

УДК 681.884

Виявлення, локалізація та ідентифікація малих літальних апаратів за акустичним випромінюванням

Козерук С. О., Коржик О. В.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна

E-mail: skzrk@i.ua

Малогобаритні безпілотні літальні апарати знаходять широке застосування у багатьох суспільно корисних справах, разом з тим зростає і ризик їх застосування в злочинних та терористичних акціях. Виникла необхідність у розробці засобів спостереження, локалізації та ідентифікації дронів за умови наявності природних і промислових завад. В роботі розглянуто деякі методи та способи виявлення, локалізації та ідентифікації малих літаючих об'єктів за їх акустичною сигнатурою. Запропоновано наступна послідовність дій: спостереження вести методом керованої просторової кореляційної характеристики; рішення про виявлення приймати по критерію Неймана-Пірсона; ідентифікацію дрона вести аналізуючи спектр випромінювання на наявність основних і гармонічних складових. Результати натурних експериментів з квадрокоптером Phantom 3 підтвердили запропонований алгоритм.

Ключові слова: малий літальний апарат; пеленгування; ідентифікація

DOI: [10.20535/RADAP.2022.89.29-38](https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.89.29-38)

Вступ

Малі безпілотні літальні апарати (МЛА), або дрони, останнім часом все більше використовують у суспільно корисних справах: моніторингових послугах за станом довкілля, охороні територій і об'єктів, поштових та кур'єрських послугах, у побуті для індивідуальних потреб. Зростання ринку дронів та їх висока доступність має зворотній ефект, оскільки створюється все більше можливостей використання малих літальних апаратів в злочинних та терористичних акціях. Дрон, оснащений зброєю або засобами спостереження, являє собою небезпечний інструмент в руках злочинця, який може спричинити значні соціальні або економічні збитки. Виникла необхідність у розробці засобів спостереження, локалізації та ідентифікації дронів за умови наявності натурних і промислових завад. У роботі розглянуто деякі підходи локалізації та розпізнавання малих літальних апаратів за їх акустичним випромінюванням. Запропоновано послідовність дій для вирішення поставленої задачі та приведені результати натурних досліджень.

1 Аналіз проблеми та пошук рішення

У наш час МЛА знайшли широке застосування у багатьох суспільно корисних справах, разом з тим зростає і ризик їх застосування для контрабанди, несанкціонованого спостереження, кібератак тощо. Враховуючи низьку собівартість та економічну ефективність МЛА можна очікувати їх широке застосування у майбутньому. Виникла необхідність у розробці систем виявлення спостереження, та розпізнавання МЛА у польоті. 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 та мають як переваги так і недоліки. Оптичні камери спостереження, доступні за ціною і прості в експлуатації, не функціонують в складних метеорологічних умовах і вночі. Використання пристроїв інфрачервоного і радіочастотного спостереження обмежене низьким тепловим і електромагнітним випромінюванням МЛА. Активні системи радіолокації можуть працювати без зна-

чного погіршення в негоду, вдень і вночі. Головні недоліки — відсутність скритності спостереження та мала енергія відбиття, що суттєво зменшує відстань виявлення. Акустичні пасивні системи спостереження, відносно недорогі і прості в експлуатації, мають суттєвий недолік — не можуть забезпечити велику дальність локалізації МЛА. Надійна відстань виявлення становить кілька сотень метрів та залежить від рівня звукового випромінювання МЛА, рівня акустичних завад в зоні прийому та метеорологічних умов.

В статті [2] дано порівняння систем захисту від МЛА, які не є носіями військової зброї, заснованих на оптичному, тепловому, радіочастотному та акустичному принципах. Технології протидії дронам розділено на етапи виявлення, ідентифікацію та нейтралізацію. Для розробки алгоритмів виявлення і ідентифікації дронів потрібно розуміти процеси формування фізичних полів та прогнозувати їх ха-

рактеристики. В роботі [3] зроблено теоретичний прогноз процесу формування звукового випромінювання пропелером в залежності від швидкості обертання двигуна, кількості лопатей на його осі, товщини леза лопаті, його покриття та аеродинамічного навантаження. Гармонічні тони випромінювання f_i можна оцінити знаючи частоту обертання електродвигуна (основна гармоніка) f_0 та кількість лопатей N пропелера: $f_i = N f_0 i$; $i = 1, 2, 3, \dots$. Ці припущення були підтверджені експериментальними дослідженнями в акустичній заглушеній камері. Сумарний спектр звукового випромінювання двигуна і пропелера періодичний (Рис. 1, синя лінія), має явно виражені дискретні тони, які домінують над широкосмуговим випромінюванням двигуна (Рис. 1, чорна лінія). Експериментальні вимірювання показали просторову спрямованість випромінювання до 20 дБ по напрямку осі обертання пропелера для всіх гармонічних складових.

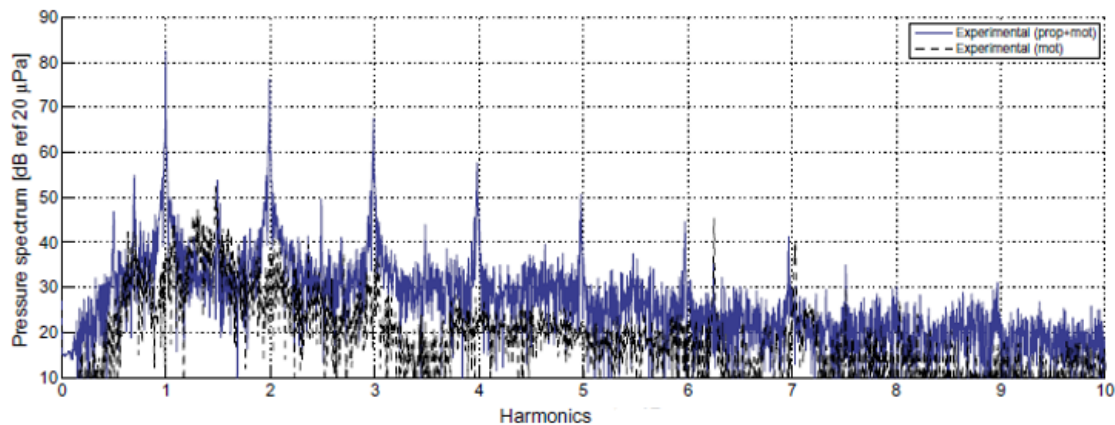


Рис. 1. Гармонічний склад випромінювання пропелера з двома лопатями [3]

