

УДК 623.746-519:534.2

Дослідження можливостей звуколокації БпЛА у завданнях моніторингу терористичних загроз

Орлов В. В., Лусий М. І., Сівак В. А., Купрієнко Д. А., Кульчицький В. М., Добровольський А.Б.

Національна академія Державної прикордонної служби України ім. Богдана Хмельницького

E-mail: dob.andrey@gmail.com

Стаття присвячена дослідженню систем звуколокації безпілотних літальних апаратів для моніторингу терористичних загроз, які є захищеними від засобів радіоелектронної боротьби. В роботі запропоновано звуколокаційну систему щодо виявлення рухомих об'єктів, яка побудована за допомогою мережі датчиків, що розміщені в просторі. Основною відмінністю від існуючих звуколокаційних систем є визначення часової затримки не за взаємною кореляційною функцією, а за взаємною функцією невизначеності сигналів між датчиками. Однак застосування методу взаємної функції невизначеності обмежено лише визначенням характеристик для одноцільової ситуації, тобто неможливо оцінити координати у випадку двох цілей, і відповідно, у багатоцільовій ситуації, при атаці великої кількості безпілотних літальних апаратів. Також існує обчислювальна складність обробки широкосмугових сигналів у часовій, спектральній та доплерівській областях. Якщо для нерухомих цілей досить обробки в спектрально-часовій області на основі швидкого перетворення Фур'є, то для рухомих цілей потрібна додаткова багатоканальна обробка в області доплерівських частот. Так як число доплерівських каналів порівнянне з розміром вибірки, то обчислювальні витрати суттєво зростають, на кілька порядків, тому для роботи системи звуколокації в реальному часі доцільна розробка програмного забезпечення із застосуванням паралельного програмування, бібліотеки OpenMP, відеокарти з векторною та матричною обробкою даних, GPU NVIDIA на основі технології CUDA. Це дозволить прискорити виконання операцій приблизно в 30 разів та забезпечити реалізацію систем на портативних комп'ютерах. Проведений аналіз системи звуколокації показав потенційні можливості визначення координат безпілотних літальних апаратів та інших рухомих об'єктів у тривимірному просторі з точністю, достатньою для подальшого супроводу цілей засобами візуального спостереження.

Ключові слова: рухомий об'єкт; безпілотний літальний апарат; звуколокація; часова затримка; доплерівська частота; швидке перетворення Фур'є

DOI: [10.20535/RADAP.2019.78.24-32](https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.78.24-32)

Вступ

На сьогодні спостерігається стрімке зростання терористичних загроз із застосуванням безпілотних літальних апаратів (БпЛА), а також використання їх як засобів для транспортування контрабанди. При цьому висока маневреність, мала помітність та невеликі габарити БпЛА породжують проблему їх оперативного виявлення. Це в свою чергу вимагає вдосконалення різноманітних дистанційних засобів моніторингу рухомих об'єктів (РО). Так, наприклад, низька ефективність виявлення малих БпЛА радіолокаційними станціями, зумовлена малою відбиваючою поверхнею та низькою висотою польоту. Засоби відеоконтролю також малоефективні внаслідок зміни прозорості атмосфери, неповноти даних щодо напрямку, висоти та часу появи БпЛА.

У публікаціях [1–3] детально досліджено записи акустичних сигналів, визначення спектральних характеристик ряду одногвинтових і багатогвинто-

вих БпЛА: дронів вертолітного й літакового типу, з електродвигуном та двигуном внутрішнього згоряння. Показані принципові можливості побудови систем розпізнавання на основі параметрів спектрів сигналів, що відображають особливості конкретних літальних апаратів. Однак, не наведено кількісних характеристик ефективності розпізнавання.

На сьогодні у Збройних силах України застосовуються високоточні засоби розвідки, які призначені для визначення координат снайперів та вогневих позицій артилерії. Наприклад, автоматизовані звукометричні комплекси АЗК-5 «Тембр», АЗК-7 «Мезотрон» (які прийнято на озброєння у 80-х роках), а також більш досконалий розвідувальний автоматизований звукометричний комплекс «Положення-2» (прийнятий на озброєння у 2013 р.) [4].

Розробка та удосконалення звуколокаційних пасивних систем, що є захищеними від засобів радіоелектронної боротьби, є перспективним напрямом, а потреба у дослідженні потенційних можливостей

звуколокаційних систем для визначення координат БпЛА (або іншого РО), як джерел звукових сигналів у тривимірному просторі, обумовило мету роботи.

1 Результати дослідження

Функціональну схему запропонованої звуколокаційної системи виявлення РО представлено на рис. 1. Вона забезпечить моніторинг зони контролю з метою виявлення окремих порушень, а також групових терористичних атак із застосуванням воєнних засобів різного калібру, різних типів РО.

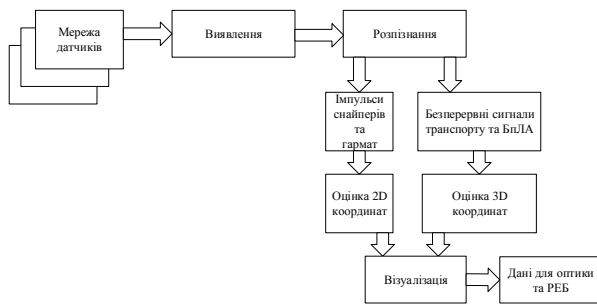


Рис. 1. Функціональна схема акустичної системи локації

Акустичні сигнали імпульсного та безперервного характеру надходять з мережі датчиків у пристрій багатоканального введення даних, потім у комп'ютер через USB інтерфейс. Подальша обробка, що включає операції виявлення, розпізнавання РО за їх акустичним полем (різні види стрілецької зброї, артилерії, транспорту), визначення їх координат здійснюються в реальному часі, у режимі оновлення даних з періодичністю 1 сек. Далі, за командою оператора, спостерігачам передаються координати розпізнаної цілі для супроводу оптичними засобами спостереження та застосування засобів протидії (наприклад, радіоелектронної боротьби з вузько направленою антеною для ураження БпЛА) [5].

