

*В.М. ОЛЕЙНИКОВ, канд. техн. наук, В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук,
С.О. ШЕЙКО, канд. техн. наук, О.В. ЗУБКОВ, канд. техн. наук, О.І. ОЛЕЙНИКОВА*

ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ ПОЛОЖЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЗА АКУСТИЧНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

Вступ

Області застосування малорозмірних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) постійно розширюються. Використання малорозмірних БПЛА стало серйозним проривом у сфері технічних досягнень останнього десятиліття. На сьогоднішній день вони широко використовуються в різних галузях діяльності людини: моніторинг, інспекція, спостереження, логістика, транспортування, розвідка та картографування, телекомунікації тощо. Універсальність застосування та простота використання призводять до можливості несанкціонованого застосування БПЛА у районах розташування об'єктів критичної інфраструктури. Висока маневреність, невеликі габарити, мала помітність БПЛА породжують проблему їхнього оперативного виявлення. Особливе місце займає повсюдне застосування БПЛА у військовій сфері: це розвідка, спостереження, цілевказівка. Захист критичних інфраструктур та військових об'єктів від таких загроз обумовила необхідність розробки систем виявлення, розпізнавання та локалізації малорозмірних БПЛА. Для вирішення зазначених проблем широкого розповсюдження набули радіолокаційні, оптикоелектронні та акустичні методи.

Радіолокаційний метод [1 – 3] забезпечує необхідну дальність дії, дозволяє визначити координати та здійснювати траєкторні вимірювання, проводити ідентифікацію цілі по сигнатурі радіолокаційного сигналу. Стан навколишнього середовища не істотно впливає на дальність виявлення цілі та інші характеристики станцій. Малі геометричні розміри і відповідно низька радіолокаційна помітність БПЛА обмежують ефективність цього методу. Основний недолік методу – відсутність скритності спостереження.

Пасивні оптичні та інфрачервоні методи [4 – 6] забезпечують скритність вимірювань, можливість розпізнавання об'єктів за аналізом їх зображень, можливість вимірювання відстаней до віддалених об'єктів або об'єктів з малим коефіцієнтом віддзеркалення. Оптичні та інфрачервоні камери спостереження не працюють у складних метеорологічних умовах. Застосування інфрачервоного методу обмежено низьким тепловим випромінюванням БПЛА.

Акустичний метод [7 – 9], незважаючи на відносно невисоку дальність дії, дозволяє визначити просторові координати БПЛА за його акустичним випромінюванням, забезпечувати ідентифікацію БПЛА шляхом формування акустичних сигнатур на основі частотно-часового аналізу звукових сигналів. Відносно невелика дальність виявлення БПЛА для цього методу компенсується пасивним режимом роботи, можливістю локалізації БПЛА, що знаходиться на гранично малих висотах і дальностях. Максимальна дальність виявлення та локалізації БПЛА залежить від швидкості польоту, ракурсу, характеристик діаграми спрямованості акустичного випромінювання, рівня фонового шуму, погодних умов, параметрів системи прийому та обробки акустичних сигналів. Для вирішення проблеми місцезнаходження малорозмірних та низькошвидкісних БПЛА на відносно невеликих дистанціях найбільш ефективним вважається акустичний метод.

Особливості акустичного випромінювання БПЛА

Для розробки алгоритмів визначення місцезнаходження БПЛА необхідно знати особливості формування його акустичного поля та характеристики акустичного випромінювання. Аналіз спектральної щільності потужності (СЩП) акустичного випромінювання різних моделей малорозмірних БПЛА, рис.1, показав наявність вузькосмугових тональних та широкосмугових шумоподібних складових з переважним випромінюванням повітряного гвинта [10 – 13, 14].

При обертанні гвинта виникають коливання тиску повітря, що відбуваються за рахунок витіснення повітря, об'єм якого дорівнює об'єму лопаті гвинта. Це призводить до появи шуму витіснення. Частота проходження лопатей повітряного гвинта дорівнює частоті обертання ротора, помноженої на число лопатей. Спектр шуму гвинта має гармонійні складові частоти обертання ротора і гармоніки лопатевої частоти. Дискретні складові спектру акустичного випромінювання (АВ), пов'язані з шумом обертання та взаємодії, як правило, мають на 15 – 20 дБ вищі рівні, ніж широкосмуговий шум обтікання лопаті. Частота проходження лопатей АВ БПЛА знаходиться в межах від 80 до 250 Гц. Кількість гармонік лопатевої частоти – від 10 до 40. Зі збільшенням відстані до БПЛА, внаслідок поглинання звуку атмосфері, високо-частотні гармоніки істотно послаблюються рівня фонового шуму. У процесі польоту БПЛА спектральні лінії акустичного випромінювання розширюються, оскільки контролер БПЛА постійно регулює швидкість кожного двигуна для балансування БПЛА та підтримки стабільного польоту, рис. 1. Більш детально процес регулювання швидкості двигунів, що супроводжується зміною спектра АВ, видно на спектрограмі рис. 2.

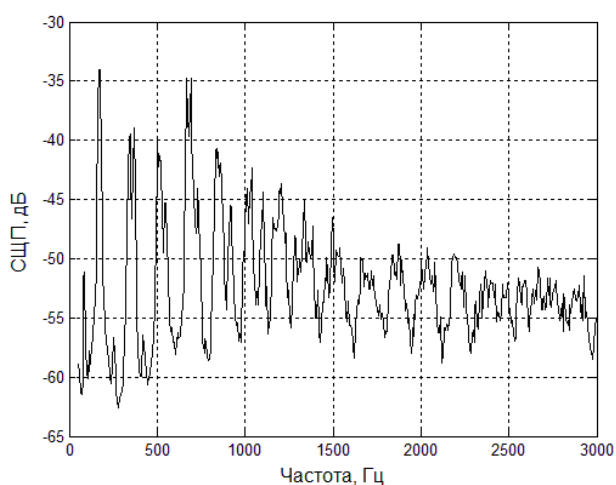


Рис. 1. Спектральні складові АВ квадрокоптера DJI Phantom 3 у процесі польоту

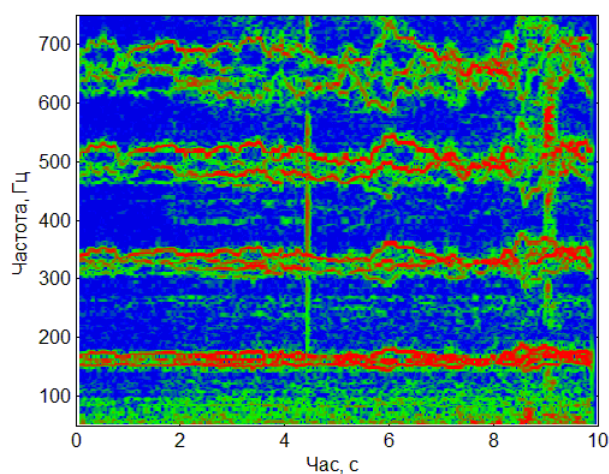


Рис. 2. Спектрограма складових АВ квадрокоптера DJI Phantom 3 у процесі польоту

Характеристика спрямованості АВ БПЛА визначає розподіл випромінюваної акустичної енергії у просторі. На рис. 3 представлено переріз 3D характеристики спрямованості сумарного АВ гвинтомоторної групи квадрокоптера DJI Phantom 3 та характеристики спрямованості АВ його електродвигунів. АВ гвинтомоторної групи має виражену просторову спрямованість, основне випромінювання відбувається у верхню півсферу. З підвищенням номера гармоніки АВ спостерігається ускладнення форми характеристики спрямованості – вона стає більш порізаною, з великою глибиною провалів, ширина пелюсток зменшується, відбувається зміна напрямку основного випромінювання [14].