Рівні звукового тиску у широкому діапазоні випромінювання (0-10) кГц для двох типів пропелерів (звичайного і оптимального) з двох лопатей що обертаються з частотами 16 Гц і 33 Гц становили 80 дБ та 53 дБ відповідно. При цьому рівень шуму електродвигуна не перевищував 45 дБ.

Періодичність спектральних компонент (Рис. 2) була отримана в натурних дослідженнях [4] для моделі одномоторного літака, трьох-, чотирьох- та шестипропелерних МЛА, які зависали на висоті (6-8) м над мікрофоном.

Піки гармонік в спектрі моделі літака, Рис. 2а, більш вузькі, ніж у спектрах багатопропелерних дронів. Періодичні спектральні максимуми (Рис. 2б,с,д) багатомоторних дронів мають декілька близьких тонів, положення яких на осі частот змінюється у часі. Пояснюється це тим, що електродвигуни обертаються з різною швидкістю, яка залежить від режиму польоту та вітрового навантаження. У польоті вітрове навантаження на пропелери змінюється випадково. Величина та частота

звукового випромінювання змінюються теж випадково, що призводить до розмивання спектральних максимумів. Судячи з наведених рисунків найбільш інформативна смуга частот спектру акустичного випромінювання МЛА лежить в діапазоні (100-2000) Гц. Максимальні рівні звуку дронів на висоті 15 м орієнтовно становили 63 дБА для квадрокоптера, 68 дБА для гексакоптера та 72 дБА для моделі літака. Інформаційні характеристики акустичних сигнатур моноплана і квадрокоптера досліджені в роботі [5]. Відзначено присутність періодичних гармонік випромінювання пропелерів майже до 10 кГц. Такий широкий частотний діапазон випромінювання вдалось дослідити за рахунок застосування параболічного мікрофону, чутливість якого зростає на високих частотах.

Таким чином модель акустичного випромінювання МЛА можна представити у вигляді широко-смугового шумового сигналу з періодичними гармонічними тонами. Для моноплана спектр має виражені максимуми, частота яких кратна основному

тону випромінювання пропелера. У багатомоторних МЛА спектри мають періодичні рельєфні максимуми, які змінюються у часі. Ефективний діапазон частот енергетичного спектру за різними оцінками лежить в межах від 100 Гц до (2-3) кГц, а рівень

випромінювання більшості сучасних МЛА не перевищує 80 дБА. Вище вказаної смуги частот має місце широкосмугове випромінювання електричних двигунів з значно меншим рівнем.

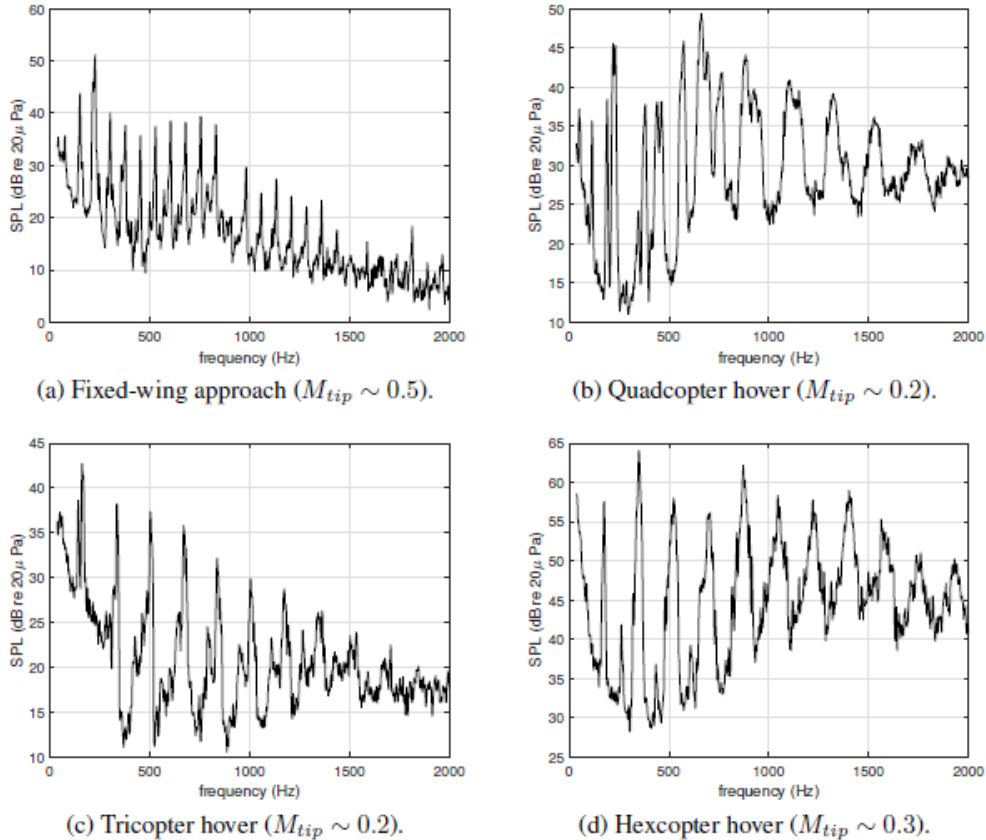


Рис. 2. Типові спектри для деяких типів МЛА [4]

