

УДК 621.396

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.58-63>В.І. Чигінь¹, М.М. Проценко², Ю.В. Шабатура¹, М.В. Бугайов²¹Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів²Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова

ВДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБУ ВИЯВЛЕННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ

Запропоновано вдосконалений спосіб, доведений до практичного алгоритму, та макет комплексу для виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) за результатами спектрального аналізу акустичних сигналів. Показано, що акустичний сигнал, створюваний БПЛА, можна представити сумою гармонічних складових. Критерієм надійного виявлення БПЛА є знаходження у прийнятному акустичному сигналі як мінімум трьох характерних гармонік. Працездатність запропонованого алгоритму перевірена за допомогою макета комплексу акустичного виявлення в реальних умовах. Для проведення експерименту використовувалися безпілотні авіаційні комплекси “Фурія” і “Лелека 100”.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, акустичний сигнал, відношення сигнал/шум, порогове опрацювання, показник статистичної якості

Постановка проблеми

Демаскуючим фактором, який сприяє виявленню БПЛА, є акустичні сигнали, що модулюються частотою обертання ротора двигуна. Існує можливість їх виділення на фоні інших сигналів [1-2]. Проблема виявлення БПЛА за рахунок аналізу акустичних сигналів полягає в:

- необхідності врахування гідрометеорологічних умов поширення, затухання акустичних сигналів в атмосфері і змін інтенсивності регіонального акустичного фону;

- обчисленні дальності прийому акустичних сигналів певної інтенсивності в заданій смузі частот засобами прийому із заданою чутливістю та діаграмою спрямованості звукоприймача;

- необхідності врахування особливостей польоту БПЛА, висота якого може змінюватися до декількох кілометрів, а швидкість, як правило, не перевищує 200 км/год.

Створення алгоритмів виявлення БПЛА за результатами аналізу акустичних сигналів є актуальним завданням сьогодення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На даний час ряд публікацій як вітчизняних, так і закордонних авторів присвячено проблемним питанням виявлення БПЛА [1-4]. В [1] наведено метод виявлення БПЛА на основі аналізу їх сигнатур в акустичному та радіолокаційному діапазоні, але не надано практичного варіанта його реалізації. У [2] проведено дослідження рівня шуму БПЛА за умови, що він летить з постійною

швидкістю, а траєкторія його руху є прямолінійною. У [3] показано, що в акустичний сигнал БПЛА з бензиновим двигуном найбільший внесок робить випромінювання від викидів двигуна, у роботі [4] проведено експериментальні дослідження рівня шуму БПЛА “Стрепет-М”. Проте питання створення алгоритмів виявлення БПЛА за рахунок аналізу акустичних сигналів та практичної їх реалізації на даний час недостатньо опрацьовано.

Формулювання мети статті

Метою роботи є вдосконалення способу виявлення БПЛА за результатами спектрального аналізу їх акустичного сигналу.

Виклад основного матеріалу

Важливою передумовою застосування акустичного методу виявлення БПЛА є встановлення критичного значення порогу акустичного сигналу, після досягнення якого приймається рішення про застосування спеціального алгоритму дослідження акустичного сигналу з метою виявлення та ідентифікації БПЛА. Розглянемо детальніше цей алгоритм.

Алгоритм обчислення порогу. Дослідження спектра акустичного сигналу від різних типів БПЛА показали наявність у ньому кількох характерних гармонік. Таким чином, у ролі необхідного, але недостатнього критерію виявлення БПЛА задаємо наявність в акустичному сигналі трьох характерних гармонік. У якості додаткової умови відповідності гармонік акустичним сигналам БПЛА вибираємо значення частотного рознесення між ними. Якщо

допустити, що мінімальна частота обертання ротора БПЛА з електричним двигуном (ЕД) становить 6000 об/хв, що відповідатиме частотному рознесенню 100 Гц, а максимальна частота – 11000 об/хв, що для гвинта з двома лопатями відповідатиме частотному рознесенню 360 Гц, то при використанні частоти дискретизації акустичного сигналу 8 кГц і довжини послідовності аналізу в 512 вибірок діапазон частотного рознесення в бінах (дискретах відліків) становитиме $\Delta k = [k_{min} \div k_{max}] = [6 \div 24]$.