Характеристика спрямованості АВ електродвигунів БПЛА суттєво відрізняється від характеристики спрямованості випромінювання гвинтомоторної групи, оскільки має іншу природу формування акустичного сигналу. При зміні ракурсу спостереження БПЛА відбувається зміна рівнів спектральних складових акустичного випромінювання у відповідності з характеристикою спрямованості відповідної гармоніки. Це призводить до зміни рівня акустичного сигналу та модифікації спектру АВ, а також впливає на максимальну дальність виявлення та локалізації БПЛА.

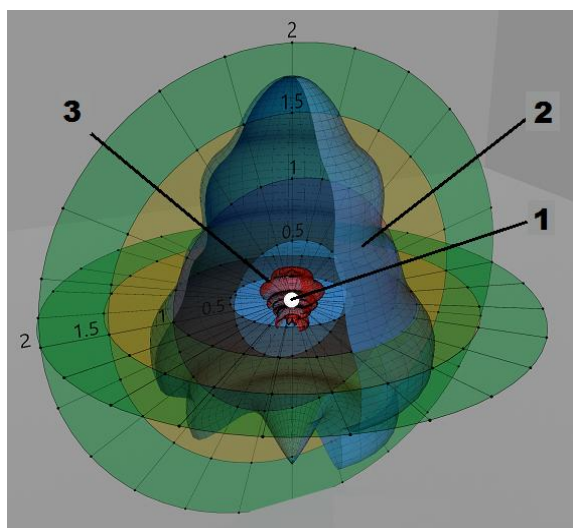


Рис. 3. Переріз 3D характеристики спрямованості АІ БПЛА DJI Phantom 3: 1 – місцезнаходження БПЛА; 2 – сумарна характеристика спрямованості АВ гвинтомоторної групи квадрокоптера DJI Phantom 2; 3 – характеристики спрямованості АВ електродвигунів

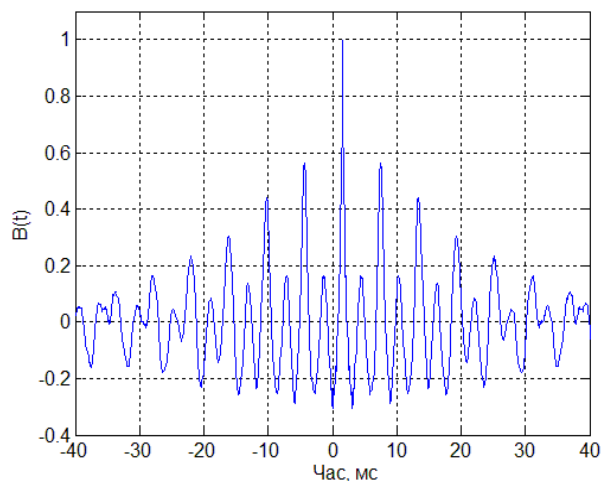


Рис. 4. ВКФ акустичних сигналів БПЛА

Акустичний сигнал гвинтомоторної групи БПЛА відноситься до класу широкосмугових сигналів, що не дозволяє використовувати фазові методи вимірювання кутових координат. З теорії сигналів відомо, що ширина інтервалу кореляції $\Delta\tau$ обернено пропорційна ширині спектра сигналу Δf_c :

$$\Delta\tau = \frac{1}{\Delta f_c}.$$

Застосування кореляційної обробки широкосмугових сигналів АІ БПЛА забезпечує отримання вузької основної пелюстки взаємної кореляційної функції (ВКФ), рис. 4, що дозволяє реалізувати високу точність просторового дозволу акустичної системи визначення місцезнаходження.

Пасивні методи визначення місцезнаходження БПЛА з акустичного випромінювання

При визначенні кутових координат джерел акустичного випромінювання (ДАВ) знаходять напрямок, що відповідає напрямку нормалі до фронту хвилі, випромінюваної акустичним джерелом. Застосовуючи метод триангуляції [15], за наявності кількох незалежних вимірів, можна визначити місце розташування ДАВ.

Для визначення координат джерел акустичного випромінювання широке застосування знаходять методи з використанням мікрофонних решіток (МР) [16], які поділяються на класичні методи, методи надроздільності та метод різниці часу приходу (TDOA – time difference of arrival).

Класичний метод обробки полягає у введенні в оброблюваний сигнал відносних часових затримок та підсумовуванні (метод Бартлетта). При скануванні необхідного кутового сектора знаходиться напрямок з найбільшою потужністю, що відповідає оцінці напрямку приходу корисного сигналу. У цьому випадку просторовий спектр формується з використанням наступного виразу:

$$P(\theta) = \frac{S(\theta)R_{xx}S^T(\theta)}{S(\theta)S^T(\theta)},$$

де $S(\theta)$ – вектор відгуку антеної решітки; R_{xx} – просторова кореляційна матриця розміром N на N елементів.

Можливості використання класичних методів для пеленгування БПЛА щодо їх акустичного випромінювання значною мірою обмежені тим, що пеленгування можливе за наявності в діаграмі спрямованості системи лише одного ДАВ. Присутність у діаграмі спрямованості декількох ДАВ призводить до появи аномальних помилок при оцінці пеленгу, оскільки амплітудно-фазовий розподіл акустичного поля буде суперпозицією декількох хвиль. У силу малих розмірів апертури антеної системи розділення ДАВ в цьому випадку виявляється скрутним.

Методи надроздільності задач пеленгування включають велику групу алгоритмів [16]: алгоритми лінійного передбачення; алгоритми Кейпону, засновані на розкладанні просторової кореляційної матриці за власними векторами; метод MUSIC, EV; алгоритми, засновані на поділі сигнального та шумового просторів – ROOT-MUSIC та ESPRIT та ін.

Для алгоритму Кейпона просторовий спектр розраховується відповідно до виразу

$$P(\theta) = \frac{1}{S(\theta)R_{xx}^{-1}S^T(\theta)}.$$

Оцінкою істинного напрямку приходу сигналу є кут, який відповідає піковому значенню спектра. У порівнянні з класичним, метод Кейпона, що характеризується в більшості випадків більш високою роздільною здатністю, вимагає лише додаткового обернення матриці.

Метод різниці часу приходу або різницево-дальномірний метод (РДМ) забезпечує вимірювання кутових координат та дальності до джерела випромінювання. Для реалізації РДМ визначення просторових координат використовуються не менше чотирьох мікрофонів, що дозволяють отримати три незалежні різниці часу приходу до джерела випромінювання.

За певної різниці часу приходу до окремих мікрофонів акустичного сигналу можна визначити кутове положення джерела випромінювання. Вимірювання різниці часу приходу до окремих мікрофонів МР проводиться шляхом обчислення положення максимуму ВКФ сигналів на часовій осі, що приймаються відповідними мікрофонами. Обчислення ВКФ акустичних сигналів БПЛА, отриманих з мікрофонів МР, виконується за формулою:

$$r_{ij}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T S_i(t)S_j(t+\tau)dt,$$

де $S_i(t)$, $S_j(t)$ – смугові акустичні сигнали на вході i -го та j -го мікрофонів; T – час аналізу.