На виявлення МЛА суттєво впливає рівень фонового акустичного шуму – природного звуку, індустриальних та транспортних шумів. Спектр вітрового впливу залежить від швидкості вітру та може займати смугу частот до 200 Гц і вище. Для його компенсації застосовують вітрозахисні насадки на мікрофони та електричні фільтри високих частот у входних ланцюгах детекторів. Індустриальний та транспортний шуми мають досить широкий частотний і динамічний діапазон [6], які маскують звуки дронів, зменшують дальність та достовірність їх виявлення. Ці фактори треба враховувати при виборі місця установки та прогнозуванні характеристик виявлення. В [7] дана оцінка дальності виявлення для заданих характеристик виявлення в залежності від енергетичного співвідношення сигналу до завади на вході приймача. Чим менше величина сигналу, який впевнено реєструє детектор, тим більша відстань виявлення дрона. Тобто побудова оптимального, по відношенню до прийнятих моделей корисного сигналу та завади, приймача дасть можливість збільшити дальність виявлення МЛА.

Розглянемо деякі підходи до вибору способу детектування для визначеної моделі шумового сигналу – широкосмугового випадкового процесу зі спадаючими по частоті періодичними гармонічними складовими. Заваду будемо розглядати як широкосмуговий стаціонарний ізотропний процес з рівномірною спектральною щільністю потужності (СЩП). Простий приймач–типовий канал виявлення (ТКВ) [7], формує вихідну напругу пропорційно енергії вхідного акустичного процесу. По перевищенні вихідної напруги наперед заданого порогового значення приймається рішення про виявлення. Недоліком ТКВ є мала завадостійкість, значна тривалість часу спостереження до моменту прийняття рішення та наявність на виході напруги акустичної фонові завади. Покращити характеристики виявлення – збільшити достовірність та зменшити хибні виявлення, можна використавши приймач з одним мікрофоном [8] провівши обробку прийнятого звуку у наступній послідовності: смугова фільтрація в діапазоні ефективного випромінювання МЛА; сегментація запису з використанням функції Ханна та розрахунок

спектру потужності; застосування процедури Вінеровської фільтрації для зменшення енергетики завад; прийняття рішення по перевищенню заданого порогового значення. В подальшому по відфільтрованому спектру встановлювались ознаки для задачі класифікації МЛА. Експериментальні випробування показали що дальність виявлення дрона не перевищувала 60 м з достовірністю 62%. Недолік такого способу детектування – невідповідність спектрів діючих завад їх попередньо вимірним і усередненим значенням, що робить спосіб Вінеровської фільтрації малоефективним. Зменшити вплив завад можна застосувавши кореляційні способи обробки вхідних процесів. Кореляційний приймач (КП) [9] з двох мікрофонів збільшує дальність надійного виявлення та дає можливість розрахувати кутову координату МЛА. Важливою умовою використання кореляційної обробки є забезпечення статистичної незалежності прийнятих акустичних завад. Збільшення кількості мікрофонів та формування спрямованого прийому покращує характеристики виявлення та дає можливість точніше визначити кут приходу акустичних хвиль. Застосування чотирьох мікрофонів розміщених в вершинах тетраедра [10] дозволило отримати просторову вибірковість, застосувавши типовий підхід формування характеристики спрямованості (ХС) затримкою та сумою хвиль прийнятих окремими мікрофонами. Для збільшення відношення сигнал/завада на виході формувача ХС включався фільтр Вінера з передаточною характеристикою, яка розраховувалась кожні 4 секунди по експериментально визначеним спектрам потужності сигналу і завади в діапазоні частот (80-2000) Гц. Побудова кутової траєкторії руху МЛА велась з використанням адаптивного фільтра Кальмана по даним отриманим з формувача ХС. Максимальна відстань виявлення становила 600 м з вірогідністю 99% та хибними спрацюваннями 3%. Такий результат пояснювався зменшенням величини фонового шуму за рахунок Вінеровської фільтрації та тривалим часом (4 с) експозиції. Застосування способів формування керованої просторової характеристики потужності (КПХП) та керованої просторової кореляційної характеристики (КПКХ) [11] збільшило завадостійкість та точність визначення кутових координат в порівнянні з традиційним способом формування ХС. В проведених експериментальних дослідженнях пеленгування шумоподібного джерела з смугою частот 1000 Гц КПКХ мала ефективний кут 12°. Подальше розширення смуги частот прийнятого сигналу дозволить збільшити простору

вибірковість. Збільшення кількості мікрофонів призводить до росту індексу спрямованості та збільшує дальність і достовірність виявлення. Дискретний лінійний масив з 24 мікрофонів [12] та застосований алгоритм затримки та суми прийнятих окремими мікрофонами хвиль забезпечив огляд простору в секторі кутів $\pm 45^\circ$ з кроком 1° . Були порівняні енергетичний, гармонічний та гаусів алгоритми для виявлення та трекування моделі літака, що кружив на висоті до 150 м над масивом мікрофонів. Результати обчислень виводилися на дисплей у вигляді траєкторії руху об'єкта в координатах: кут приходу звуку – час. Енергетичний та гармонічний підхід, судячи з представлених рисунків, дали близькі результати. На зображеннях траєкторії руху багато шумових плям та інтерференційних смуг. Пояснюється це застосуванням лінійки мікрофонів налаштованої на частоту 700 Гц для просторової обробки широкосмугового акустичного випромінювання в діапазоні частот (450-3000) Гц. Гармонічний детектор [13] випробувався для локалізації одномоторного літака з бензиновим двигуном (рівень випромінювання приведений до 1 м становив 110 дБА) на відстані до 678 м. Враховуючи природу випромінювання пропелера – наявність кратних основній частоті гармонічних складових в діапазоні до 1000 Гц, обробка прийнятого процесу проводилась в наступній послідовності: смугова адаптивна фільтрація з видаленням власних шумів носія, на якому був розташований приймач; сегментація запису з використанням віконних функцій та розрахунок спектру з використанням швидкого перетворення Фур'є (ШПФ); використання функції гармонічних спектральних перетворень (ГСП), яка враховує періодичність гармонічного спектру, для підвищення достовірності виявлення. Функція ГСП записується виразом:

$$\bar{H}_a |X(f)| = \left[\frac{1}{R} \sum_{r=1}^R |X(f) \cdot r|^a \right]^{1/a}, \quad (1)$$

де $X(f) \cdot r$ – значення гармонічної компоненти спектру; R – кількість гармонік; a – ціле число, яке задає статистику обробки (Таб. 1 [13]).