При виборі такого критерію виникає задача щодо обчислення значення деякого порогового рівня γ в заданій частотній області. Досить широкого поширення набуло обчислення, яке базується на стабілізації ймовірності прийняття помилкового рішення, а саме – хибної тривоги P_{FA} [5], що визначається лише середньоквадратичним відхиленням спектральної щільності потужності (СЩП) шуму,

$$\gamma = -2\sqrt{\text{var}(X)} \ln(P_{FA}), \quad (1)$$

де $\text{var}(X) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (X[k] - \bar{X})^2$ – дисперсія прийня-

того вхідного сигналу за умови, що акустичний сигнал БПЛА у ньому відсутній;

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X[k] - \text{оцінка середнього значення}$$

сигналу на інтервалі спостереження;

N – кількість відліків акустичного сигналу;

$X[k]$ – значення відліків.

Значення порогоу для заданого критерію виявлення необхідно обирати як з огляду на параметри самого сигналу, так і з урахуванням відношення сигнал/шум (ВСШ). Оскільки акустичний давач є пасивним пристроєм спостереження, то визначення робочого значення ВСШ є досить складним завданням. Разом з тим необхідно зауважити, що поява акустичного сигналу БПЛА є подією з дуже малою ймовірністю. У зв'язку з цим алгоритми опрацювання сигналів використовуватимуть в основному шум навколишнього середовища. Таким чином, на основі отриманої статистики можна визначити дисперсію шуму і для заданої ймовірності хибної тривоги P_{FA} сформулювати значення порогового рівня γ відповідно до виразу (1).

Однак при високих значеннях ВСШ ($q_{ex}^2 > 10$ дБ) і низькій якості спектральних оцінок обчислене значення порогоу може виявитись заниженим, а тому кількість бінів, які перевищують поріг, буде дуже великою, що ускладнить виконання подальших алгоритмів виділення кратних гармонічних складових. Тому необхідно провести уточнення значення порогоу на випадок появи великої кількості гармонік, що його перевищили.

Для цього доцільно використовувати отримане для прийнятої послідовності відліків значення статистичного показника якості Q СЩП, який обчислюється за формулою

$$Q = \frac{\text{var}(X)}{(\bar{X})^2}. \quad (2)$$

Цей показник безпосередньо зв'язаний зі статистичною стійкістю спектральної оцінки. Для незначної кількості вузьких піків СЩП, що відповідає акустичному сигналу БПЛА літакового типу, \bar{X} буде малим, а Q – великим. Цей випадок відповідає високим значенням ВСШ. При зменшенні ВСШ кількість шумових викидів та їх амплітуда зростатиме, що призведе до збільшення значення \bar{X} , а це, у свою чергу, зменшить значення Q . Відповідну процедуру уточнення робочого значення порогоу γ' можна подати у вигляді алгоритму (рис. 1).

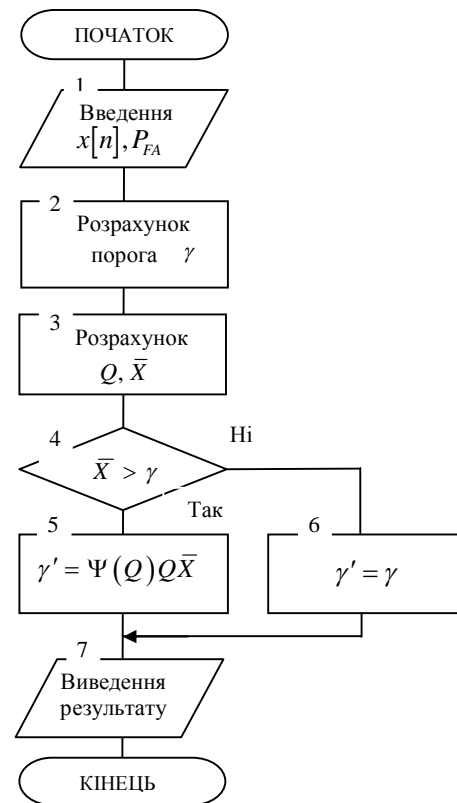


Рис. 1. Алгоритм обчислення значення порогоу

Вхідними величинами для даного алгоритму виступають амплітуди вибірок вхідного акустичного сигналу $x[n]$ та значення хибної тривоги P_{FA} . Далі проводиться обчислення порогоу, значення статистичного показника якості і середнього значення сигналу на інтервалі спостереження. У блоці 4 середнє значення сигналу порівнюють із отриманим значенням порогоу. Якщо значення \bar{X} не