ВКФ головної пелюстки акустичних сигналів БПЛА, отриманих з мікрофонів МР рис. 4, має вигляд близький до δ -функції. Це дозволяє при великих співвідношеннях сигнал/шум визначати величину зсуву часу приходу акустичного широкосмугового сигналу між мікрофонами МР з точністю до кроку дискретизації сигналів.

При відомій відстані d між i -м та j -ми мікрофонами та затримки часу приходу τ , можна визначити кутове положення джерела випромінювання:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{c_{зв}\tau}{d}\right),$$

де $c_{зв}$ – швидкість поширення звуку.

Для кожної пари мікрофонів вимірювальної бази існує поверхня положення, що визначається як геометричне місце точок, різниця відстаней яких до фокусів (точки в яких розта-

шовані мікрофони) є постійна величина. Поверхня положення для РДМ – гіперболоїд обертання. За наявності трьох пар мікрофонів оцінка розташування джерела сигналу визначається як точка перетину трьох відповідних поверхонь положення.

Різницево-дальномірний метод через можливість застосування завадостійких кореляційних алгоритмів вимірювання часових затримок сигналів має суттєві переваги перед іншими методами.

У розглянутих методах використовується різна кількість мікрофонів та різні конфігурації МР. Кількість мікрофонів, що використовуються для реалізації методів формування променя, значно більша, ніж у методі TDOA, оскільки збільшення числа мікрофонів має домінуючий вплив на точність локалізації ДАВ.

Експериментальна оцінка ефективності розглянутих алгоритмів пеленгування БПЛА [17] у відкритому просторі показують хорошу відповідність заданим значенням пеленгу. Слід зазначити, що з використанням методів Бартлетта і Кейпона істотно зростає дисперсія оцінок пеленгу при азимутах понад 60° . Для методу TDOA дисперсія оцінок пеленгу значно менше, ніж для методів Бартлетта і Кейпона. Результати визначення пеленгу джерела акустичного випромінювання у широкій смузі частот у відкритому просторі показують хорошу відповідність заданим значенням пеленгу при застосуванні методу TDOA.

Розглянемо приклади реалізації пасивних систем для визначення об'єктів у повітряному середовищі з акустичного випромінювання гвинтомоторної групи БПЛА.

У роботі [18] розглядається мікрофонна решітка із чотирьох мікрофонів, розташованих у вершинах тетраедра. Таке розташування мікрофонів дозволило отримати просторову вибірковість при пеленгації БПЛА. Характеристика спрямованості формується шляхом затримки та підсумовування сигналів, прийнятих мікрофонами решітки. Застосування фільтра Вінера на виході формувача характеристики спрямованості дозволило підвищити співвідношення сигнал/завада. Цикл обробки сигналу у смузі 80 – 2000 Гц становив 4 с. За цими даними, з використанням адаптивного фільтра Калмана, проводилася побудова траєкторії руху БПЛА. Максимальна відстань виявлення для БПЛА становила 600 м з ймовірністю 99 % та вірогідністю помилкової тривоги 3 %.

В акустичну систему для відстеження розташування БПЛА університету Чжецзян (Ханчжоу, Китай) [19] входить дві мікрофонні решітки (МР) у формі тетраедра та пристрій обробки сигналів та підготовки даних для реалізації алгоритмів локалізації та відстеження розташування БПЛА. МР складається з чотирьох мікрофонів, розміщених у вершинах тетраедра. Відстань між кожним мікрофоном решітки та центром нижньої грані тетраедра – 1 м, відстань між центрами двох МР – 14 м.

Всі мікрофони мають вітрозахист, захист від впливу гідрометеорів і для ослаблення ефекту багатопроменевості розташовуються над звукопоглинаючим матеріалом. Метод отримання координат БПЛА – різницево-дальномірний. Під час обробки траєкторних даних використовується фільтр Калмана.

Для перевірки ефективності алгоритму оцінки розташування БПЛА використовуються дані GPS трекінгу. На рис. 5 представлено порівняльні оцінки розташування БПЛА за даними GPS та акустичних вимірювань. На рис. 6 представлені оцінки помилки місцезнаходження БПЛА у тестовому польоті, з яких видно, що більш ніж у 95 % помилки оцінки розташування на дистанції до 100 м нижче 6 м та у 80 % оцінки помилки розташування знаходяться в межах 2 м.

У Технологічному інституті Стівенса розроблено систему акустичного спостереження DADS [20], яка призначена для відстеження розташування та ідентифікації БПЛА з акустичного випромінювання. Система спостереження складається з трьох мікрофонних решіток, розташованих по периметру контрольованого об'єкта. Мікрофонні датчики в мікрофонних решітках розташовані у вершинах тетраедра. Дані з кожної решітки передаються каналом Wi-Fi на систему обробки.

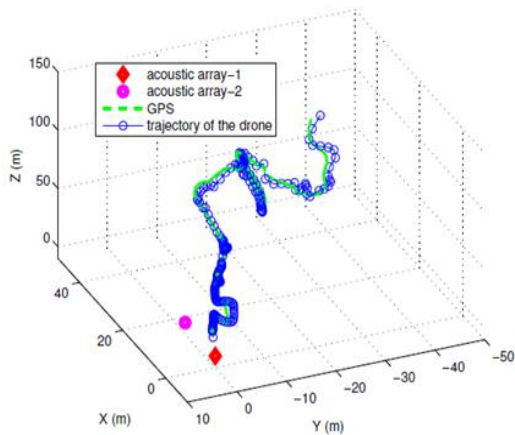


Рис. 5. Порівняльні оцінки розташування БПЛА за даними GPS та за результатами акустичних вимірювань [19]

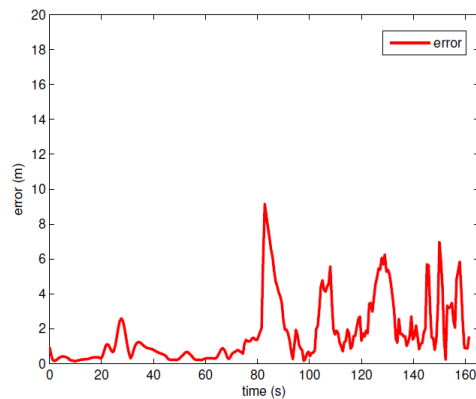


Рис. 6. Оцінки помилки визначення БПЛА в тестовому польоті [19]

Огляд простору ведеться на основі алгоритму, що базується на розрахунку значення взаємної кореляційної функції акустичних сигналів, прийнятих окремими мікрофонними датчиками мікрофонних решіток та їх подальшою обробкою.

Підвищення точності вимірювання різниці моментів часу приходу сигналу досягається збільшенням відношення сигнал/шум сигналу, що приймається за рахунок застосування мікрофонних датчиків. Мікрофонний датчик [20, 21] складається з M електретних мікрофонних капсулів ($M=16$). Масив електретних капсулів забезпечує більш високу чутливість, ніж використання одиночного мікрофона. Використання таких мікрофонних датчиків покращує відношення сигнал/шум порівняно з одиночним мікрофоном з коефіцієнтом M .