У Таблиці 1 наведено операції по статистичній обробці гармонічних складових. По розрахованим значенням функції приймають рішення про виявлення. В подальшому, для побудови траєкторії руху МЛА у відтінках сірого, застосовують підхід сканування простору керованою характеристикою потужності.

Табл. 1 Операції по статистичній обробці гармонічних складових [13]

| Harmonic | Geometric | Standard | RMC |
|--|---|--|--|
| $a = -1$ | $a = 0$ | $a = 1$ | $a = 2$ |
| $\left[\frac{1}{R} \sum_{r=1}^R X(f) \cdot r ^{-1} \right]^{-1}$ | $\left[\prod_{r=1}^R X(f) \cdot r \right]^{1/R}$ | $\left[\frac{1}{R} \sum_{r=1}^R X(f) \cdot r \right]$ | $\left[\frac{1}{R} \sum_{r=1}^R X(f) \cdot r ^2 \right]^{1/2}$ |

Наступним кроком після виявлення є ідентифікація джерела звуку. В роботі [14] приведені дослідження розпізнавання одно- та чотиримоторного дронів способами розрахунку коефіцієнта кореляції Пірсона, методу нормалізованої максимальної кореляції та рейтингової кореляції Спірмена. Спочатку створювалась база даних з трансформованих в частотну область (діапазон до 10 кГц) зразків акустичних сигнатур дронів. Аудіозапис зразків вівся на відстані до 4 м у присутності генерованих звукових завад. В подальшому знаходились кореляційні коефіцієнти між прийнятим та еталонними сигнатурами. Схожість з еталоном запропонованими способами, навіть за відсутності привнесених завад, не перевищувала 85%. Покращити розпізнаваність квадрокоптера до 98% [15] вдалось за рахунок методу машинної класифікації – порівнянні векторів признаков записаних в процесі тестування та векторів признаков отриманих з аудіозаписів експерименту. Створення тестових векторів признаков ведеться в наступній послідовності. Враховуючи нестаціонарність акустичних процесів спочатку проводять короткостроковий (до 20 мс) аналіз аудіозапису в часовій та спектральній областях. Визначають характерні ознаки: енергію вибірки, швидкість перетину нуля, центроїд спектру потужності, мел-кепстральні коефіцієнти та інші. Елементи векторів признаков знаходять шляхом усереднення отриманих ознак для часових вибірок тривалістю до 200 мс. Далі з середньострокових надійних ознак формують глобальний вектор, який достатньо повно описує фізичну властивість звукової сигнатури на вибраному часовому інтервалі (до 5 с). Цей вектор є дескриптором для виконання процедури розпізнавання та прийняття рішення про наявність дрона. Для успішного використання машинного алгоритму потрібен великий банк дескрипторів, тобто треба мати та поповнювати звукові сигнатури дронів різного типу, які зроблені в умовах відсутності акустичного смогу (в заглушеній камері, спеціальних площадках для акустичних вимірювань, тощо). Тому такі системи акустичного спостереження більш дорогі і неадекватні новим зразкам дронів. Алгоритм виявлення на основі гармонічного аналізу акустичної сигнатури, інваріантний до моделі МЛІА та режиму його польоту, приведено в [16]. Послідовність операцій гармонічного детектування наступна: фільтрування з метою зменшення природного шуму; сегментува-

ння у часі і цифрування; багаторазовий розрахунок автокореляційної функції (АКФ) з метою виявлення гармонічних складових; знаходження СЩП по результуючій АКФ; згладжування СЩП методом ковзного середнього; пошук усіх локальних максимумів спектра в діапазоні 80 Гц–3 кГц; пошук основної частоти та 2-3 гармонік; перевірка СЩП дрона на відповідність фоновому шуму (по огинаючій спектра); аналіз СЩП на відповідність мовному сигналу. МЛІА вважається виявленим, якщо частота основного тону та гармоніки основного тону попередньо аналізованого звукового сегмента збігаються (до 10%) з частотами, отриманими на підставі аналізу СЩП взаємної кореляційних функцій поточного і наступного у часі аудіо сегментів. На цьому процес виявлення дрону і його попередня ідентифікація завершується. Для розпізнавання МЛІА застосовано підхід побудови вектору признаков на основі мел-кепстральних коефіцієнтів, тотожних потужності сигналу в мел-частотних смугах, з подальшим кореляційним обчисленням коефіцієнту подібності з еталонним вектором признаков. Експериментальні дослідження показали: для дальності виявлення гармонічним методом в 50 м достовірність виявлення становила 50%, а достовірність ідентифікації – 60%. Тобто метод заснований на порівнянні еталонного і поточного векторів мел-кепстральних коефіцієнтів дав кращі характеристики виявлення ніж гармонічний метод. Недолік – необхідність постійно оновлювати базу акустичних сигнатур та векторів признаку.

