

Удосконалена система шумопеленгування безпілотних літальних апаратів

Козак А. В., ORCID [0000-0002-4756-7931](https://orcid.org/0000-0002-4756-7931)

Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем, ames.kpi.ua

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)

Київ, Україна

Анотація—Робота присвячена питанням розвитку акустичного напрямку створення засобів виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА). В основу роботи вказаних засобів покладено принципи шумопеленгування з використанням таких наймінливіших характеристик акустичного поля, як: інтенсивність звуку, частотний спектр та просторовий спектр. Архітектура пристроїв виявлення БПЛА за акустичним полем відповідає алгоритмам відтворення в окремих трактах пристрою ідеології ресстрації та контролю динаміки змінення характеристики акустичного поля, яке визначає вказане змінення як факт виявлення. Технічна реалізація запропонованих вище пристроїв виявлення полягає у створенні тракту паралельних октавних, 1/2 октавних та 1/3 октавних фільтрів, тракту вузькосмугової фільтрації та тракту виявлення за потужністю (інтенсивністю).

З метою удосконалення та збільшення надійності виявлення шумопеленгатор доповнено трактом виявлення за взаємним спектром і трактом кореляційного методу пеленгування.

Обробка вхідної акустичної інформації виду специфічного шумоподібного сигналу здійснюється шляхом застосування інструментального лабораторного пакету програм Lab View та Math Lab. Додамо, що стаття містить теоретичні і практичні результати вимірювань шумового навантаження і дальності дії шумопеленгатора. Експериментальні дослідження в частині виявлення та вимірювання основних характеристик пристрою проведено в лабораторних та натурних умовах.

При цьому сьогодні демонструє швидкий розвиток парку БПЛА, що обумовлює актуальність роботи, а розробка пристрою як засобу протидії малим літальним апаратам різного призначення – становить її мету.

Ключові слова — безпілотний літальний апарат; інтенсивність; рівні звукового тиску; спектральні характеристики.

I. ВСТУП

В реаліях сьогодення проблема повітряного шумопеленгування обумовлена масовим використанням і швидкими темпами розвитку парку безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Крім того, якщо відомості щодо конструкції та аеро-динамічних якостей БПЛА є відомими [1], [2], то відомості про акустичні характеристики БПЛА – вельми незначні. Проте, зауважимо, що певні відомості про спектральні характеристики шумовипромінення подані в роботі [3].

У свою чергу широке коло задач і відповідний ряд спеціалізованих БПЛА вказаного типу вимагають строгого визначення багатьох технічних характеристик дрону, однією з яких є рівень акустичного навантаження на робоче середовище. Технічні характеристики дронів мають розглядатися у взаємозв'язку з ефективністю та скритністю застосування, а основні характеристики акустичного поля, що утворюється БПЛА, підлягають вимірюванню, аналізу і нормуванню. У реаліях сучасної України найпоширенішим у загальному доступі цивільним підкласом є дрони саме роторного типу, наприклад моделі DJI Phantom 3, 4, Autel Robotics X-Star. Крім того ви-

кликає цікавість використання в якості засобу вимірювання не тільки традиційного інструментарію, а й оригінальних комбінованих пристроїв виявлення БПЛА та створення віртуальних інструментів для пеленгування і виявлення на основі лабораторного пакету програм Lab View та Math Lab.

Отже, базуючись на залучених з роботи [3] даних про спектральні характеристики БПЛА, припустимо, що одним з перспективних напрямків створення пристроїв виявлення БПЛА можна вважати розробку системи трактів виявлення на основі акустичних принципів роботи, використовуючи методи виявлення, які встановлюють факт наявності корисного шумоподібного процесу в робочому повітряному середовищі.

II. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Ідеологія побудови пристроїв виявлення базується на мінливості і фізичних проявів змін таких характеристик акустичних шумів як:

- інтенсивність звуку на просторово — часовому інтервалі спостереження;
- широкосмугова фільтрація;



- вузько смугова фільтрація;
- кореляційні характеристики.

Відзначимо також, що ідея вимірювання інтенсивності і прийняття відповідного рішення щодо виявлення цілі не є новою (див., наприклад, роботи дже-релах [4]–[9]).

Проте, реалізація шумопеленгатора на основі лише вимірювання інтенсивності не є оптимальною, тому для підвищення надійності застосовано також вузькосмугову та широкосмугову фільтрацію і тракт кореляційного пеленгування.