перевищують значення γ , то попередньо обчислене значення порогу приймається за критеріальне. У протилежному випадку здійснюється уточнююче обчислення значення порогу за формулою

$$\Psi(Q) \propto \bar{X},$$

де $\Psi(Q)$ – функціональний коефіцієнт. $\Psi(Q)$ має досить складну функціональну залежність від Q . Можна лише вказати на його спадний характер при збільшенні Q . У ході експериментальних досліджень було встановлено, що при високих значеннях ВСШ різні БПЛА мають різні значення Q . Найвищими вони є для БПЛА з електричними двигунами (60–180), дещо нижчими – для двигунів внутрішнього згорання (60–30) і найнижчими – для БПЛА мультироторного типу (менше 30). Проте дані значення можуть відрізнитися від наведених і відображають лише загальну тенденцію зміни Q для різних типів БПЛА. Однак попри це у першому наближенні отримані експериментальним шляхом значення $\Psi(Q)$ можна використовувати для формування значення порогу γ' . Апроксимуюча аналітична залежність $\Psi(Q)$ має такий вигляд:

$$\Psi(Q) = C_1 Q^{-1} + C_2, \quad (3)$$

де $C_1 = 0,762$ і $C_2 = -0,051$ – коефіцієнти, отримані методом найменших квадратів.

Таким чином, у результаті використання даного алгоритму поріг γ' буде обчислюватися за характеристиками самого сигналу, а при низьких значеннях відношення сигнал/шум – за значенням дисперсії шуму. Зменшення ВСШ призведе до підвищення порогу, у результаті чого менша кількість максимумів СЩП, що відповідають гармонікам акустичного випромінювання БПЛА, буде виявлена.

Алгоритм виявлення акустичних сигналів БПЛА. Основним недоліком алгоритмів виявлення акустичних сигналів, що були запропоновані раніше, є те, що вони адаптовані під нестационарні сигнали (вибух, постріл). Виявлення в таких алгоритмах здійснюється за фактом перевищення порогу за амплітудою. Для надійного виявлення стаціонарних сигналів, яким, зокрема, є акустичний сигнал від БПЛА, аналіз доцільно проводити в частотній області.

Запропонований алгоритм виявлення акустичних сигналів БПЛА надано на рис. 2. Вхідними величинами для даного алгоритму є вибірки вхідного акустичного сигналу $x[n]$, які проходять через смуговий фільтр (блок 3). Для подання сигналу в частотній області був обраний метод спектрального оцінювання на основі періодограми без обробки віконною функцією. Обчислення періодограми $X[k]$ виконується у блоці 4. Отримані значення відліків

(бінів) у частотній області порівнюються з робочим значенням порогу γ' (блок 5). Оскільки енергія гармонічної складової після отримання періодограми зосереджена, як правило, у кількох сусідніх бінах, то для зменшення кількості частотних відліків, які перевищили поріг, з трьох сусідніх бінів обираємо один із більшою амплітудою. На виході з блока 5 формується масив із L бінів.