Аналіз акустичних сигнатур бажано проводити для значень сигнал/завада (SNR) більше одиниці. Максимальне значення SNR досягається на виході мікрофонного пристрою спрямованого на джерело звуку. Тому спочатку ведуть пошук джерела звуку з застосуванням алгоритмів просторового сканування. Виявивши джерело переходять до кроків локалізації та ідентифікації. Технологічний інститут Стівенса розробив та побудував акустичну систему спостереження (DADS) [17], яка може виявляти, відстежувати та ідентифікувати дрони аналізуючи шум пропелерів. Система складається із трьох або більше мікрофонних модулів, розміщених по периметру контрольованої території. Мікрофони в кожному модулі розташовані в вершинах тетраедру. Дані з мікрофонного модулю передаються через Wi-Fi в режимі реального часу на центральний

комп'ютер. Просторове сканування велось методом КПКХ, який базується на розрахунку значення взаємної кореляційної функції (ВКФ) звуків прийнятих окремими мікрофонами з керованих напрямків та їх подальшим складанням. Для локаційної системи із декількох мікрофонів $i = k = 1, 2 \dots N$ КПКХ можна записати у вигляді:

$$P(q) = \sum_{i,k}^N R_{ik}(\tau_{ik}), \quad i \neq k, \quad (2)$$

де $P(q)$ – результуюча потужність на виході суматора-формувача КПКХ; q – вектор управління в просторі; N – кількість мікрофонів; R_{ik} – значення ВКФ, розрахованої між акустичними каналами i та k ; τ_{ik} – керована різниця часу прибуття плоскої хвилі на мікрофони з номерами i та k вздовж вектору управління q .

Експериментальні дослідження проводились різними конфігураціями системи DADS з кількома типами МЛА та в різних натурних умовах. Наприклад, локалізація МЛА «Inspire 2» велась триангуляційним методом із застосуванням двох акустичних модулів рознесених на відстань 60 м та 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 наявності акустичних завад величиною (45-50) дБА. В подальшому досліджувалась система спостереження з трьома акустичними модулями розташованими 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%.

Для вирішення класифікаційної задачі запропоновано простий спосіб, заснований на характерній особливості спектрів акустичного випромінювання багатомоторних дронів, а саме наявності в локальних спектральних максимумах основних та гармонічних складових декількох близьких спектральних смуг (Рис. 3). Смуги виникають в результаті розбіжності частот обертання двигунів дрона.

Спектр потужності розраховувався по звуковим сегментам тривалістю 4 с з 50% перекриттям. Кожні 2 с дається оцінка класифікатора. Експеримент показав можливість правильного розпізнавання дронів від 74% до 97% залежно від відношення SNR.

Таким чином, спираючись на проведений аналіз, послідовність етапів локалізації дронів за акустичним випромінюванням наступна: спостереження простору з використанням алгоритмів КПКХ або КПКХ; прийняття рішення про виявлення на основі енергетичних або гармонічних методів; визначення кутових координат по значенню керуючих часових затримок; класифікація дрона з застосуванням простих ідентифікаційних характеристик – наявності в

локальних спектральних максимумах основних та гармонічних складових.

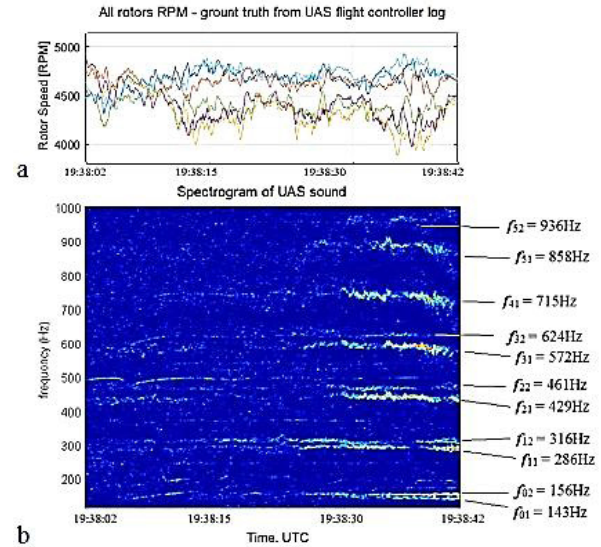


Fig. 6. Alta 6 hexacopter. Rotors RPM (a) and corresponding sound spectrogram (b).

Рис. 3. Спектрограма випромінювання дрона [17]

2 Експериментальна перевірка алгоритмів локалізації та ідентифікації МЛА

Перевірку алгоритмів було проведено по записам зробленим в натурних експериментах описаних в роботі [9]. Квадрокоптер Phantom 3 standard летів з максимальної відстані в 100 м на висоті 30 м з приблизно постійною швидкістю 3 м/с по нормальній траєкторії до акустичної бази двох мікрофонів. Сканування простору велось в горизонтальній площині в межах кутів від 0° до 180° з кутовим кроком 1° . Спочатку були порівняні алгоритми пеленгування. Пеленгаційна характеристика методу КПКХ (Рис. 4) має перевагу перед пеленгаційною характеристикою КПКХ за рахунок гостроти піку та меншим рівнем бічних максимумів.

Наступним кроком стало сканування простору з застосуванням алгоритму КПКХ. Отримані записи аудіофайлів з двох мікрофонів оброблялись у відповідності до історії польоту, по мірі наближення дрону, сегментами тривалістю 1 с з перекриттям 50%. Результат сканування простору в горизонтальній площині – пеленгограма, приведена на Рис. 5. Вона дає можливість спостерігати траєкторію польоту МЛА по смугі максимальної яскравості (червоний колір). Недоліки: наявність інтерференційних ліній викликаних високочастотними складовими випромінювання дрона; розмиття треку пояснюється динамікою руху МЛА та зміною фізичного стану атмосфери. Крім того пеленгограма не забезпечує максимальну відстань виявлення, яку краще вести

згідно правилу прийняття рішення на основі аналізу енергії звукових процесів [9].