Калібрування орієнтації системи DADS виконується шляхом випромінювання білого шуму з динаміка з відомою позицією GPS, а потім проводиться корекція орієнтації системи DADS на основі різниці між виявленим напрямком та напрямком, розрахованим за даними GPS розташування БПЛА.

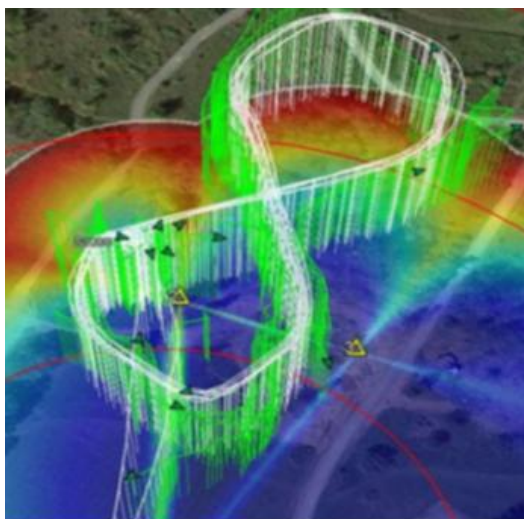
Експериментальні дослідження проводилися з різними конфігураціями системи DADS та кількома типами БПЛА у різних умовах довкілля. Так, визначення розташування БПЛА Inspire 2 проводилося триангуляційним методом із застосуванням двох мікрофонних решіток, рознесених на відстань 60 м, рис. 7.

Результат виміру відображається у вигляді 3D треку спільно з даними GPS, розміщеного на БПЛА. Максимальна дальність місцезнаходження БПЛА становила 250 м при рівні акустичних завад 45 – 50 дБА.

Максимальна відстань виявлення була досягнута в момент знаходження БПЛА на нормалях до акустичних баз (сторін трикутника) і становила 200 м з достовірністю 50 % і 100 м з достовірністю 100 % [20].

Методи локалізації акустичних сигналів засновані на використанні обмеженої кількості мікрофонів та алгоритмі оцінки напрямку приходу акустичних сигналів TDOA, не дозволяють однозначно локалізувати декілька одночасно присутніх БПЛА. Ця проблема вирішується за рахунок використання великих мікрофонних решіток, що збільшує можливості виділення акустичного сигналу з певного напрямку. Це досягається використанням алгоритмів надроздільності сигналів, що дозволяє однозначно визначити місце розташування одного або декількох БПЛА як у двох, так і в трьох вимірах.

Перспективною технологією локалізації акустичного випромінювання БПЛА є поєднання акустичних та оптичних методів, що реалізована в акустичних камерах. Акустичні камери – технічні пристрої, що дозволяють визначити положення джерел акустичних коливань із накладенням оптичного зображення колірної карти інтенсивності акустичного сигналу.



Прогнозована ймовірність відстеження
0.5 1.0

Рис. 7. Схема розгортання 3 вузлів супроводу, прогнозована ймовірність супроводу маневруючого БПЛА з використанням декількох вузлів, біла лінія-GPS трек, зелена лінія – акустичний трек, жовті трикутники – розташування вузлів [20]

ків акустичної камери Distran Omni 360. Камера складається з мікрофонних решіток з 120 елементів, розташованих на акустично прозорій сферичній поверхні. Для отримання оптичного зображення використовується ширококутна камера, яка розміщена в центрі мікрофонної решітки. Це дозволяє після обробки акустичних сигналів отримати акустичне зображення поверхні відображення, накладене на оптичне зображення досліджуваного об'єкта.

Особливість цієї акустичної камери і те, що на відміну планарних акустичних камер, вона здатна створювати повністю сферичні акустичні зображення, тобто можна відстежувати



Рис. 8. Образ акустичних сигналів, накладений на оптичне зображення квадрокоптера Parrot AR Drone 2.0 [23]

Використовуваний метод зветься методом бімформінгу. Метод бімформінгу є способом обробки сигналів мікрофонної решітки з метою визначення просторового розподілу джерел акустичного сигналу. Основна ідея методу [22] полягає в когерентному підсумовуванні акустичних сигналів мікрофонів мікрофонної решітки для збільшення рівня сигналу, що випромінюється з фокусної точки, та мінімізації вкладів сигналів з усіх інших точок, розташованих на площині відображення. У найпростішому випадку методу бімформінгу сигнали мікрофонів складаються із затримкою часу, величина затримки залежить від положення точки фокусування та положення мікрофонів. Для цього заздалегідь розраховуються затримки сигналів від кожного вузла сітки площини відображення до кожного мікрофона МР. Сформований акустичний промінь послідовно проходить всі вузли сітки, при цьому для фокусування на відповідний вузол використовуються розраховані затримки сигналів.

У роботі [23] для виявлення та локалізації БПЛА використовується масив акустичних датчи-

ків акустичної камери Distran Omni 360. Камера складається з мікрофонних решіток з 120 елементів, розташованих на акустично прозорій сферичній поверхні. Для отримання оптичного зображення використовується ширококутна камера, яка розміщена в центрі мікрофонної решітки. Це дозволяє після обробки акустичних сигналів отримати акустичне зображення поверхні відображення, накладене на оптичне зображення досліджуваного об'єкта. Особливість цієї акустичної камери і те, що на відміну планарних акустичних камер, вона здатна створювати повністю сферичні акустичні зображення, тобто можна відстежувати джерела звуку у будь-якому напрямі. Акустична камера створює сферичні зображення рівня звукового тиску, де кожен елемент роздільної здатності відноситься до рівня звукового тиску звуків, що випромінюються з відповідного напрямку.

Використання мікрофонної решітки з 120 елементів дозволило, залежно від типу дрона, виявити і відобразити на дистанції від 150 м (Parrot AR Drone 2.0) до 290 м (DJI Phantom2) у присутності заважаючих джерел звуку навколишнього міського середовища. Образ акустичних сигналів БПЛА добре видно на оптичному зображенні рис. 8.

Структура пасивного содару з мінімально можливою кількістю мікрофонів

Розглянемо структуру пасивного содару (ПС) із мінімально можливою кількістю мікрофонів. Для визначення розташування БПЛА використовується пасивний содар, реалізований з використанням чотирьох каналів прийому акустичних сигналів.

Прийом АВ БПЛА здійснюється з використанням конденсаторних вимірювальних мікрофонів Superlux ECM-999. Виходи мікрофонів підключаються через симетричний

аудіоінтерфейс XLR до входів чотириканальної зовнішньої звукової карти Behringer U-Phoria UM2. Акустичний сигнал оцифровувався з частотою дискретизації $F_s = 48$ кГц та розрядністю 24 біта.

У пасивному содарі використано різницево-дальномірний метод вимірювання координат. Для його реалізації використовується мікрофонні решітки з мінімальною кількістю мікрофонів, що дозволяє реалізувати вимірювальні бази в азимутальній та кутомісній площині. На рис. 9 представлена фотографія мікрофонних решіток М1-М4 пасивного содару, що знята в умовах проведення польових вимірювань. Мікрофонні решітки містять дві азимутальні бази в горизонтальній площині М1-М2 – пеленгатор 1, М2-М3 – пеленгатор 2, ($d_1=2$ м, $d_2=2$ м) і одну кутомісну базу у вертикальній площині М2-М4- пеленгатор 3, ($d_3 = 1$ м). Висота установки мікрофонів азимутальних баз 1,3 м.