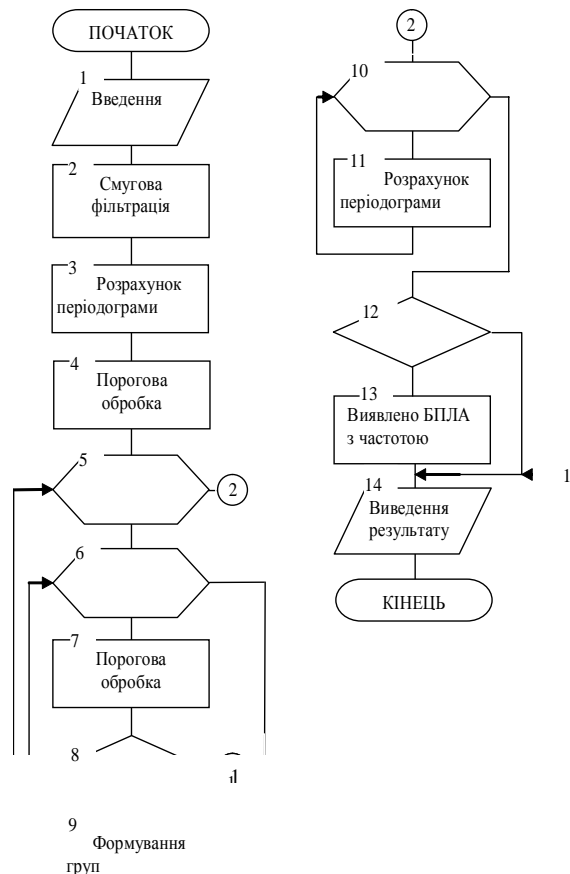


Рис. 2. Алгоритм виявлення акустичних сигналів БПЛА

У блоці 8 послідовно обчислюють різниці між кожним попереднім номером біна та кожним наступним. У результаті даних операцій формується $L-1$ наборів різниць Δ_{p_i} значень номерів бінів, причому кількість даних значень при кожній наступній ітерації зменшується на одиницю. У блоці 9 відкидаються ті значення Δ_{p_i} , що виходять за межі інтервалу $[k_{min}, k_{max}]$. Також у даному блоці відбувається порівняння максимального номера біна k'_{max} , що перевищив поріг, зі значенням k'_{max} . Фактично, це означає визначення смуги частот, яку займає вхідний сигнал. На практиці k'_{max} необхідно обирати в межах, що відповідають частоті 300–400 Гц. Це

виключить можливість спрацьовування алгоритму за іншими цілями, що також є джерелами гармонічного акустичного випромінювання.

У блоці 10 всі однакові значення Δ_{p_i} об'єднуються у групи і формується новий масив $k_j = k_1, k_2, \dots, k_J$, де J – кількість груп однакових Δ_{p_i} . У блоці 11 обчислюється кількість різниць V у кожній групі. Якщо в групі знаходиться не менше двох однакових значень Δ_{p_i} , то проводиться формування ознаки наявності БПЛА в зоні відповідальності акустичного датчика і видається значення частоти гармоніки з максимальною амплітудою k_X^{max} (блок 14).

Для проведення досліджень щодо виявлення БПЛА за результатом аналізу акустичних сигналів запропоновано наступну функціональну схему макета комплексу (рис. 3).

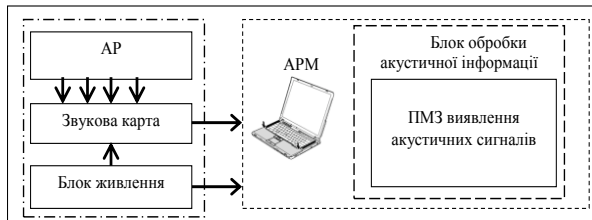


Рис. 3. Функціональна схема макета комплексу акустичного виявлення БПЛА

Основними елементами даної схеми є: мікрофонна акустична решітка (АР); звукова карта; автоматизоване робоче місце (АРМ) з програмно-математичним забезпеченням (ПМЗ); блок живлення (аккумуляторна батарея). На основі функціональної схеми створено макет комплексу акустичного виявлення БПЛА, який показано на рис. 4.



Рис. 4. Макет комплексу акустичного виявлення БПЛА

Акустичні спостереження проводились за допомогою макета комплексу акустичного виявлення в реальних умовах: на відкритій місцевості, швидкість вітру мінялася в межах від 3 до 12 м/с. Для проведення експерименту використовувалися безпілотні авіаційні комплекси “Фурія” та “Лелека 100”.

Під час польоту БПЛА на висоті близько 450 м проводився запис акустичного сигналу та його спектральне оцінювання. Спектр акустичного сигналу, зафіксованого під час польоту БПЛА “Фурія”, наведено на рис. 5.

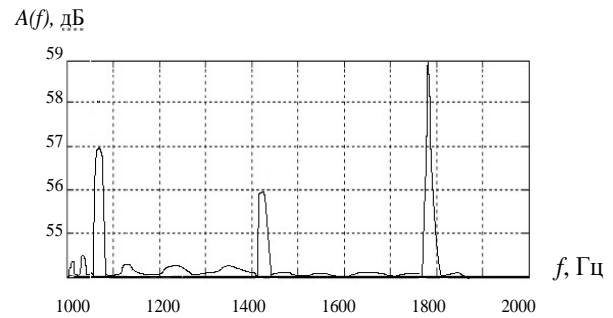


Рис. 5. Спектр акустичного запису БПЛА “Фурія”

Аналіз спектру показав наявність добре виражених дискретних періодичних гармонік. Перша гармоніка появляється на частоті 1068 Гц, наступні – з періодичністю 356 Гц. Надійне акустичне виявлення БПЛА “Фурія” за допомогою запропонованого макетного комплексу здійснювалось на відстані до 500 м. Зміна характеристик спектру залежно від висоти польоту є несуттєвою.