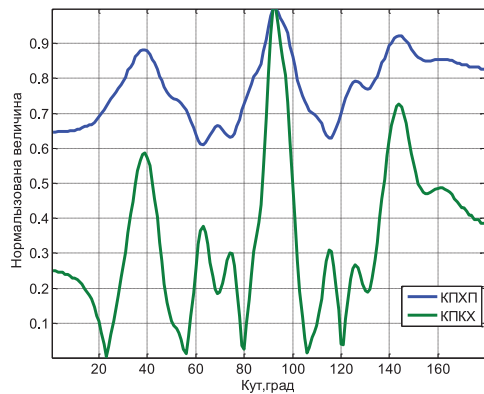


Рис. 4. Пеленгаційні характеристики на середині траєкторії польоту дрона

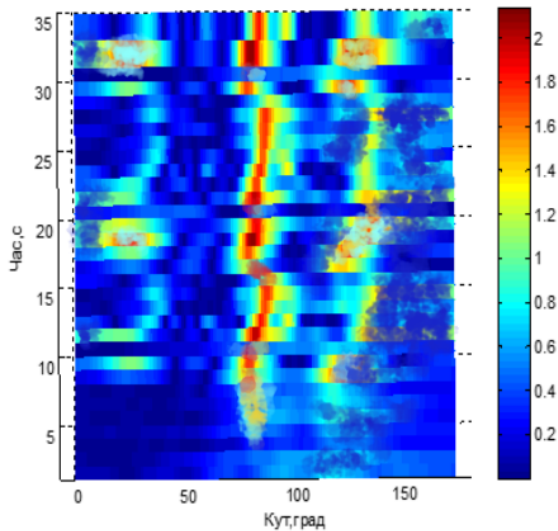
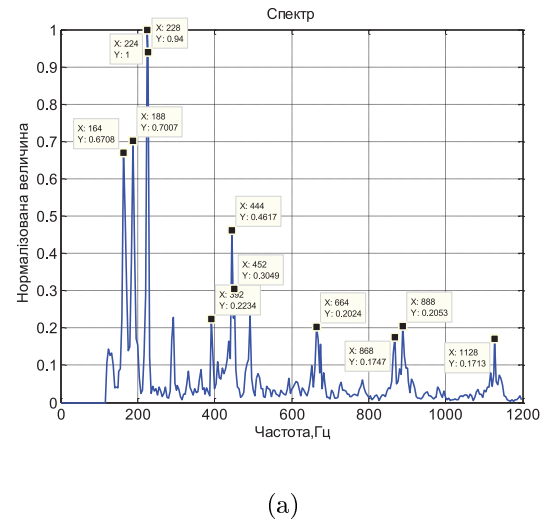


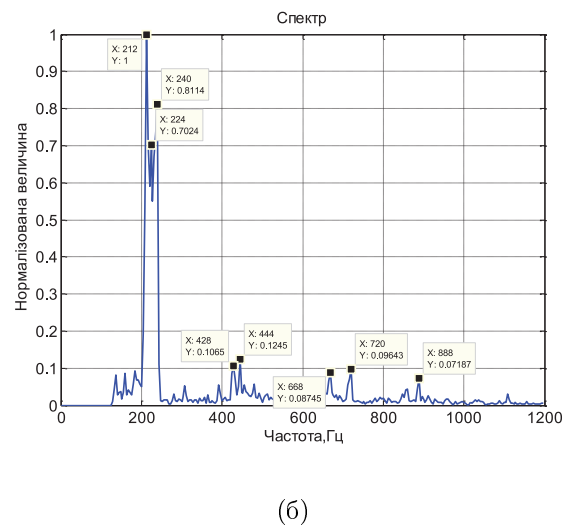
Рис. 5. Пеленгограма

Порівнюємо енергетичний та гармонічний способи виявлення МЛА. Для цього розраховувалась СЩП методом Уелча для сегментів запису зроблених по траєкторії польоту. Аналіз спектрального складу акустичного випромінювання дрона на відстані приблизно 20 м (Рис. 6а) демонструє чотири основних тони випромінювання 164 Гц, 188 Гц, 224 Гц та чотири групи гармонічних складових.

На відстані 50 м від мікрофонів змінилися частоти, відносні рівні основних тонів та їх гармонік (Рис. 6б), що вказує на зміну режиму польоту, наявність у дрона, як джерела звуку, властивості просторової спрямованості та ослаблення гармонічних складових звуку за рахунок розсіяння і поглинання в шарах атмосфери. Треба зауважити на відхилення гармонічних частот від закону кратності основному тону.



(а)



(б)

Рис. 6. Спектри акустичного випромінювання дрона в залежності від відстані до мікрофонів: (а) – відстань 20 м, (б) – відстань 50 м

На більших відстанях визначити всі чотири основні тони випромінювання, а тим більше їх гармоніки, не вдалось. Тому застосування гармонічного способу (1) для дальнього виявлення дронів з декількома двигунами є проблематичним. Перевага виявлення МЛА по дальності на боці енергетичного підходу, який враховує вклад всіх спектральних складових випромінювання і не залежить від типу дрона.

Розпізнавання бажано вести методами, які не потребують великих баз акустичних сигнатур та їх постійного поповнення. Таким є підхід оснований на оцінці структури спектру акустичного випромінювання МЛА. Теоретичні оцінки та дослідження спектрів акустичних сигнатур підтверджують наявність частот основних тонів випромінювання відповідно до кількості електричних двигунів. Ці характеристики, з урахуванням кількості лопатей пропелера, можна використати у якості класифікаційних ознак. У наведеному експерименті МЛА

класифікується на відстані 50 м по трьом частотам основних тонів (Рис. 6б) як трикоптер, а на відстані 20 м по чотирьом основним частотам (Рис. 6а) як квадрокоптер. Достовірність розпізнання збільшується з наближенням дрона, тобто із зростанням відношення сигнал/завада. Можна прогнозувати збільшення відстані достовірної класифікації за рахунок покращення просторової селективності приймача.