Алгоритм їх роботи засновано на розрахунках часових затримок імпульсних сигналів від нерухомих джерел випромінювання, що надходять на датчики-мікрофони, що рознесено у 2D-просторі.

Розв'язок рівняння в декартових координатах на площині про місце розташування джерела випромінювання при відомих координатах двох пар датчиків $x_i, y_i, i = 1, 2, \dots, 4$ визначається з відношення часових затримок $\tau_{1,2}, \tau_{3,4}$ кожної з пар, і відстаней $r_{12} = r_1 - r_2 = c\tau_{1,2}, r_{34} = r_3 - r_4 = c\tau_{3,4}$, де c — швидкість поширення звукової хвилі. Координати цілі (x, y) описуються математичною моделлю

у вигляді системи двох гіперболічних рівнянь, що складені відповідно до теореми Піфагора:

$$\begin{aligned} r_{12} = r_1 - r_2 &= \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} - \\ &\quad \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2}, \\ r_{34} = r_3 - r_4 &= \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \\ &\quad \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Методи обчислення координат за часовими затримками при розв'язку рівняння (1) у звуколокації, за фазовими затримками у радіопеленгації широко відомі та систематизовані в [6, 7] і в цій статті не досліджуються. Основні помилки при розв'язку нелінійної системи рівнянь (1) пов'язані з появою декількох коренів рівнянь (неоднозначність визначення координат [8]) та похибками, що вносяться при оцінюванні часових затримок [7]. У звуколокації нерухомих джерел акустичних хвиль оцінка $\hat{\tau}$ часової затримки між імпульсними сигналами (приблизно однакової форми) визначається за час спостереження від t_1 до $t_1 + t_0$ сигналів із двох мікрофонів $x_1(t), x_2(t)$ при обчисленні максимуму взаємної кореляційної функції $R(\tau)$:

$$\begin{aligned} \hat{\tau} &= \max_{\tau} R(\tau), \\ R(\tau) &= \int_{t_1}^{t_1+t_0} x_1(t) \cdot x_2(t - \tau) dt. \end{aligned} \quad (2)$$

Малі БпЛА випромінюють безперервні звукові сигнали внаслідок роботи гвинтів, двигуна і навіть вібрації корпусу. На датчики надходять сигнали з різними доплерівськими частотами, що швидко міняються під час польоту, залежно від положення цілі й розміщення датчиків у тривимірному просторі. У зв'язку з апіорною невизначеністю відносно доплерівських частот сигналів, що знімаються з виходів просторово рознесених датчиків, виникають істотні труднощі визначення координат цілі у тривимірному просторі. Існуючі акустичні системи неефективні при локації РО, так як не дозволяють визначати його координати в тривимірному просторі.

На сьогоднішній час деякі публікації висвітлюють ряд застосувань із проведенням експериментів, але не представляють закінчених проектів зі звуколокації БпЛА й іншого транспорту, що рухається.

В роботі [9] зазначено, що відношення доплерівських частот g сигналів на m і n мікрофонах, що задається кутами видимості α_m, α_n БпЛА над площиною обрію для кожного мікрофону (рис. 2), швидкостями звуку c й руху БпЛА ν , моментом часу t , визначається виразом:

$$g_{nm} = \frac{c - |\nu| \cdot \cos(\alpha_n(t))}{c - |\nu| \cdot \cos(\alpha_m(t))}. \quad (3)$$

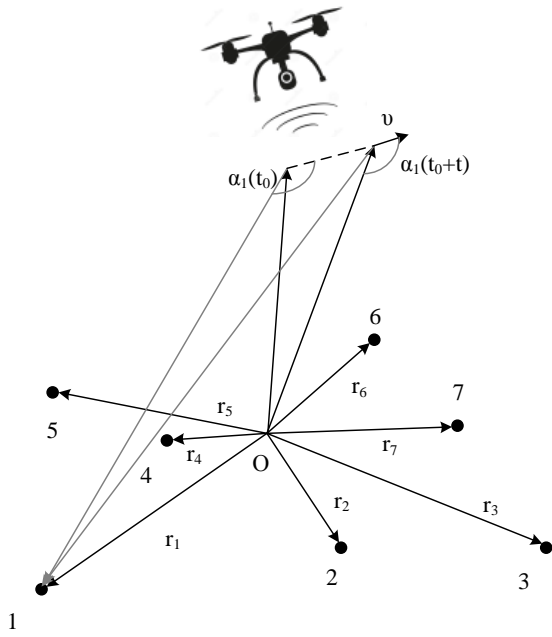


Рис. 2. Виявлення БПЛА (1, 2, . . . 7 – умовні номери датчиків-мікрофонів)

При цьому, тривалість накопичення вибірки за час від t_1 до $t_1 + t_0$ визначається маневреністю та швидкістю БПЛА за умови, що доплерівська частота не повинна суттєво змінитися. Якщо зміна доплерівської частоти (через маневр цілі) має місце, то в процесі накопичення вибірки відбувається декореляція при обчисленні взаємної функції невизначеності сигналів між датчиками. Так як відношення доплерівських частот g невідомо, то необхідно проводити пошук максимуму в площині двох параметрів:

$$\hat{\tau} = \max_{\tau, g} R(\tau, g),$$

$$R(\tau, g) = \sqrt{g} \int_{t_1}^{t_1+t_0} x_1(t) \cdot x_2(g(t - \tau)) dt. \quad (4)$$

Приймається, що відношення доплерівських частот g не змінюється за час спостереження вибірки. Такий підхід розглянутий вітчизняними вченими для пеленгації повітряного транспорту [10].