Рис. 9. Мікрофонна решітка М1-М4 пасивного содару

На виході кожного з пеленгаторів формується оцінка кутового положення джерела звуку щодо бази відповідного пеленгатора. Для визначення часу запізнення сигналів між двома мікрофонами знаходиться положення максимуму взаємкореляційної функції. Різниця в часі прибуття перераховується в різницю відстаней до точки розташування джерела звуку. Поверхня положення є поверхнею двопорожнинного гіперболоїда обертання у фокуси якого вміщені мікрофони. Якщо відстані від фокусів до цілі великі порівняно з розмірами бази, то гіперболоїд обертання навколо цілі практично збігається зі своєю асимптотою – конусом, вершина

якого збігається з серединою бази. Розташування джерела звуку визначається як точка перетину трьох гіперболоїдів з мікрофонами, які розташовані в їх фокусах.

Обробка результатів вимірювання пасивного содару

Обробка даних пеленгів, отриманих з мікрофонів відповідної бази пеленгатора, включає видалення низькочастотних складових спектра акустичного сигналу БПЛА, що забезпечує виключення впливу атмосферних та техногенних шумів на результати подальшої обробки. Далі проводяться статистично забезпечені вимірювання ВКФ для кожної вимірювальної бази, знаходження положення максимуму головної пелюстки ВКФ, розрахунок азимутів та кута місця за даними відповідних вимірювальних баз, видалення некоректних значень часового ряду кутових даних, згладжування даних медіанним фільтром. Потім проводиться обробка траєкторних вимірювань фільтром Калмана та згладжування даних фільтром ковзного середнього. Додатково проводяться допоміжні розрахунки потужності сигналу, оцінка співвідношення с/ш оцінки ефективної смуги спектра акустичного випромінювання БПЛА.

Чинники, що впливають на величину похибки визначення координат БПЛА

Похибка визначення координат БПЛА різницево-дальномірним методом залежить від точності вимірювання різниці моментів часу приходу сигналу між мікрофонами масиву та розміру азимутальних та кутомісних вимірювальних баз.

Для кожного пеленгатора, що входить до складу пасивного содару, існує поверхня положення для ДАВ, що визначається як геометричне місце точок, різниця відстаней яких до фокусів (r_1 , r_2) в яких розташовані мікрофони, є постійна величина. Поверхні положення можна характеризувати товщиною, яка визначається роздільною здатністю по різниці дальностей $r=r_1-r_2$ у пасивному содарі:

$$\Delta r = c/\Delta f_0,$$

де f_o – ефективна ширина спектра акустичного сигналу випромінювання БПЛА; c – швидкість звуку.

Як випливає з результатів експериментальних досліджень, ефективна ширина спектра акустичного сигналу випромінювання БПЛА [14] лежить в межах 300 – 700 Гц. Відповідно, очікується величина Δr в межах 0,5 – 1,1 м.

Розглянемо похибки визначення положення БПЛА щодо акустичного випромінювання. На рис. 10 представлено взаємне розташування елементів пеленгатора содару, що працює на основі різницево-дальномірного методу. Джерело акустичного випромінювання розташовано у точці B , d – база між мікрофонами $M1$, $M2$, φ – кут, під яким видно базу d . інформаційний параметр

$$W = r1 - r2,$$

де $r1$ і $r2$ – відстань від ДАВ до двох мікрофонів $M1$, $M2$.

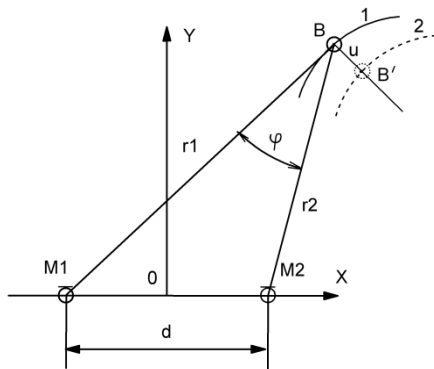


Рис. 10. Зсув лінії положення в різницево-дальномірному содарі

Зсув лінії положення з позиції 1 в позицію 2 (рис. 10), викликаний похибкою вимірювання різниці відстаней ΔW , дорівнює

$$u = \frac{\Delta W}{2 \sin \frac{\varphi}{2}}.$$

Середньоквадратичний розмір похибки визначення лінії положення σ_u визначається як

$$\sigma_u = \frac{\sigma_W}{2 \sin \frac{\varphi}{2}},$$

де σ_W – середньоквадратичне значення

похибки вимірювання ΔW .

Оскільки в содарі похибка вимірювання параметра W складається з похибок складових її елементів $\sigma_w = \sigma_{r1} + \sigma_{r2} = \sigma_\tau$, отримуємо:

$$\sigma_u = \frac{c \sigma_\tau}{2 \sin \frac{\varphi}{2}}.$$

Середньоквадратична похибка виміру часу взаємного запізнення визначається як:

$$\sigma_\tau = \frac{\tau_k}{2} \sqrt{\frac{1 + \rho_{uv}^2}{n \rho_{uv}^2}},$$

де ρ_{uv} – коефіцієнт кореляції вхідних сигналів $u(t)$ і $v(t)$; τ_k – ширина огинаючої автокореляційної функції корисного сигналу на рівні 0,5; $n = \Delta f_e T_e$ – коефіцієнт кореляційного накопичення; T_e – еквівалентний час інтегрування; Δf_e – еквівалентна ширина спектру.

Міра роздільної здатності за часом взаємного запізнення визначається протяжністю кореляційної функції акустичних сигналів, що оброблюються, і визначається як

$$\Delta r = \frac{c \tau_k}{2}.$$

Таким чином, у різницево-дальномірному содарі середньоквадратичне значення похибки лінійного зміщення σ_u залежить від похибки вимірювання інтервалу різниці часу прибуття σ_t та кута φ , під яким видно базу пеленгатора.

Мінімальні похибки вимірювання розташування БПЛА виникають за $\varphi=\pi$, тобто. коли БПЛА перебуває безпосередньо над базою пеленгатора. При віддаленні БПЛА від бази пеленгатора похибка зростає обернено пропорційно $\sin(\varphi/2)$. Збільшення розміру бази пеленгатора d призводить до збільшення кута φ і відповідно до зменшення похибки вимірювання розташування БПЛА, але при цьому з'являються динамічні похибки вимірювання розташування, пов'язані з ефектом Доплера.

Вплив ефекту Доплера виявляється в тому, що радіальні швидкості джерела звуку щодо кожного з двох мікрофонів вимірювальної бази содару відрізняються через рознесення мікрофонів у просторі. Відповідно, існує різниця радіальних швидкостей джерела звуку між мікрофонами кожної пари мікрофонів вимірювальної бази содару. Це, у свою чергу, призводить до додаткового зсуву положення ВКФ та модифікації координат, що визначаються содаром.