Для широкосмугової фільтрації застосовано гребінку тритиноктавних смугових та напівоктавних фільтрів.

Тракт кореляційного методу пеленгування реалізує визначення змінень коефіцієнту автокореляції та відповідного цьому електричного параметру (скажімо, струму через коло індикації) в тракті обробки в ситуаціях фіксації напрямку на ціль.

Отже, запропонована система виявлення корисних шумоподібних сигналів має містити чотири трак-ти, фізична реалізація виявлення в яких виконується програмною реалізацією алгоритмів виявлення та пороговою обробкою і індикацією результатів [10].

В даній шумопеленгаційній системі для реалізації кореляційного методу застосовано октавний смуговий НІХ фільтр та набір блоків розрахунку швидкого перетворення Фур'є. Кількість необхідних блоків FFT обумовлена кількістю елементів антенного пристрою. Також під час побудови акустичної антени мають бути враховані засоби симуляції при отриманні однопелюсткових характеристик спрямованості [11].

В зв'язку з вищенаведеним, технічна реалізація проблеми створення шумопеленгаторних станцій для виявлення БПЛА є цікавою і такою, що може бути швидко впроваджена, в практику застосування а отже, матеріали роботи є своєчасними і актуальними.

III. КОНСТРУКЦІЯ АНТЕНИ ТА ТРАКТ КОРЕЛЯЦІЙНОГО МЕТОДУ ПЕЛЕНГУВАННЯ

Для забезпечення виявлення за акустичною потужністю (або інтенсивністю) з подальшим вимірюванням рівня, застосовується зустрічне включення (за допомогою комутації чи з використанням операційних підсилювачів) елементів хрестоподібної групи [12]. Важливою та новою особливістю є те, що у одну з лінійних дискретних акустичних антен зі збільшеною базою додатково встановлено ще два приймачі тиску симетрично відносно фазового центру (Рис. 1). Додатково встановлені приймачі тиску збільшують кількість способів виявлення та пеленгування, що забезпечує покращення функціональних характеристик у складі шумопеленгаторних акустичних комплексів і підвищує точність виявлення та пеленгування цілей.

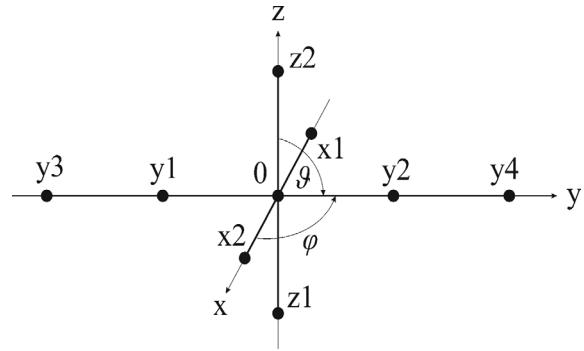


Рис. 1 Мультикомпонентна векторна акустична антена пристроїв виявлення та пеленгування

Дана багатфункціональна дискретна акустична антена, що використовується у складі шумопеленгатора, може не тільки виступати у ролі приймача коливальної швидкості, але й забезпечувати умови роботи кореляційного методу пеленгування.

Кореляційний метод обробки використовується для визначення зв'язку між випроміненими та прийнятими сигналами і застосовується в активній та пасивній локації. Мірою зв'язку процесів будемо вважати кореляційну функцію (КФ), що представляє зв'язок між сигналами розділеними інтервалом часу. Кореляційний аналіз сигналів зводиться до визначення залежності КФ від часу затримки збудження елементів лінійки за Ox або Oy (час затримки — часовий інтервал τ). Якщо фронт хвилі є паралельним лінії антени (скажімо, Ox) величина τ дорівнює нулю, що відповідає максимуму КФ. В свою чергу максимум КФ відповідатиме певним фазовим зміненням електричної характеристики тракту — струму або напруги, реєстрація якої в момент $\tau = 0$ пов'язується з напрямком на об'єкт. В цьому випадку фази на виходах елементів антени — однакові.