Висновки

1. В роботі розглянуті ряд методів та способів виявлення, локалізації та ідентифікації МЛА за акустичним випромінюванням. Встановлено переваги та недоліки окремих способів та запропоновано послідовність дій для вирішення поставленої задачі:

- спостереження простору вести методом КПКХ, який має кращі пеленгаційні характеристики – гостроту основного піку, по якій визначається кут приходу хвилі, та незначні бічні максимуми;

- прийняття рішення про виявлення МЛА проводити енергетичним методом по наперед заданим характеристикам виявлення;

- ідентифікацію проводити з урахуванням конкретних ознак притаманних МЛА, а саме відповідності кількості двигунів та діапазону частот їх обертання в режимі польоту кількості частот основних тонів та діапазону їх зміни у спектральній сигнатурі.

2. Перевірка запропонованої послідовності дій здійснювалась по експериментальним даним приведеним в роботі [9]. Результати обробки записів аудіофайлів польоту МЛА та проведені розрахунки можна оцінювати як задовільні. Визначення кута приходу звукової хвилі по пеленгограмі було близьким до очікуваного в 90°. Виявити МЛА вдалось на відстані 90 м, а класифікувати МЛА як квадрокоптер почали з 20 м. Недоліки експериментів та можливі шляхи їх усунення:

- додаткові максимуми на пеленгаційній характеристиці отримані методом КПКХ (Рис. 4) та зареєстровані на пеленгограмі у вигляді кольорових плям (Рис. 5) викликані невідповідністю розміру акустичної бази досліджуваному частотному діапазону. Можуть бути усунені збільшенням кількості мікрофонів та оптимізацією хвильового розміру бази;

- розмиття треку пояснюється динамікою руху МЛА та зміною стану атмосфери. Шляхи покращення – застосування алгоритмів статистичної обробки та фільтрації даних;

- покращити класифікаційні характеристики із зростанням відстані можна збільшенням просторової селективності приймача та розширенням вектору інформаційних ознак.

Перелік посилань

1. Birch G. C. UAS Detection, Classification, and Neutralization: Market Survey 2015 / G. C. Birch, J. C. Griffin, M. K. Erdman // Sandia Rep. – 2015. – С. 74. <https://doi.org/10.2172/1222445>.
2. Park S. Survey on Anti-Drone Systems: Components, Designs, and Challenges / S. Park, H. T. Kim, S. Lee, H. Joo, H. Kim // IEEE Access. – 2021. – Т. 9. – С. 42635-42659. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3065926.
3. Sinibaldi G. Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV / G. Sinibaldi, L. Marino // Applied Acoustics. – 2013. – Т. 74, №. 1. – С. 79-88. doi:10.1016/j.apacoust.2012.06.011.
4. Cabell R. Measured Noise from Small Unmanned Aerial vehicles / R. Cabell, F. Grosveld, R. McSwain // Inter-Noise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings. – Institute of Noise Control Engineering, 2016. – Т. 252, №. 2. – С. 345-354.
5. Карташов В. М. Информационные характеристики звукового излучения малых беспилотных летательных аппаратов / В. М. Карташов, В. Н. Олейников, С. А. Шейко, С. И. Бабкин, И. В. Корытцев, О. В. Зубков, М. А. Анохин // Радиотехника. – 2017. – Вып. 191. – С. 181-187. <https://openarchive.nure.ua/handle/document/5740>.
6. Державні будівельні норми України. Захист територій, будинків і споруд від шуму ДБН В.1.1-31:2013. БУДСТАНДАРТ Online.
7. Козерук С. О., Коржик О. В. Виявлення малих літальних апаратів за акустичним випромінюванням // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радиотехніка, Радіоапаратобудування. – 2019. – №. 76. – С. 15-20. <http://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1537>.
8. Mandal S. Acoustic Detection of Drones through Real-time Audio Attribute Prediction / S. Mandal, L. Chen, V. Alaparthi, M. L. Cummings // AIAA Scitech 2020 Forum. – 2020. – С. 491. <https://doi.org/10.2514/6.2020-0491>.
9. Козерук С. О., Коржик О. В. Кореляційний пеленгатор малих літальних апаратів // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радиотехніка, Радіоапаратобудування. – 2019. – №. 79. – С. 41-47. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.79.41-47>.
10. Benyamin M. and Goldman G. H. Acoustic Detection and Tracking of a Class I UAS with a Small Tetrahedral Microphone Array // Army Research Laboratory, Adelphi, MD 20783-1138. – 2014. – 26 p. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA610599.pdf>.
11. Козерук С. О., Коржик О. В., Воловик Д. І., Пуха Г. С. Акустичний модуль для пеленгування малих літальних апаратів // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радиотехніка, Радіоапаратобудування. – №.82, с. 25-34. doi: 10.20535/RADAP.2020.82.25-34.
12. Case E. E., Zelnio A. M. and Rigling B. D. Low-Cost Acoustic Array for Small UAV Detection and Tracking // 2008 IEEE National Aerospace and Electronics Conference. – 2008. – pp. 110-113. doi: 10.1109/NAECON.2008.4806528.
13. Harvey B., O'Young S. Acoustic Detection of a Fixed-Wing UAV // Drones. – 2018. – Т. 2, №. 1. – С. 4. doi:10.3390/drones2010004.