Результати імітаційного моделювання з визначення місцезнаходження БПЛА з використанням пасивного содару

Для дослідження ефективності алгоритмів визначення місцезнаходження в середовищі MATLAB створена імітаційна модель процесу обробки сигналів БПЛА, в якій задаються координати мікрофонів мікрофонної решітки пасивного содару і траєкторія руху БПЛА. Параметри мікрофонних решіток пасивного содару в модельному експерименті відповідають параметрам решітки в натурному експерименті. У процесі моделювання безперервно для кожної дискрети часу розраховуються затримки акустичного сигналу, що з'являються під час прийому сигналу у кожному мікрофоні. Також задається необхідне відношення сигнал/шум сигналів, що обробляються, проводиться облік відзеркалень від земної поверхні відповідно до заданого коефіцієнта відзеркалення. З цих даних формується математична модель сигналів на вході содара. Зіставляючи траєкторні параметри руху БПЛА, задані в імітаційній моделі та результати розрахунку координат БПЛА, отримані шляхом обробки сформованих акустичних сигналів, можна отримати значення абсолютних величин похибки використовуваного алгоритму визначення місцезнаходження та умов проведення модельного експерименту.

Як видно з наведеного аналізу, ключовим параметром, що впливає на точність визначення координат БПЛА різницево-дальномірним методом є точність визначення часу взаємного запізнення. За допомогою імітаційної моделі проаналізуємо величину інструментальних похибок місця визначення БПЛА в залежності від частоти дискретизації акустичного сигналу і дальності. Для проведення експерименту задамо положення центру мікрофонної решітки координатою $(0,0,1)$. Як уже зазначалося, параметри мікрофонних решіток пасивного содару в модельному експерименті відповідають параметрам решітки в натурному експерименті ($d1=2$ м, $d2=2$ м, $d3=1$ м). Рух БПЛА задамо горизонтальною лінійною траєкторією з положення $(R, -30, 20)$ в положення $(R, 30, 20)$ зі швидкістю 2 м/с. Задамо співвідношення сигнал/шум 40 дБ. Для кількох значень дальності R (50, 75, 100, 125, 150 м) і частоти дискретизації акустичного сигналу (48, 96, 192 кГц) проведемо вимірювання положення БПЛА на трасі польоту. Залежність середнього значення інструментальної похибки визначення БПЛА від дальності при різних значеннях частоти дискретизації акустичного сигналу представлені на рис. 11.

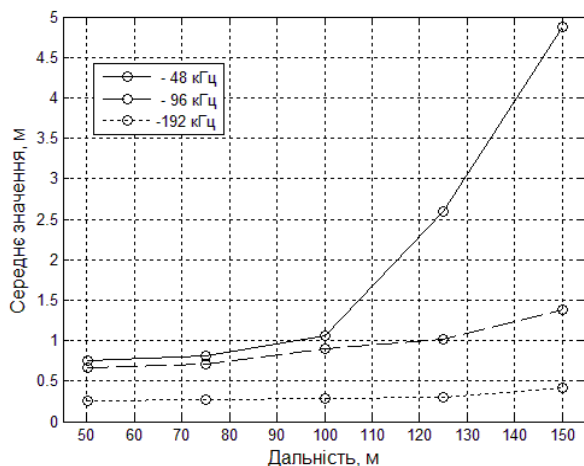


Рис. 11. Залежність середнього значення інструментальної похибки визначення БПЛА від дальності при різних значеннях частоти дискретизації акустичного сигналу

максимальній швидкості руху квадрокоптера DJI Phantom 3 PRO. Зіставлення заданих траєкторій руху БПЛА та результатів, отриманих у процесі імітаційного моделювання, представлені на рис.12.

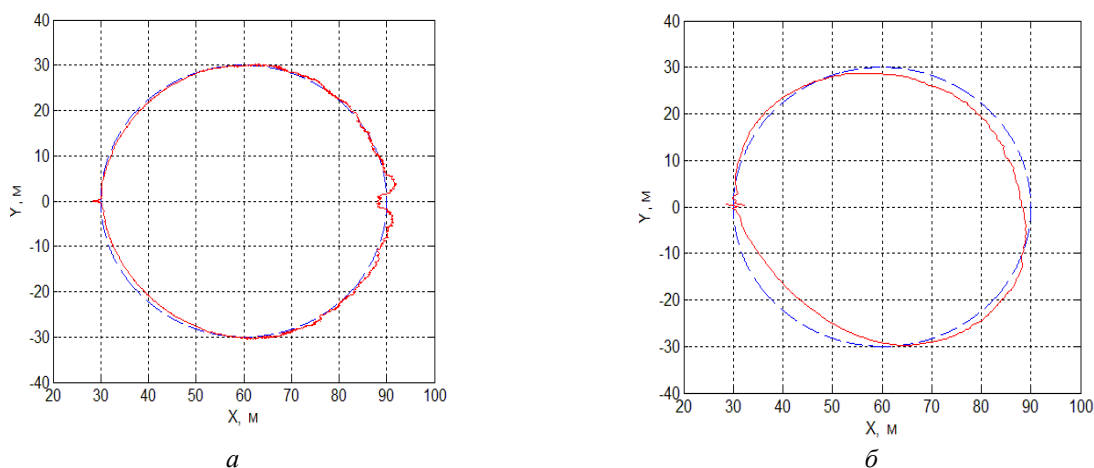


Рис. 12. Зіставлення заданої траєкторії руху БПЛА (пунктирна лінія) та траєкторії, побудованої за результатами обробки сформованих акустичних сигналів БПЛА при імітаційному моделюванні (суцільна лінія); *a* – кругова швидкість 2 м/с, *б* – кругова швидкість 20 м/с.

Для кругової швидкості 2 м/с спостерігається практично повна відповідність заданих параметрів траєкторії та параметрів траєкторії, отриманих під час імітаційного моделювання. Для кругової швидкості 20 м/с є помітна відмінність заданої та отриманої у модельному експерименті траєкторій. Кругова траєкторія руху БПЛА трансформується на еліптичну. Зі збільшенням кругової швидкості відмінності зростають. Так при круговій швидкості 2 м/с величина середнього значення та середньоквадратичного відхилення оцінок відмінності від заданих параметрів траєкторії становлять 0,82 м та 0,57 м, для 20 м/с відповідно 3,56 м та 1,84 м. Різниця компонент радіальної швидкості стає помітною у разі швидкорухаючого БПЛА і при рознесенні мікрофонів вимірювальних баз на значну відстань.

Результати натурних експериментів щодо визначення місця розташування БПЛА з використанням пасивного сонару

Визначення розташування БПЛА за допомогою пасивного сонару проводили в польових умовах. Як БПЛА використовувався квадрокоптер DJI Phantom 3 PRO. Вимірювання пара-

При заданих розмірах баз сонару та частоті дискретизації 48 кГц інструментальна похибка місцезнаходження БПЛА істотно зростає на дальності більше 100 м. Очевидні шляхи зниження інструментальної похибки місцезнаходження БПЛА полягають у збільшенні розміру баз і частоти дискретизації акустичного сигналу.

Розглянемо як виявляється ефект Доплера при моделюванні руху БПЛА у просторі. Задамо в модельному експерименті рух БПЛА по колу діаметром 60 м, видалення центру кола від сонару 60 м, висота польоту 20 м, кругові швидкості руху 2 та 20 м/с. Швидкість 20 м/с відповідає

метрів атмосфери проводилося мобільною метеостанцією. Температура повітря – 2,4 °С, вологість – 55 %, тиск – 1038 гПа. Акустичний шум докільля 35 – 37 дБА. Координати БПЛА, отримані стандартним приймачем GPS DJI Phantom 3 PRO, використовувалися для верифікації координат БПЛА, отриманих за допомогою ПС. Географічні координати БПЛА перетворювалися на декартові та поєднувалися з системою координат ПС.