Зазначимо, що в радіолокації (де сигнал має несучу частоту) часова затримка сигналу з невідомою доплерівською частотою f визначається максимумом модуля виду:

$$\hat{\tau} = \max_{\tau, f} |R(\tau, f)|,$$

$$R(\tau, f) = \int_{t_1}^{t_1+t_0} x_1(t)^* \cdot x_2(t - \tau) e^{j2\pi f t} dt, \quad (5)$$

обчислення якого можливо із застосуванням швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

Відповідно до виразу (4) структурна схема блоку визначення часових затримок і координат цілі може мати вигляд, зображений на рис. 3, де блоком визначаються оцінки часових затримок, що відповідають максимальному значенню R .

Основною відмінністю від існуючих звукометричних систем є визначення часової затримки не за взаємною кореляційною функцією, а за взаємною функцією невизначеності сигналів між датчиками.

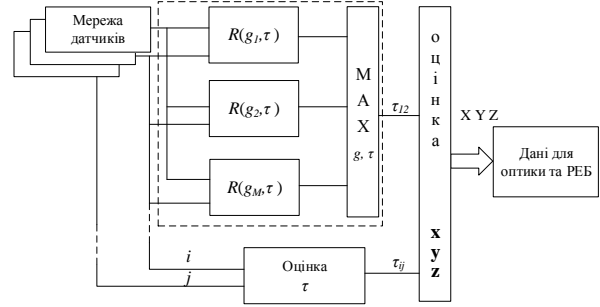


Рис. 3. Структурна схема блоку визначення часових затримок і координат цілі

Аналіз особливостей формування та обробки акустичних сигналів від БПЛА. Для побудови моделей сигналів та алгоритмів їх обробки важливо врахувати таке:

1. Безперервний випадковий процес, що є квазі-стаціонарним на окремих ділянках.
2. В основному сигнал містить кілька гармонік, частоти яких безупинно зміщуються через ефект Доплера при русі БПЛА.
3. Мають місце спотворення сигналів на рознесених мікрофонах, що пов'язано з різними місцевими умовами приймання.

На рис. 4 представлено епюри вибірок вхідних сигналів і їх спектрів з двох мікрофонів (МФ), що рознесені на 20 метрів. Основна енергія сигналів зосереджена на частотах до 1кГц (шум гвинтів), хоча мають місце і гармоніки високих частот, а також шуму двигуна на високих частотах до 8кГц. Деякі відмінності спектрів (у другій гармоніці) обумовлюються різними умовами приймання сигналів у просторово рознесених точках.

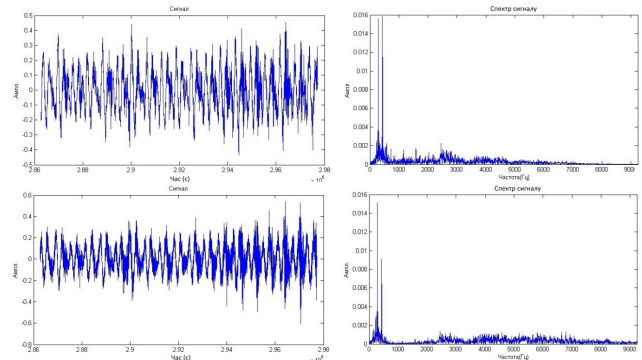


Рис. 4. Епюри вибірок вхідних сигналів та їх спектрів з двох МФ, рознесених на 20 м

Тонка структура вибірок з двох мікрофонів після фільтру високочастотних шумів із частотою зрізу 2,5 кГц наведена на рис. 5, де показана зміна форми сигналів (розширення та зсув спектрів) через відмінність по доплерівській частоті.

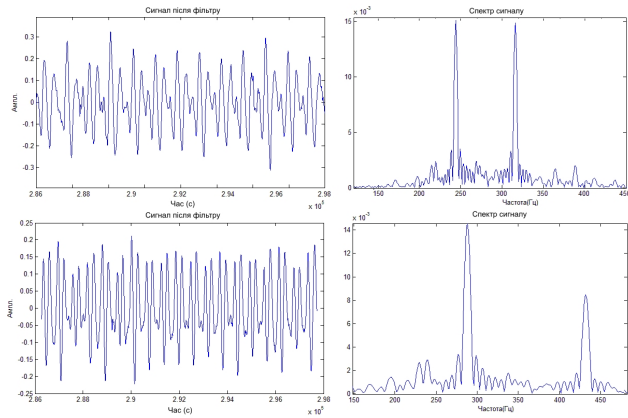


Рис. 5. Вибірки сигналів із двох мікрофонів після фільтру високочастотних шумів

Необхідно визначити крок розміщення каналів по доплерівській частоті, що не приводить до істотної похибки оцінювання часової затримки. Для цього розглянемо сигнали на виході доплерівських каналів, сусідніх максимумів у площині двох параметрів (4).

На рис. 6 наведені епюри трьох перетинів взаємної функції невизначеності (ВФН) за експериментальним даними вибірки розміром $N = 4096$ імпульсів на виході сусідніх доплерівських каналів: без зсуву по частоті на $g = 1 + 1/(2N)$ та $g = 1 + 1/N$.