Спектр акустичного сигналу, записаного під час польоту БПЛА “Лелека 100”, показано на рис. 6.

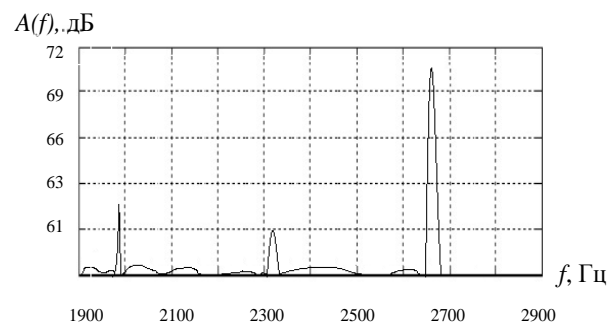


Рис. 6. Спектр акустичного сигналу БПЛА „Лелека 100”

Особливістю спектру акустичного сигналу БПЛА “Лелека 100” є наявність у ньому дискретних періодичних гармонік. Перша гармоніка появляється на частоті 1985 Гц, наступні – з періодичністю 331 Гц.

Зміна характеристик спектру залежно від висоти польоту для даного типу БПЛА також є несуттєвою. Таким чином, аналіз спектру записаних сигналів показав наявність добре виражених дискретних періодичних гармонік в акустичних сигналах від БПЛА.

Для реалізації запропонованих алгоритмів створено спеціалізоване програмно-математичне забезпечення виявлення акустичного сигналу від БПЛА. Робоче вікно програми показано на рис. 7.

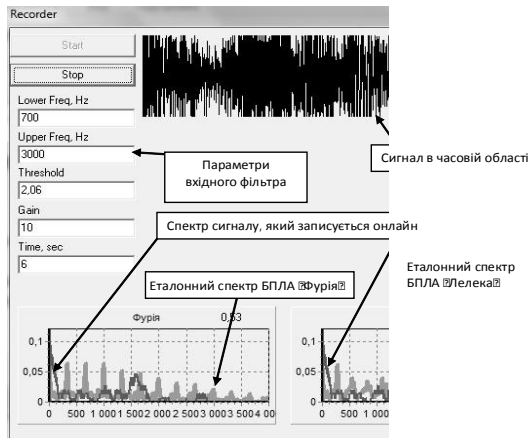


Рис. 7. Робоче вікно програми для виявлення акустичного сигналу від БПЛА

Таким чином, у запропонованому комплексі виявлення БПЛА здійснюється за результатами аналізу спектру акустичного сигналу. У подальшому визначаються гармонічні складові та оцінюються їх несучі частоти. Програмно-математичне забезпечення дозволяє з високою надійністю виявляти акустичний сигнал від БПЛА на значних відстанях.

Висновки

Таким чином, в результаті виконання даного дослідження вдосконалено спосіб виявлення БПЛА на основі аналізу сигналів їх акустичного випромінювання. Показано, що акустичний сигнал від БПЛА є сумою гармонік. Критерієм надійного виявлення таких сигналів обрано наявність у прийнятому сигналі як мінімум трьох гармонічних складових.

У подальших дослідженнях планується вдосконалення запропонованого програмно-математичного забезпечення та макета, що дозволить розширити можливості його використання з врахуванням погодних умов.

Список літератури

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В.И. Чыгинь, М.М. Проценко, Ю.В. Шабатура, Н.В. Бугаёв

Предложен усовершенствованный способ, доведенный до практического алгоритма для обнаружения беспилотных летательных аппаратов на основе анализа сигналов акустического излучения. Показано, что акустический сигнал БПЛА представляет собой сумму гармоник. Критерием надежного обнаружения таких сигналов есть наличие в принятом сигнале как минимум трех гармонических составляющих. Работоспособность предложенного алгоритма проверена с помощью макета комплекса акустического выявления в реальных условиях. Для проведения эксперимента использовались беспилотные авиационные комплексы "Фурія" и "Телека 100".

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; акустический сигнал; отношение сигнал/шум; пороговая обработка; показатель статистического качества.