Для верифікації результатів вимірювань розташування БПЛА використовувалися дві тестові траси. На тестовій трасі 1 здійснювався проліт по прямій лінії із зависанням БПЛА над контрольними точками (50, 100, 150, 200 м) на 5 – 10 с на висоті 5 м. Вимірювання довжини ділянок тестової траси для встановлення маркерів контрольних точок проводилося за допомогою геодезичної рулетки. На тестовій трасі 2 здійснювався проліт по спіралі, що піднімається, діаметром 50 м, видалення центру спіралі від содару 50 м, число витків спіралі 3, максимальна висота підйому 60 м.

Обробка результатів натурних вимірювань показала деяку невідповідність результатів вимірювань координат у контрольних точках з даними, отриманими в натурному експерименті. Для коректного використання результатів вимірювань необхідно провести юстування кутового положення азимутальних баз. Для юстування вимірювальної системи ПС використовувався аудіозапис акустичних сигналів БПЛА при зависанні над контрольними точками з видаленням 50 і 100 м. Похибка позиціонування квадрокоптера для цих точок не перевищує 0,5 м.

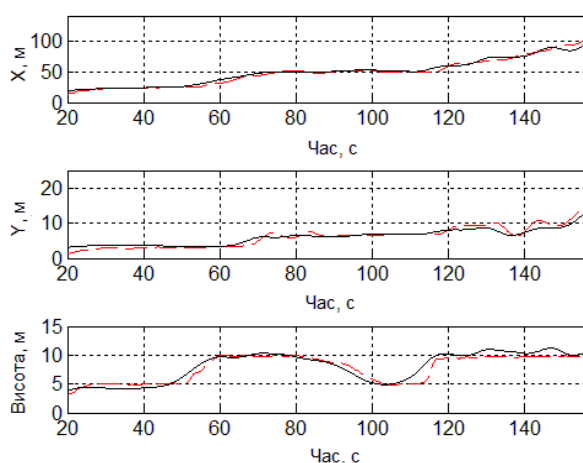


Рис. 13. Траса 1. Зіставлення елементів траєкторій польоту БПЛА, побудованих за координатами, отриманими за допомогою приймача GPS (пунктирна лінія) та пасивного содару (суцільна лінія)

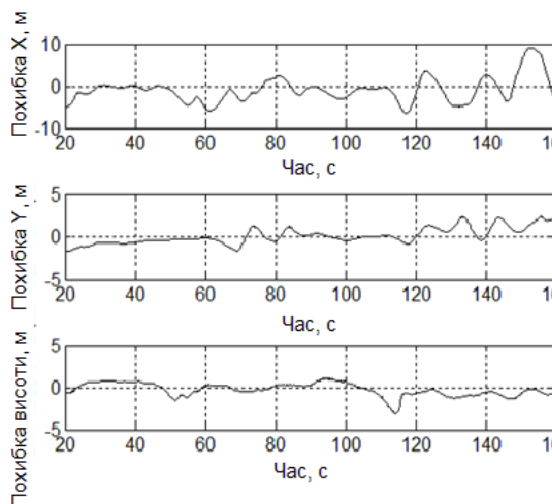


Рис. 14. Траса 1. Похибки визначення розташування БПЛА за результатами акустичних вимірювань

Юстування положення мікрофонів реалізується шляхом введення поправки в одну з азимутальних баз, при якій забезпечується збіг виміряного результату розташування джерела звуку з відомим. Використовуючи дані про висоту у контрольних точках, проводиться юстування ПС по кутомісній базі. Введення поправки до кутового положення азимутальних баз дозволило скоригувати результати вимірювань, насамперед це стосується результатів вимірювання дальності.

Доцільним є використання калібрування содару по акустичним реперним джерелам звуку, встановленим на відомій дальності при проведенні вимірювань.

На рис. 13 наведено зіставлення елементів траєкторій польоту БПЛА, побудованих за координатами, отриманими за допомогою приймача GPS та пасивного содару на трасі 1, представлене у декартових координатах. На рис. 14 показані абсолютні значення похибок позиціонування щодо координат, отриманих за допомогою приймача GPS. Так на дальності до 100 м (до 160 с польоту) абсолютні значення похибок визначення координат у 95 % випадків не перевищують 3 м, визначення висоти не більше 1 м.

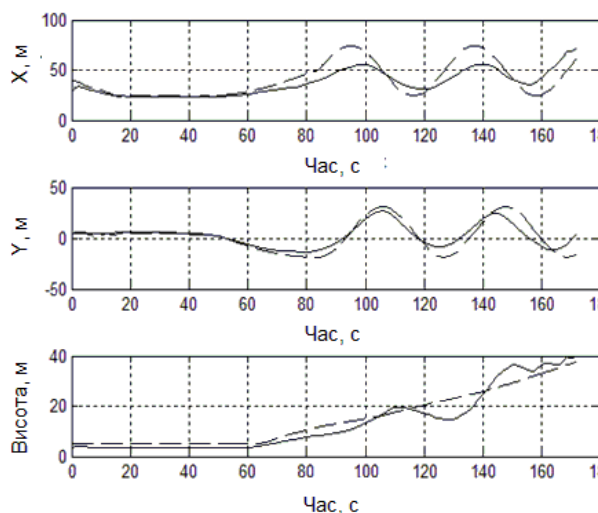


Рис. 15. Траса 2. Зіставлення елементів траєкторій польоту БПЛА, побудованих за координатами, отриманими за допомогою приймача GPS (пунктирна лінія) та пасивного содару (суцільна лінія)

Висновки

1. У роботі розглянуто низку методів визначення місцезнаходження БПЛА за акустичним випромінюванням. Встановлено переваги та недоліки окремих методів. Для визначення координат джерел акустичного випромінювання широке застосування знаходять методи з використанням мікрофонних решіток, які поділяються на класичні методи, методи надроздільності та метод різниці часу приходу.

2. Перспективною технологією визначення місця розташування акустичного випромінювання БПЛА є технологія бімформінгу, в якій здійснюється поєднання акустичних та оптичних методів обробки сигналів.

3. Проаналізовано фактори, що впливають на величину похибки визначення координат БПЛА. Збільшення розмірів баз содару призводить до зменшення помилки виміру місцезнаходження БПЛА, але при цьому збільшуються динамічні помилки виміру розташування БПЛА, пов'язані з ефектом Доплера.

4. Інструментальна похибка вимірювання дальності визначається похибками вимірювання кутів приходу акустичних сигналів по азимутальних баз, яка пов'язана з розміром вимірювальних баз содару і частотою дискретизації акустичних сигналів.

5. Для заданої конфігурації мікрофонної решітки содару методом імітаційного моделювання отримані оцінки інструментальної похибки визначення місцезнаходження БПЛА та похибки, викликані ефектом Доплера. Обробка результатів натурних вимірювань, проведених за допомогою содару, показує, що абсолютні значення похибок визначення координат БПЛА на дальності до 100 м у 95 % випадків не перевищують 3м, визначення висоти не більше 1 м. Вимірювання азимуту та кута місця при цьому досить точні при високій роздільній здатності.