Результати аналізу дозволяють стверджувати, що неузгодженість за g більш ніж на $1/2N$ приводить до істотного падіння головного піку, зсуву часової затримки, викривленню ВФН і, відповідно, до неможливості оцінювання координат.

З рис. 6 видно, що головний пік ВФН, яку отримано за двома експериментальними вибірками, незначно перевершує навколишні його бічні піки. Це пов'язано зі структурою спектру сигналу, що складається з невеликого числа низькочастотних гармонік, амплітуда яких суттєво впливає на форму ВФН.

Розглянемо вплив шумів на спотворення ВФН. На рис. 7 представлено перетини ВФН $R(\tau)$ у відсутності зсуву доплерівської частоти при відношенні сигнал/шум 10 разів (червона лінія) і сигнал/шум 0,5 рази (синя лінія). Результати аналізу дозволяють стверджувати, що максимум ВФН незначно відрізняється від сусідніх бічних піків.

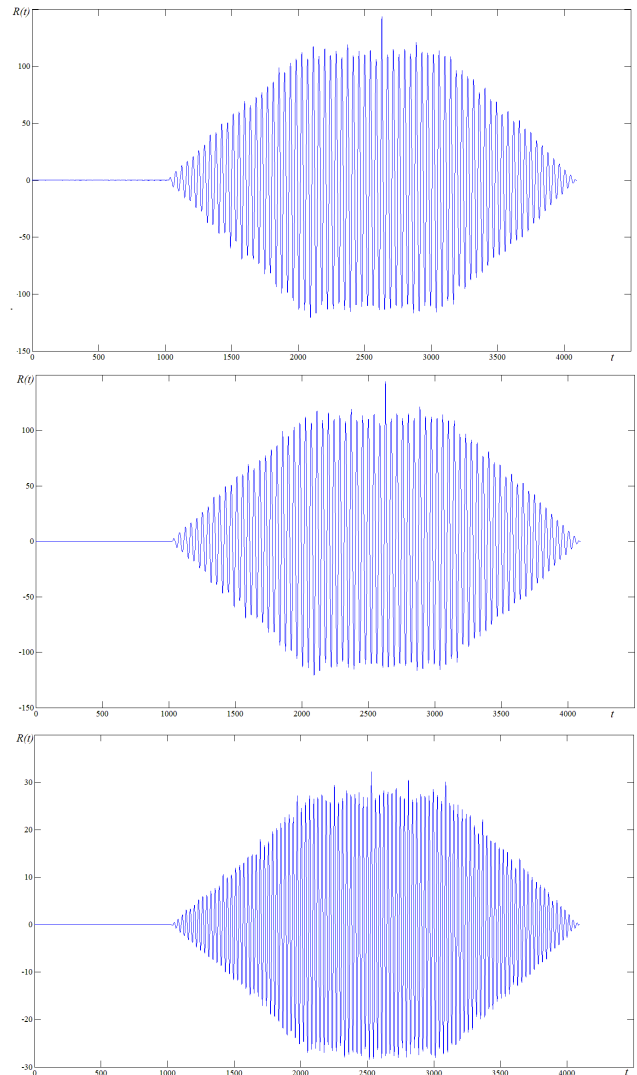


Рис. 6. Епюри трьох перетинів взаємної функції невизначеності

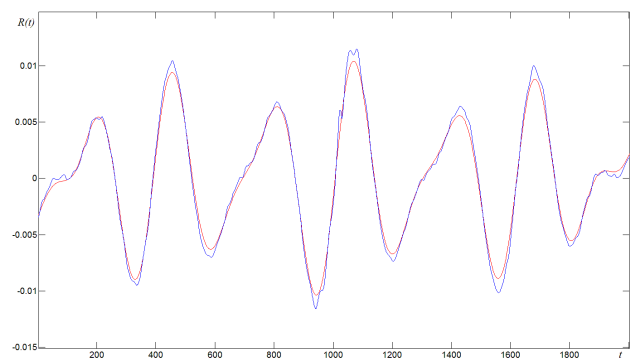


Рис. 7. Перетин ВФН у відсутності зсуву доплерівської частоти

При цьому, в умовах приймання слабкого сигналу вплив шумів суттєво позначається на спотвореннях вершини головного піку. Це може призводити не тільки до збільшення помилки при оцінюванні часової затримки, але й до грубої помилки невідомості через неправильне прийняття бічного піку за головний і, відповідно, виявлення хибної цілі.

Обчислення часої затримки за виразом (4) пов'язане з істотним зростанням обчислювальних витрат, скоротити які важко, тому що відсутні ефективні методи використання ШПФ для ВФН широкопasmового сигналу. Хоча в публікаціях зустрічаються теоретичні можливості використання ШПФ із послідуною редукацією спектру вибірки та скорочення обчислень при пошуку максимуму ВФН, однак при цьому не досліджено вплив погрішностей апроксимації фази, що виникають при стисканні (розширенні) спектру.

Важливо відзначити такий недолік підходу оцінювання координат на основі обчислення ВФН широкопasmового сигналу в багатоцільовій ситуації: неможливо оцінити координати у випадку двох і більше цілей. Так, у випадку двох цілей, поєднання двох безперервних сигналів на кожному вході мікрофонів породжує на виході блоку оцінки часої затримки (схема на рис. 3) суміш із 4-х ВФН із бічними пелюстками, що порівнюються з амплітудами головних піків (рис. 8).