Математичні співвідношення, що визначають АКФ та ВКФ, представлені нижче:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot x(t - \tau) dt. \quad (1)$$

Для порівняння двох сигналів $x_1(t)$ та $x_2(t)$ використовують взаємну кореляційну функцію (ВКФ):

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t) \cdot x_2(t - \tau) dt. \quad (2)$$

ВКФ дозволяє знайти взаємний спектр сигналів — взаємну спектральну густину потужності сигналів $x_1(t)$ та $x_2(t)$, $\dot{X}_{12}(\omega)$ використавши перетворення Фур'є:

$$\dot{X}_{12}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{12}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (3)$$

Щодо взаємного спектру (ВС) двох сигналів, то він є результатом перемноження спектру одного сигналу $\dot{X}_1(\omega)$ на комплексно спряжену величину спектру $\dot{X}_2^*(\omega)$ іншого:

$$\dot{X}_{12}(\omega) = \dot{X}_1(\omega)\dot{X}_2^*(\omega). \quad (4)$$

Тому якщо спектри двох сигналів не перекриваються то їх ВС рівний нулю і як наслідок взаємна кореляційна функція теж рівна нулю, отже, сигнали з такими спектрами є некорельованими. Наступним кроком є знаходження з (4) ВС одного і того ж сигналу, в результаті отримаємо енергетичний спектр сигналу $x_1(t)$:

$$\dot{X}_1(\omega)\dot{X}_1^*(\omega) = |X_1(\omega)|^2. \quad (5)$$

Взаємна кореляційна функція двох сигналів знаходиться через обернене перетворення Фур'є від функції їх взаємного спектру [13], [14]:

$$R_{12}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}_{12}(\omega)e^{j\omega\tau} d\omega. \quad (6)$$

При $x_1(t) = x_2(t) = x(t)$, $\tau = 0$, використовуємо співвідношення (2), (5) та (6), отримаємо рівність Парсеваля:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t)dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{X}(\omega)|^2 d\omega \quad (7)$$

Таким чином застосувавши цей метод конкретно для акустичної антени маємо: якщо акустичні промені збігаються за напрямком з перпендикуляром до бази, то електричні напруги, на приймачах, співпадають за фазою. Якщо ж напрямок приходу акустичних променів не збігається з перпендикуляром до бази, то електричні напруги на виходах приймачів будуть зміщені за фазою і часом відносно один одного [15].

IV. РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАННЯ

Розглянемо виявлення цілі за результатами аналізу змінення енергетичних ознак акустичного поля БПЛА та за кореляційними характеристиками цілі як локалізованого шумоподібного об'єкту.

A. Лабораторні вимірювання

Експеримент для визначення акустичних характеристик для виявлення саморобного квадрокоптера з 46 см гвинтами проводився у безеховій кімнаті з розмірами 6,9x4,3x3,3 м. На Рис. 2 зображено координати вимірювальних позицій. Відстані від позицій 1–4 та 1'–4' до вимірювальної поверхні радіусом 1,2 м (пунктирна лінія) однакові і становлять 1,2 м, проте для позицій 1–4 висота складає 2 м, а для позицій 1'–4' – 0,8 м. Вимірювальна позиція 5 має висоту 0,8 м і фактично розміщена біля центральної опори кріпильної стійки [16]. Оскільки геометричні розміри кімнати не дозволяли провести вимірювання у точках 3–4, 3'–4', то поворот дрону здійснювали як вказано стрілками на Рис. 2.

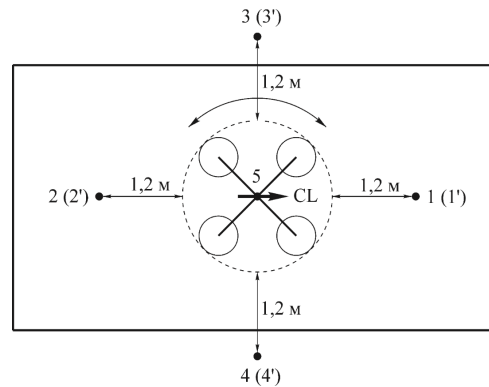


Рис. 2 Вимірювальні позиції

Таким чином, відстань від акустичного центру джерела шуму (дрону) до позицій 1–4 становила $r_{1-4} = 1,53$ м, а до позицій 1'–4' – $r_{1'-4'} = 1,95$ м.

В результаті вимірювань було визначено: рівні звукового тиску у третинно-октавних смугах, рівні спектральної густини тиску та рівні звукової потужності (Таблиці 1–3).

B. Натурні вимірювання

Експеримент з виявлення квадрокоптера Phantom 3 standard проводився за межами міста, в полі, в теплу вологу погоду за температури повітря 20°C. Відчувались пориви вітру, шуми дерев та руху авто автомагістраллю на відстані 1 км.

