритмов сканирования, результаты расчета характеристик направленности и оценки погрешности определения угловых координат. Сравнение двух способов установило преимущество алгоритма управляемой пространственной корреляционной характеристики направленности по помехоустойчивости и точности пеленгования. Были проведены лабораторные исследования по пеленгованию источника шума макетом акустического модуля. Несмотря на реверберацию помещения, удалось проверить теоретические результаты и подтвердить преимущество алгоритма корреляционного формирования направленности.

Выводы. Результаты работы могут быть использованы для создания акустических пеленгаторов и систем локализации шумовых объектов. Предложенный алгоритм управляемой корреляционной характеристики может быть использован в средствах мониторинга для оценки акустических характеристик помещений,

например, для экспериментального определения расположения и оценки поглощения звука ограждающими конструкциями, локализации нарушений звуковой изоляции помещения.

Ключевые слова: малый летательный аппарат; акустический модуль; пеленгование; характеристика направленности

Acoustic Module for Direction Finding of Small Aircraft

Kozeruk S. O., Korzhyk O. V., Volovik D. I., Pukha G. S.

Introduction. The studied problem is relevant due to the growing use of unmanned small aircraft for mobile services of the mail and goods delivery, surveillance and security. At the same time, the danger of their use in events/campaigns, which pose a threat to both public and private interests, is increasing. Principally different devices are applied for surveillance; each type has its advantages and disadvantages. Passive acoustic surveillance tools provide stealth observation, but have a small detection range. It is possible to increase detection distance by improving the receiving microphones module design and developing effective monitoring and localization algorithms.

Theoretical Results. The paper presents the design of an acoustic module in the form of a tetrahedron with microphones located on its vertices. It is proposed to scan the space by angular coordinates using algorithms to generate a controlled power characteristic or controlled correlation characteristic. The theoretical justification of scanning algorithms, the results of the calculation of directivity characteristics and estimates of the error in determining the angular coordinates for each method are provided. Laboratory studies were conducted on direction finding of a noise source by the acoustic module prototype. Despite of reverberation in the room, it was possible to verify the theoretical results and confirm the advantage of the algorithm for the correlation formation of directivity.

Conclusions. The results of the work can be used to create acoustic direction finders and systems for localizing noise objects. The proposed algorithm of controlled correlation characteristic can be used in monitoring tools to assess the acoustic characteristics of premises, for example, to experimentally determine the location and estimate sound absorption of enclosing constructions/the obstacles, to localize breaches in sound isolation.

Key words: small aircraft; acoustic module; direction finding