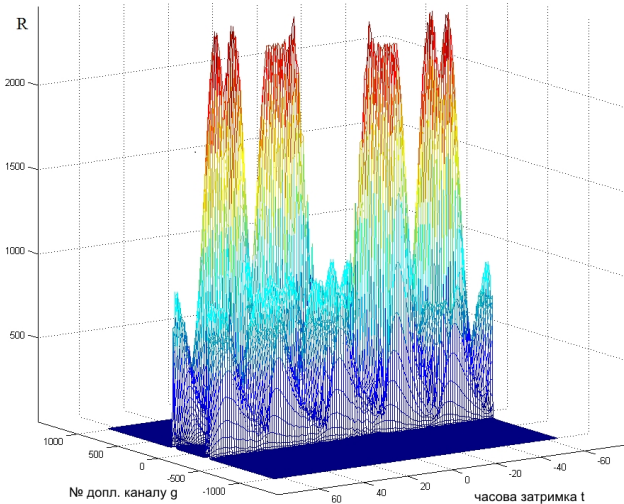


Рис. 8. Суміш із 4-х ВФН із бічними пелюстками

Виникає неоднозначність визначення тимчасових затримок, що породжується множиною таких піків, що в свою чергу не дозволяє достовірно виявити максимуми кожної із ВФН, а потім провести ототожнення піків кожної цілі між каналами оцінювання затримок. У зв'язку із цим, застосування методу ВФН обмежене лише визначенням потенційно досяжних характеристик систем звуколокації для одноцільової ситуації.

Відзначимо також високу обчислювальну складність обробки широкопasmових сигналів у часовій, спектральній та доплерівській областях. Якщо для нерухомих цілей досить обробки в спектрально-часовій області на основі ШПФ, то для рухомих цілей потрібна додаткова багатоканальна обробка в області доплерівських частот. Оскільки число доплерівських каналів порівнянне з розміром вибірки, то обчислювальні витрати суттєво зростають (на кілька порядків). При реалізації зазначеного

алгоритму в реальному часі виникає необхідність підвищення виробничої потужності апаратної частини обчислювачів з метою паралельної обробки даних, що виконуються на основі спецпроцесорів з можливостями паралельної кореляційної обробки, застосування програмних засобів роботи з відеокартами GPU, технологією CUDA і т.п. [11].

У зв'язку із цим, представляється перспективним застосування сукупності квазіоптимальних пеленгаційних алгоритмів на основі методів адаптивних антенних решіток з МІМО [12], з урахуванням вимог до норм систем БпЛА [13]. При цьому виникають додаткові обчислювальні задачі, зокрема, поділу ансамблю оцінок затримок за належністю до цілі, з послідуном їх ототожненням між парами датчиків.

Дамо також оцінку меж зони контролю цілей в 3D-координатах. Для визначення меж зони контролю повітряного простору потрібно визначити спотворення ВФН, що зумовлені шумом і атмосферними завадами. При моделюванні застосовувалося адитивне додавання некорельованого гаусовського шуму в експериментальну вибірку. Епюри вхідних вибірок при співвідношенні сигнал/шум, що дорівнює 3 і 0,5 відповідно, наведені на рис. 9. На рис. 10, 11 наведені візуалізації траєкторії руху БпЛА (в 3D-просторі, полярній системі координат і висотоміра).

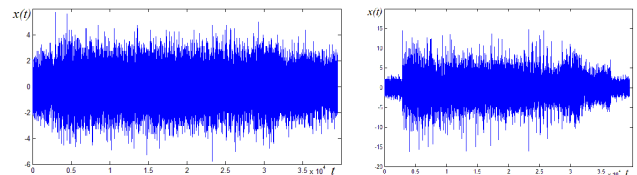


Рис. 9. Епюри вхідних вибірок сигналу

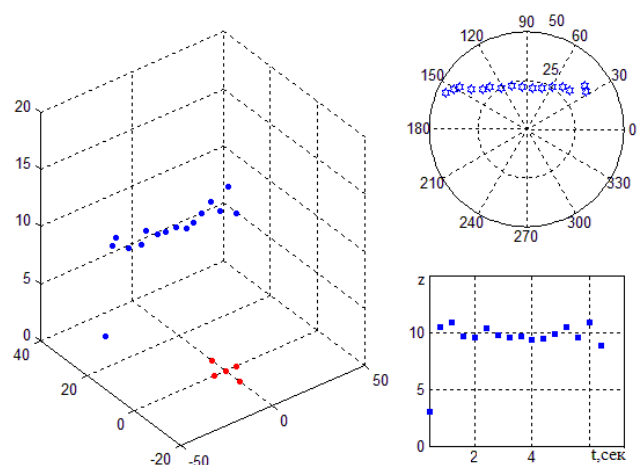


Рис. 10. ВФН і візуалізація траєкторії руху БпЛА в 3D-координатах

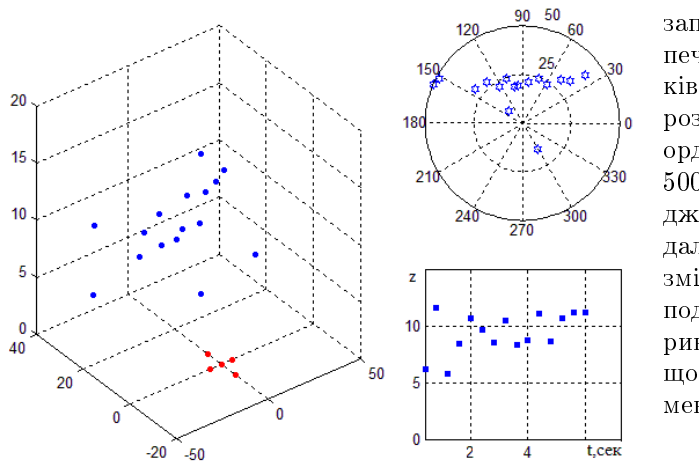


Рис. 11. ВФН і візуалізація траєкторії руху БпЛА в полярній системі координат і висотоміра