ТАБЛИЦЯ 1 Рівні звукового тиску у ТРЕТИНО-ОКТАВНИХ СМУГАХ

f , Гц	100	125	160	200	250	
\bar{L}_p , дБ	46,04	25,49	30,82	45,06	39,90	
f , Гц	315	400	500	630	800	1000
\bar{L}_p , дБ	44,62	43,44	44,66	45,11	46,37	45,06

\bar{L}_p - усереднене значення між всіх вимірювальних позицій.

ТАБЛИЦЯ 2 Рівні спектральної густини тиску

f , Гц	100	125	160	200	250	
N_p , дБ	62,0	42,4	47,8	62,0	56,9	
f , Гц	315	400	500	630	800	1000
N_p , дБ	61,6	60,4	61,6	62,0	63,3	62,0

ТАБЛИЦЯ 3 Рівні звукової потужності

f , Гц	100	125	160	200	250	
N_p , дБ	-61,56	-82,96	-79,18	-65,45	-71,56	
f , Гц	315	400	500	630	800	1000
N_p , дБ	-68,05	-70,27	-69,92	-70,48	-70,40	-72,54



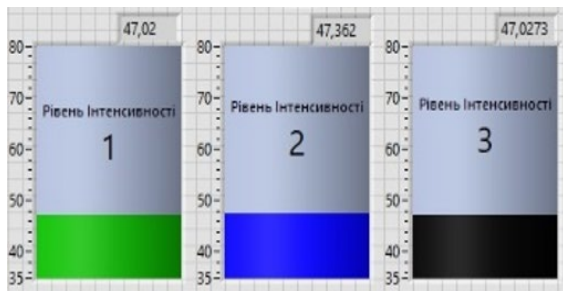


Рис. 3 Блок відображення рівнів інтенсивності

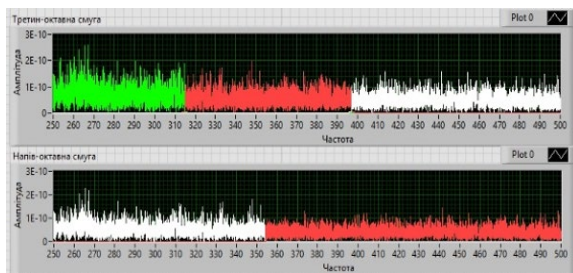


Рис. 4 Третинно-октавна та напів-октавна смуги

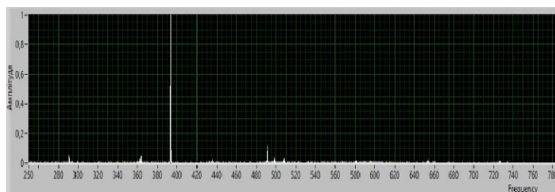


Рис. 5 Приклад роботи тракту взаємного спектру у випадку висоти розташування над землею 10 м і відстані до цілі 150 м

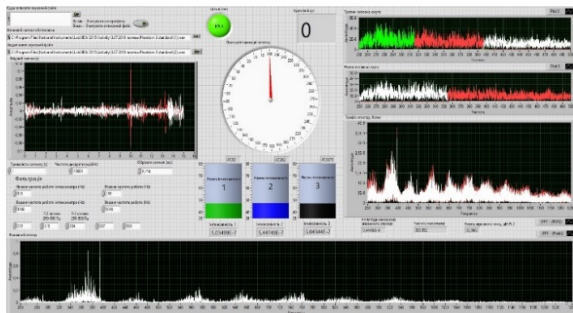


Рис. 6 Результати натурних вимірювань

За висоти над землею 2 м і відстані до цілі 5 м після обробки трактом інтенсивності отримано значення рівня інтенсивності 47 дБ за кожною з третинно-октавних смуг.

А при збільшені висоти розташування дрону над землею до 10 м і відстані до цілі 150 м значення рівня інтенсивності зменшились до 34 дБ за кожною з третинно-октавних смуг.

Отриманні дані в тритиннооктавній та напівоктавній смугах є не достатньо інформативними для

виявлення БПЛА. Саме тому в даний пристрій впроваджено тракти виявлення за вузькосмуговим та взаємним спектрами. Таке дублювання принципів виявлення має підвищувати надійність.