6. Мікрофонні решітки содару є прецизійним пристроєм, зовнішні механічні впливи можуть призвести до порушення її функціонування. Доцільним є регулярне використання калібрування содару по акустичним реперним джерелам звуку, встановленим на відомій дальності.

Список літератури:

1. Oleynikov V., Zubkov O., Kartashov V., Koryttsev I., Sheiko S., Babkin S. Experimental estimation of direction finding to unmanned air vehicles algorithms efficiency by their acoustic emission // 2019 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications – Science and Technology. 2019. P.175 – 178.

Можна відзначити задовільну відповідність зіставних результатів вимірювань для цієї траси.

На рис. 15 наведено зіставлення елементів траєкторій польоту БПЛА, координат, отриманих за допомогою приймача GPS і пасивного содару на трасі 2, представлене в декартових координатах. Кругова швидкість руху БПЛА – 4 м/с. Абсолютні значення помилок визначення координат для траси 2 істотно вищі ніж на трасі 1, що обумовлено змінами швидкості та напрямки руху БПЛА та проявом ефекту Доплера.

2. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109 –146.
3. Карташов В.М. и др. Обработка сигналов в радиоэлектронных системах дистанционного мониторинга атмосферы. Харьков : ХНУРЭ, 2014. 312 с.
4. Kartashov V. Oleynikov O. Zubkov, S. Sheiko. Optical detection of unmanned air vehicles on a video stream in a real-time // The Fourth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2019). Odessa, Ukraine. 2019. 4 p.
5. Карташов В.М., Олейников В.Н., Колендовская М.М., Тимошенко Л.П., Капуста А.И., Рыбников Н.В. Комплексирование изображений при обнаружении беспилотных летательных аппаратов // Радіотехніка. 2020. Вип. 201. С. 120 – 129.
6. Sergiyenko O., Rodriguez-Quiñonez J.C. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision. IGI Global, 2016. 341 p.
7. Oleynikov V.N., Zubkov O.V., Kartashov V.M., Korytsev I.V., Babkin S.I., Sheiko S.A. Investigation of detection and recognition efficiency of small unmanned aerial vehicles on their acoustic radiation // Telecommunications and Radio Engineering. 2019. Vol. 78, Iss. 9. P.759 – 770.
8. Kartashov V., Oleynikov V., Koryttsev I., Sheyko S., Zubkov O., Babkin S., Selieznov I. Use of Acoustic Signature for Detection, Recognition and Direction Finding of Small Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2020. 4 p.
9. Kartashov V.M., Oleynikov V.N., Sheyko S.A., Babkin S.I., Koryttsev I.V., Zubkov O.V., Anokhin M.A. Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles // Telecommunications and Radio Engineering. 2018. Vol.77, Iss. 10. pp. 915 – 924.
10. Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И. Исследование характеристик акустического излучения малых беспилотных летательных аппаратов// Сб. науч. трудов VI Междунар. радиоэлектронного форума “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития (МРФ-2017)” Междунар. науч. конф. “Радиолокация. Спутниковая навигация. Радиомониторинг”. 24-26 октября 2017 г. Харьков, Украина. Харьков : Точка. С.107 – 111.
11. Kartashov, V., Oleynikov, V., Koryttsev, I., Zubkov, O., Babkin, S., Sheiko, S. Processing and recognition of small unmanned vehicles’ sound signals. // 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, 2018, P. 1 – 5.
12. Карташов В.М., Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И., Коротцев И.В., Зубков О.В., Анохин М.А. Информационные характеристики звуковых сигналов малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2017. Вып 191. С. 181 – 187.
13. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Sheyko S.A., Babkin S.I., Koryttsev I.V., Zubkov O.V., Anokhin M.A. Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika). 2018. Vol. 77(10). P. 915 – 924.
14. Oleynikov V.N., [Kartashov V.M.](#), Babkin, S. I., [Zubkov O.V.](#), [Koryttsev I.V.](#), [Sheiko S.A.](#), [Selieznov I.S.](#) Structure and Parameter Unmanned Aerial Vehicles Sound Fields // Telecommunications and Radio Engineering. New York. 2020. Vol. 79, №17. P.1539 – 1550.
15. Алмазов В.Б. Методы пассивной радиолокации. Харьков : Изд-во Военной инженерной радиотехнической академии противовоздушной обороны имени Л.А. Говорова, 1974. 85 с.
16. В.М. Карташов, И.В. Коротцев, В.Н. Олейников, О.В. Зубков, С.И. Бабкин, С.А. Шейко, Н.А. Левский, И.С. Селезнев. Алгоритмы пеленгации беспилотных летательных аппаратов по их акустическому излучению // Радиотехника. Вып.196. 2019. С. 22 – 31.
17. Олейников В.Н., Зубков О.В., Карташов В.М., Коротцев И.В., Бабкин С.И., Шейко С.А., Селезнев И.С. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению // Радиотехника. 2019. Вып. 199. С. 29 – 37.
18. M. Benyamin and G. H. Goldman. Acoustic detection and tracking of a Class I UAS with a small tetrahedral microphone array. Adelphi, MD, 2014 [Online]. Available: <http://www.arl.army.mil/arlreports/2014/ARL-TR-7086.pdf>.
19. Xianyu Chang A. Surveillance System for Drone Localization and Tracking Using Acoustic Arrays / Xianyu Chang, Chaoqun Yang, Zhiguo Shi // Published Computer Science. 2018 IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM) 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8448409> (дата обращения: 22.10.2020).
20. Sedunov A. et al. Stevens drone detection acoustic system and experiments in acoustics UAV tracking // 2019 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST). IEEE, 2019. 1 – 7.
21. Alexander Sedunov. Passive acoustic localization of small aircraft / Alexander Sedunov, Alexander Sutin, Hady Salloum, Nikolay Sedunov // 166th Meeting of the Acoustical Society of America, San Francisco, CA, 02-06 December 2013, Signal Processing in Acoustics: Paper 2pSP2. URL: https://www.researchgate.net/publication/258249414_Passive_acoustic_localization_of_small_aircraft.
22. Johnson D.H., Dudgeon D.E. Array signal processing: concepts and techniques. 1st ed. Signal processing series. Prentice – Hall, Upper Saddle River, NJ, 1993.

23. Detection and tracking of drones using advanced acoustic cameras Joël Busset, Florian Perrodin, Peter Wellig, Beat Ott, Kurt Heutschi, Torben Rühl, Thomas Nussbaumer Proceedings Volume 9647, Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks XI; and Advanced Free-Space Optical Communication Techniques and Applications; 96470F (2015)

Надійшла до редколегії 30.08.2022

Відомості про авторів:

Олейніков Володимир Миколайович – канд. техн. наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Україна; email: vladimir.oleinikov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3358-5987>.

Карташов Володимир Михайлович – д-р техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем; Україна; e-mail: volodymyr.kartashov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8335-5373>

Шейко Сергій Олександрович – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Україна, e-mail: sergiy.sheiko@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1638-4478>.

Зубков Олег Вікторович – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Україна, e-mail: Oleh.zubkov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8528-6540>.

Олейнікова Олена Іванівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри комп'ютерної радіоінженерії та систем технічного захисту інформації, Україна, e-mail: elena.oleynikova@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5601-7018>