Рух цілі проводився зі швидкістю 15 м/с по прямій лінії $X=[-40; 40]$, $Y=20$ метрів від центру решітки датчиків на висоті 10 метрів. Аналіз показав, що при співвідношенні сигнал/шум, що дорівнює 3, величина середньоквадратичного відхилення (СКВ) оцінки визначення координат не перевищує 1 метра. Зі зменшенням співвідношення сигнал/шум менше одиниці, СКВ зростає до 4 метрів і мають місце хибні цілі (через спотворення піків ВФН і, внаслідок цього, переплутування бічного й головного піків), що призводить до істотних похибок визначення координат.

Визначення конкретних розмірів зони контролю від співвідношення сигнал/шум, на нашу думку, складно практично реалізувати через істотну залежність ослаблення сигналу від погодних умов та часу доби. Так як відсутні результати випробувань аналогічних систем при проведенні даного експерименту, то порівняльний аналіз ефективності виявлення БпЛА пропонується проводити із групою учасників експерименту, що не мають дефекту слуху. При цьому враховується факт, що дистанція виявлення сигналу людським вухом середньої чутливості є в кілька разів меншою в порівнянні з дистанцією виявлення сигналу датчиком-мікрофоном. Дослідження проводилися на стенді, який призначений для установки на пересувний транспорт і містить 5 мікрофонів, що розташовані по кутам квадрату та його центру (сторона квадрату становить 3 м). Встановлено, що в денний час доби у відкритому просторі та безвітряну погоду людина чує малий БпЛА з електродвигуном на відстані до 50 метрів, а звуколокаційна система – до 200 метрів. У нічний час доби дальність достовірної локації збільшується в кілька разів.

Для проведення фізичних експериментів розроблено стенд напівнатурного моделювання з можливістю 16-канального запису 12-розрядних сигналів при частоті дискретизації до 44 кГц. Створено програми моделювання систем моніторингу для виявлення й визначення координат цілей на основі

записів фізичних експериментів. Програмне забезпечення призначене для вибору конфігурації датчиків системи залежно від вимог, пропонується до розміру зони контролю й точності визначення координат. Встановлено, що для контрольованої зони 500 м СКВ оцінки визначення координат рухомого джерела звуку може досягати до 10 метрів. Зміна дальності призводить приблизно до пропорційної зміни СКВ оцінки. Практично цього достатньо для подальшого супроводу цілі засобами відеомоніторингу. Похибки у координатах нерухомих джерел, що оцінюються за виразом (1), приблизно в 2 рази менші у порівнянні з рухомими.

Крім малорозмірних та малошумних джерел, таких як БпЛА, досліджувались типові ситуації терористичних загроз, де виникають сигнали від великих літальних апаратів, пострілів снайперів та гармат [4]. Так для моніторингу терористичних атак проведено моделювання багатоцільової ситуації. По об'єкту, що охороняється, наноситься постріл зі зброї великого калібру, потім пролітає вертоліт для висадки десанту, далі десант просувається до об'єкту із застосуванням стрілецької зброї. На рис. 12 представлені результати моделювання системи звуколокації безперервних і імпульсних джерел сигналів, де позначено: червоними лініями та точками – розташування 5 датчиків-мікрофонів; синіми точками – траєкторія руху вертольоту на відстані 90 метрів від датчиків; зеленими – постріли стрілецької зброї; червона зірка – постріл великого калібру.

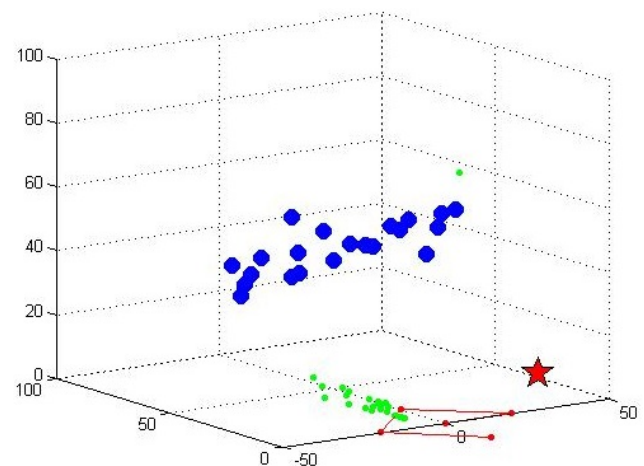


Рис. 12. Моделювання системи звуколокації безперервних і імпульсних джерел сигналів

Із моделюваної траєкторії руху вертольоту можна помітити, що похибка визначення координат габаритного РО з великими гвинтами, що рухається (розподіленого в просторі джерела звуку), може досягати до 10 метрів. Однак, такої точності достатньо для подальшого супроводу цілі засобами відеомоніторингу. Похибки координат нерухомих джерел імпульсних сигналів приблизно у два рази менші. Зелена крапка вгорі праворуч – похибка неоднозначного визначення координат, що пов'язана з

особливостями поєднання сигналів у багатоцільовій ситуації.

Висновки

Проведений у статті аналіз дозволив встановити перспективність розвитку алгоритмів цифрової обробки акустичних сигналів для виявлення РО, зокрема, БПЛА. При цьому запропонований проект має проводитися в наступних напрямках:

1. Розпізнавання класів РО на основі відмінностей у параметрах спектрів.
2. Удосконалення алгоритмів для багатоцільової ситуації.
3. Фільтрація сигналів від неінформативних джерел звукових хвиль.