14. Mezei J., Molnár A. Drone sound detection by correlation // 2016 IEEE 11th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI). – 2016. – С. 509-518. DOI: 10.1109/SACI.2016.7507430.
15. Bernardini A., Mangiatordi F., Pallotti E., Capodiferro L. Drone detection by acoustic signature identification // Electronic Imaging. – 2017. – Vol. 10. – С. 60-64. DOI:10.2352/ISSN.2470-1173.2017.10.IMAWM-168.
16. Олейников В. Н. и др. Исследование эффективности обнаружения и распознавания малоразмерных беспилотных летательных аппаратов по их акустическому излучению // Радиотехника. – 2018. – Т. 4, №. 195. – С. 209-217. https://nure.ua/wp-content/uploads/2018/Scientific_editions/rvmnts_2018_195_23.pdf.
17. 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). – 2019. – С. 1-7. doi: 10.1109/HST47167.2019.9032916.
18. Benyamin M. and Goldman G. H. (2014). Acoustic Detection and Tracking of a Class I UAS with a Small Tetrahedral Microphone Array. *Army Research Laboratory*, Adelphi, MD 20783-1138, 26 p.
19. Kozeruk S. O., Korzhik O. V., Volovik D. I., Pukha G. S. (2020). Acoustic Module for Direction Finding of Small Aircraft. *Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaparato buduvannia*, Vol. 82, pp. 25-34. doi: 10.20535/RADAP.2020.82.25-34. [In Ukrainian].
20. 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.
21. Harvey B., O'Young S. (2018). Acoustic Detection of a Fixed-Wing UAV. *Drones*, Vol. 2(1), 4. doi:10.3390/drones2010004.
22. Mezei J., Molnár A. (2016). Drone sound detection by correlation. *2016 IEEE 11th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, pp. 509-518. DOI: 10.1109/SACI.2016.7507430.
23. Bernardini A., Mangiatordi F., Pallotti E., Capodiferro L. (2017). Drone detection by acoustic signature identification. *Electronic Imaging*, Vol. 10, pp. 60-64. DOI:10.2352/ISSN.2470-1173.2017.10.IMAWM-168.
24. Oleinikov V. N. et al. (2018). Study of the efficiency of detection and recognition of small-sized unmanned aerial vehicles by their acoustic radiation [Issledovanie effektivnosti obnaruzheniya i raspoznavaniya malorazmernih bespilotnykh letatel'nykh apparatov po ih akusticheskomu izluchenyu]. *Radio engineering*, Vol. 4, Iss. 195, pp. 209-217. [In Russian].
25. Sedunov A. et al. (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.

References

- [1] Birch G. C., Griffin J. C., Erdman M. K. (2015). UAS Detection, Classification, and Neutralization: Market Survey 2015. *SANDIA REPORT*, 74 p. doi:10.2172/1222445.
- [2] Park S., Kim H. T., Lee S., Joo H. and Kim H. (2021). Survey on Anti-Drone Systems: Components, Designs, and Challenges. *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 42635-42659. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3065926.
- [3] Sinibaldi G., 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] Cabell R., McSwain R., Grosveld F. (2016). Measured Noise from Small Unmanned Aerial Vehicles. *Inter-Noise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings*, Institute of Noise Control Engineering, Vol. 252, Iss. 2, pp. 345-354.
- [5] Kartashov V. M. et al. (2017). Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles [Informacionnye harakteristiki zvukovogo izlucheniya malyh bespilotnykh letatel'nykh apparatov]. *Radio engineering*, Iss. 191, pp. 181-187. [In Russian].
- [6] State building regulations of Ukraine. Protection of territories, buildings and structures from noise DBN V.1.1-31:2013 [Derzhavni budivelni normy Ukrainy. Zakhyst terytorii, budynkiv i sporud vid shumu DBN V.1.1-31:2013]. *BUDSTANDART Online*. [In Ukrainian].
- [7] Kozeruk S. O., Korzhik O. V. (2019). Detection Small Aircraft by Acoustic Radiation. *Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaparato buduvannia*, Vol. 76, pp. 15-20. [In Ukrainian].
- [8] Mandal S., Chen L., Alaparthi V., Cummings M. L. (2020). Acoustic Detection of Drones through Real-time Audio Attribute Prediction. *AIAA Scitech 2020 Forum*. doi:10.2514/6.2020-0491.
- [9] Kozeruk S. O., Korzhik O. V. (2019). Correlation direction finder for small aircraft. *Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaparato buduvannia*, Vol. 79, pp. 41-47. doi: 10.20535/RADAP.2019.79.41-47. [In Ukrainian].

Detection, Localization, and Identification of Small Aircraft by Acoustic Radiation

Kozeruk S. O., Korzhik O. V.

Introduction. Small unmanned aerial vehicles (UAV), or drones, have recently been increasingly used in community service: environmental monitoring services, protection of territories and facilities, postal and courier services, and household services for individual needs. The growth of the drone market and their high availability is having the opposite effect, as more and more opportunities are being created for the use of small aircraft in criminal and terrorist acts. There is a need to develop means of monitoring the airspace of the location and identification of the drone in the presence of natural and industrial obstacles. The paper considers some approaches to localization and identification of small aircraft by their acoustic radiation.

Theoretical Results. A number of methods and ways to detect, localize, and identify MLA by acoustic radiation were considered. The advantages and disadvantages of some methods are identified and a sequence of solutions is proposed:

to conduct observations by the method of controlled correlation spatial characteristics;

decision-making on the detection of the drone to be carried out by the energy method according to the predetermined characteristics of the detection;

identification of the emitter should be carried out taking into account the correspondence of the number of motors and the range of frequencies of their rotation in the flight mode the number of fundamental frequencies in the spectral signature.

Experiment. Verification of the proposed algorithm was carried out according to experimental data given in [9].

The results of processing the records made in the above sequence can be assessed as satisfactory. Determining the angle of arrival of the sound wave according to the direction-finding was close to the expected 90° . The aircraft was identified as a drone at a maximum detection distance 90 m, and the UAV as a quadcopter began to be classified from 20 m.

Keywords: unmanned aerial vehicles; direction finding; identification