1. Бугайов М.В. Аналіз ефективності виявлення тактичних безпілотних літальних апаратів пасивними та активними засобами спостереження / М.В. Бугайов, Ю.Г. Даник // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. – Житомир: ЖВІ ДУТ, 2015. – Вип. 10. – С. 5–19.

2. Saravanakumar A. Exploitation of Acoustic signature of low flying Aircraft using Acoustic Vector sensor / A. Saravanakumar, K. Senthilkumar // Defence Science Journal. – March 2014. – Vol. 64, No. 2. – P. 95–98.

3. Самохин В.Ф. Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевым движителем в толкающей компоновке / В.Ф. Самохин, С.П. Остроухов, П.А. Мошков // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2012. – Вып. № 70. – С. 1–24.

4. Соловійов О.В. Експериментальні дослідження рівня шуму «Стрепет-М» / О.В. Соловійов // Збірник наукових праць Харківського ун-ту Повітряних Сил. – 2010. – Вип. 2 (24). – С. 36–39.

5. Sadasivan S. Acoustic Signature of an Unmanned Air Vehicle – Exploitation for Aircraft Localisation and Parameter Estimation / S. Sadasivan, M. Gurubasavaraj, S. Ravi Sekar // Eronautical DEF SCI J. – 2001. – Vol. 51, N. 3. – P. 279–283.

6. Проценко М.М. Аналіз структури та варіантів побудови безпілотних авіаційних комплексів / М.М. Проценко // Вісник ЖДТУ. – Житомир : ЖДТУ, 2012. – № 61 (2). – С. 113–117.

7. Massey K. Noise Measurements of Tactical UAVs / K. Massey, R. Gaeta // 16th AIAA 2010-3911/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2010. – P. 1–16.

8. Marino L. Experimental analysis of UAV-propellers noise / L. Marino // 16th AIAA 2010-3854/ CEAS Aeroacoustics Conference. – 2010. – P. 1–14.

9. Pham T. TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs / T. Pham, N. Srour // U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE. – 2004. – Vol. 5417. – P. 24–29.

10. Соловьёв В.А. Проблемы обнаружения беспилотных летательных аппаратов оптико-электронными устройствами / В.А. Соловьёв // Электронный математический и медико-биологический журнал. – Т. 10. – 2011. – Вып. 3. – С. 1.

Рецензент: доктор фізико-математичних наук С.З. Малинич, Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів.

IMPROVEMENT OF UNMANNED AERIAL VEHICLES DETECTION METHOD BY SPECTRAL ANALYSIS OF ACOUSTIC SIGNALS

V. Chyhin, M. Protsenko, Yu. Shabatura, M. Buhaiov

The creation of algorithms for the detection of unmanned aerial vehicles (UAVs) based on the analysis of acoustic signals is an actual problem of the present. To solve such problem, it is necessary to correctly take into account the conditions for the propagation of acoustic signals in the atmosphere, as well as the characteristics of UAV flight, the height of which can vary up to several kilometers, and the speed can reach 200 km/h.

The purpose of this study is to improve the UAV detection method by the results of spectral analysis of their acoustic signal. The investigations of the spectrum of acoustic signals from various types of UAV showed the presence of several characteristic harmonics in it. The criterion for a reliable detection of UAV is finding at least three characteristic harmonics in a received acoustic signal. The input values for this algorithm are samples of the input acoustic signal passing through the bandpass filter. To represent the signal in the frequency domain, the method of spectral estimation based on the periodogram without a window function has been selected.

In this work the improved method and the complex layout for detection of unmanned aerial vehicles (UAV) based on the results of spectral analysis of acoustic signals are proposed. To implement the proposed algorithm, a specialized software and mathematical support for detecting an acoustic signal from the UAV were created. They allow with high reliability to detect an acoustic signal from the UAV at distances of about 1 kilometer. The efficiency of the proposed algorithm is verified using the layout of the acoustic detection complex in real conditions. Unmanned aerial systems "Fury" and "Leleka 100" were used in the experiment.

Thus, it is shown that the acoustic signal created by UAV can be represented as the sum of harmonic components. The criterion for a reliable detection of UAV is finding at least three characteristic harmonics in a received acoustic signal.

Keywords: *unmanned aerial vehicle; acoustic signal; signal/noise ratio; threshold processing; indicator of statistical.*