Для роботи системи звуколокації в реальному часі доцільно розробити програмне забезпечення із застосуванням паралельного програмування, бібліотеки OpenMP, відеокарти з векторною та матричною обробкою даних, GPU NVIDIA на основі технології CUDA. Це дозволить прискорити виконання операцій приблизно в 30 разів та забезпечити реалізацію систем на портативних комп'ютерах.

Результати моделювання системи звуколокації дозволили встановити потенційні можливості визначення БПЛА та інших РО у 3D-координатах з точністю, достатньою для подальшого супроводу цілей засобами візуального спостереження та протидії.

Перелік посилань

1. Даник Ю.Г. Аналіз ефективності виявлення тактичних безпілотних літальних апаратів пасивними та активними засобами спостереження / Ю.Г. Даник, М.В. Бугайов // Збірник наукових праць ЖВІ ДУТ. – 2015. – Вип. 10. – С. 5-20.
2. Самохин В. Ф. Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевым двигателем в толкающей компоновке / В. Ф. Самохин, С. П. Остроухов, П. А. Мошков // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2013. – Вып. №70. – С. 1-24.
3. Sinibaldi G. Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV / G. Sinibaldi, L. Marino // Applied Acoustics. 2013. – Vol. 74, Iss. 1. – pp. 79-88.
4. Українське РАЗК «Положення-2» — електронні «вуха» для артилеристів. – Режим доступу: <http://uprom.info/news/ukrayinski-elektronni-vuha-dlya-artileristiv/>
5. Корольов Р.В. Аналіз сучасних засобів знищення безпілотних літальних апаратів / Р.В. Корольов, Н.О. Корольок, О.В. Петров, К.В. Сюлев // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. — 2017. — № 4(53). — с. 17-21.
6. Кирсанов Э.А. Обработка информации в пространственно-распределенных системах радиомониторинга. Статистический и нейросетевой подходы / Э.А. Кирсанов, А.А. Сирота. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 344 с.

7. Лантвойт О.Б. Аналіз методів і розробка нового технічного рішення визначення місцеположення об'єкта пасивними засобами локації / О.Б. Лантвойт, М.І. Лисий, І.М. Плосконос // Системи озброєння та військова техніка. – 2010. – Вип. 1 (21). – С. 170-174.
8. Гурман І.В. Розробка методу зменшення неоднозначності визначення координат наземних об'єктів трипозиційною пасивною системою радіотехнічного контролю / І.В. Гурман, М.І. Лисий, В.В. Орлов // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2013. – № 52. – С. 23-29.
9. Martín S. R. Aircraft localization using a passive acoustic method. Experimental test / S. R. Martín et al. // Aerospace Science and Technology. – 2016. – Vol. 48. – p. 246-253.
10. Saratsyn R. Determination of aircraft current location on the basis of its acoustic noise / R. Saratsyn, F. Yanovsky, E. Chervoniak, O. Zaporozhets // Telecommunications and Radioengineering. – 2015. – Vol. 74 (5). – p. 397-408.
11. Gembris D. Correlation analysis on GPU systems using NVIDIA's CUDA / D. Gembris, M. Neeb, M. Gipp, A. Kugel, R. Ma"nner // Journal of Real-Time Image Processing. – 2011. – Vol. 6, No 4. – p. 275-280.
12. Yamamoto M. Localization of multiple environmental sound sources by music method with weighted histogram / M. Yamamoto, Yo. Tatekura // Inter-noise 2014. – p. 1-9.
13. STANAG 4671 Ed: 1. UAV SYSTEM AIRWORTHINESS REQUIREMENTS (USAR). URL: http://www.dror-aero.com/link/usar_edition_1.pdf

References

- [1] Danyk Yu.H. and Buhaiov M.V. (2015) Analysis of the effectiveness of tactical unmanned aerial vehicles detection by passive and active means of observation. *Problemy stvorennia, vyprovuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system*, Iss. 10, pp. 5-20.
- [2] Samokhin V. F., Ostrouhov S. P. and Moshkov P. A. (2013) Experimental Research of Pilotless Vehicle Noise Sources with a Pusher Ducted Propeller. *Trudy MAI*, 2013, No 70, pp. 1-24.
- [3] Sinibaldi G. and Marino L. (2013) Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV. *Applied Acoustics*, Vol. 74, Iss. 1, pp. 79-88. DOI: 10.1016/j.apacoust.2012.06.011
- [4] Ukrainian reconnaissance automated sound ranging system «Polozhennia-2» – electronic “ears” for artillerists. Available at: <https://uprom.info/news/ukrayinski-elektronni-vuha-dlya-artileristiv/>
- [5] Korolev R. , Koroluk N., Petrov O. and Sulev K. (2017) Analysis of modern means of destruction of unbeiled flying apparatuses, *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho universytetu Povitrianykh Syl*, No 4 (53), pp. 17-21.
- [6] Kirsanov E.A. and Sirota A.A. (2012) *Obrabotka informatsii v prostranstvenno-raspredeleennykh sistemakh radiomonitoringa. Statisticheski i neirosetevoi podkhody* [Information processing in spatially distributed radio monitoring systems. Statistical and neural network approaches], Moscow, Fizmatlit, 344 p.

- [7] Lantvoit O.B., Lysyi M.I. and Ploskonos I.M. (2010) The analysis of methods and development of the new technical decision of definition of a site of object by passive means of a location, *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, No 1 (21), pp. 170-174.
- [8] Gurman I. V., Lysyu N. I. and Orlov V. V. (2013) Development of ambiguity reducing method for determining of the ground objects coordinates by three-position passive radiocontrol system, *Visnyk NTUU KPI Seria – Radiotekhnika Radioaparatobuduvannia*, Iss. 52, pp. 74-83. doi: 10.20535/RADAP.2013.52.74-83.
- [9] Martín S.R., Genescà M., Romeu J. and Clot A. (2016) Aircraft localization using a passive acoustic method. Experimental test. *Aerospace Science and Technology*, Vol. 48, pp. 246-253. DOI: 10.1016/j.ast.2015.11.023
- [10] Sinitsyn R.B., Yanovsky F.J., Chervoniak E. and Zaporozhets O. (2015) Determination of aircraft current location on the basis of its acoustic noise. *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 74, Iss. 5, pp. 397-408. DOI: 10.1615/telecomradeng.v74.i5.30
- [11] Gembris D., Neeb M., Gipp M., Kugel A. and Männer R. (2011) Correlation analysis on GPU systems using NVIDIA's CUDA. *Journal of Real-Time Image Processing*, Vol. 6, Iss. 4, pp. 275-280. DOI: 10.1007/s11554-010-0162-9
- [12] Yamamoto M. and Tatekura Yo. (2014) Localization of multiple environmental sound sources by music method with weighted histogram. *Inter-noise 2014*, p. 1-9.
- [13] STANAG 4671 Ed: 1. UAV SYSTEM AIRWORTHINESS REQUIREMENTS (USAR) (Requirements to airworthiness systems of unmanned aerial vehicles). URL: http://www.dror-aero.com/link/usar_edition_1.pdf

Исследование возможностей звуколокации БпЛА в задачах мониторинга террористических угроз

*Орлов В. В., Лысий Н. И., Сивак В. А.,
Куприенко Д. А., Кульчицкий В. М.,
Добровольский А. Б.*

Статья посвящена исследованию систем звуколокации беспилотных летательных аппаратов для мониторинга террористических угроз, которые являются защищенными от средств радиоэлектронной борьбы. В работе предложена звуколокационная система выявления подвижных объектов, которая построена с помощью датчиков, что размещены в пространстве. Основным отличием от существующих звуколокационных систем является определение временной задержки не за взаимной корреляционной функцией, а за взаимной функцией неопределенности сигналов между датчиками. Однако применение метода взаимной функции неопределенности ограничено лишь определением характеристик для одноцелевой ситуации, то есть невозможно оценить координаты в случае двух целей, и соответственно, в многоцелевой ситуации, при атаке большого количества беспилотных летательных аппаратов. Также существует вычислительная сложность обработки широкополосных сигналов во временной, спектральной и доплеровской областях. Если для неподвижных целей достаточно

обработки в спектрально-временной области на основе быстрого преобразования Фурье, то для движущихся целей нужна дополнительная многоканальная обработка в области доплеровских частот. Так как число доплеровских каналов сравнимо с размером выборки, то вычислительные затраты существенно возрастают, на несколько порядков, поэтому для работы системы звуколокации в реальном времени целесообразна разработка программного обеспечения с применением параллельного программирования, библиотеки Openmp, видеокарты с векторной и матричной обработкой данных, GPU NVIDIA на основе технологии CUDA. Это позволит ускорить выполнение операций приблизительно в 30 раз и обеспечить реализацию систем на портативных компьютерах. Проведенный анализ системы звуколокации показал потенциальные возможности определения координат беспилотных летательных аппаратов и других подвижных объектов в трехмерном пространстве с точностью, достаточной для дальнейшего сопровождения целей средствами визуального наблюдения.

Ключевые слова: подвижный объект; беспилотный летательный аппарат; звуколокация; временная задержка; доплеровская частота; быстрое преобразование Фурье

Study of capabilities of unmanned aerial vehicle sound location in the tasks of the monitoring of terroristic threats

*Orlov V. V., Lysyi M. I., Sivak V. A., Kuprienko D. A.,
Kulchytskyi V. M., Dobrovolskyi A. B.*

Introduction. The article is devoted to the research of sound location systems of unmanned aerial vehicles that are protected from means of radio electronic warfare for monitoring the terrorist threats. In the work the sound location system is proposed for detection of moving objects that is made with the help of a sensors network placed in space.

Research results. The main difference from the existing sound location systems is the determination of the time delay not by the mutual correlation function, but by the mutual function of the signals uncertainty between the sensors. However, the application of the method of the mutual function of uncertainty is limited only to the definition of characteristics for the one-purpose situation, it means it is impossible to estimate the coordinates in case of two targets, and accordingly, in the multi-purpose situation, during the attack of a large number of unmanned aerial vehicles. Also, there is a computational complexity of processing the broadband signals in time, spectral and Doppler spheres. If for fixed targets it's sufficient to process in the spectral-time sphere on the basis of a fast Fourier transform, then for mobile targets, additional multichannel processing of the Doppler frequencies is required. Since the number of Doppler channels is comparable to the size of the sample, that's why the computing costs increase substantially in several times, so for real-time sound system operation it is expedient to develop software with parallel programming, Openmp library, graphics card with vector

and matrix data processing, GPU NVIDIA based on CUDA technology. This will accelerate the execution of operations approximately by 30 times and ensure the implementation of systems on laptops.

Conclusions. The conducted analysis of the sound location system showed the potential possibilities of determining the coordinates of unmanned aerial vehicles

and other moving objects in a three-dimensional space with an accuracy that is sufficient for further support of the targets by means of visual observation.

Key words: moving object; unmanned aerial vehicle; sound location; time delay; Doppler frequency; fast Fourier transform