Тракт взаємного спектру даної шумопеленгаційної системи є прикладною реалізацією кореляційного методу обробки і втілено з урахуванням вище описаних математичних принципів у середовищі Lab View.

На Рис. 6 зображена робота всіх трактів у випадку висоти розташування над землею 2 м і відстані до цілі 5 м.

V. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЛАБОРАТОРНИХ ТА НАТУРНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Результати роботи показали, що для побудови пристроїв виявлення найбільш інформативними та найменш вразливими є тракти спектрального аналізу вузькосмугових сигналів та тракти методу взаємних спектрів, які працюють автономно. Однак, тракт кореляційного методу пеленгування зорієнтовано на визначення пеленгу на локалізоване джерело. В той самий час тракт виявлення за інтенсивністю зорієнтовано на роботу з її середнім значенням за поверхнею сфери великого радіуса. Використання паралельно (послідовно) задіяних раніше трактів і трактів пеленгування за інтенсивністю та кореляційного методу відкриває в перспективі можливості роботи не тільки з окремими трактами, але і їх комбінаціями.

Таким чином, з'являється можливість використання комплексного підходу щодо застосування розглянутих методів виявлення і обробки шумоподібних сигналів, а саме:

- окреме використання кожного з трактів;
- коловий огляд робочого простору за допомогою тракту кореляційного пеленгування і тракту вузькосмугової фільтрації; або тракту кореляційного пеленгування та тракту широкопеленгової фільтрації; або тракту пеленгування за інтенсивністю та тракту застосування взаємних спектрів.

Одним з можливих майбутніх кроків є проведення лабораторних та натурних випробувань з використанням повноцінної мультикомпонентної векторної акустичної антени, у якій приймачі тиску розміщені в трьох лінійно дискретних акустичних антенах, що взаємно ортогональні один до одного і мають спільний фазовий центр, у якому встановлено приймач тиску.

ВИСНОВКИ

В даній роботі було досліджено теоретичні засади та можливості практичної реалізації основних методів виявлення та пеленгації для створення пристрою шумопеленгування малих повітряних об'єктів. В результаті проведених робіт:

- реалізовано тракт кореляційного пеленгування, що додатково підвищує надійність роботи пристрою;
- відмакетовано мультикомпонентну векторну АА, що відтворює методологію роботи



з приймачами різного типу (як комбінованими, так і приймачами тиску);

- створено пристрій виявлення БПЛА з подальшим програмним відображенням і оцінкою спектральних характеристик та інтенсивності шумового поля об'єкта і поля оточуючих шумів в програмному середовищі LabView;
- отримані результати розробки перевірені в практичних умовах із залученням БПЛА квадрокоптерного типу в лабораторних та натурних умовах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] M. Hassanalani and A. Abdelkefi, "Classifications, applications, and design challenges of drones: A review," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 91, pp. 99–131, May 2017, DOI: [10.1016/j.paerosci.2017.04.003](https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003).
- [2] M. Bangura, "Aerodynamics and Control of Quadrotors," The Australian National University, 2017, URL: <https://openresearch-repository.anu.edu.au/bitstream/1885/112382/1/Bangura%20The%20sis%202017.pdf>.
- [3] V. F. Samokhin, S. P. Ostroukhov, and P. A. Moshkov, "Experimental study of the sources of noise of an unmanned aerial vehicle with a propeller-ring propeller in a pushing assembly," *Proc. MAI*, vol. 70, 2013.
- [4] I. I. Klyukin and A. E. Kolesnikov, *Acoustic measurements in shipbuilding*. Leningrad: Shipbuilding, 1968.
- [5] G. K. Skrebnev, *Combined hydroacoustic receivers*. SPb: Zlmor, 1997.
- [6] L. Marino, "Experimental Analysis of UAV Propeller Noise," in *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2010, DOI: [10.2514/6.2010-3854](https://doi.org/10.2514/6.2010-3854).
- [7] N. Intarapet, W. N. Alexander, W. J. Devenport, S. M. Grace, and A. Dropkin, "Experimental Study of Quadcopter Acoustics and Performance at Static Thrust Conditions," in *22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2016, DOI: [10.2514/6.2016-2873](https://doi.org/10.2514/6.2016-2873).
- [8] G. Sinibaldi and L. Marino, "Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV," *Appl. Acoust.*, vol. 74, no. 1, pp. 79–88, Jan. 2013, DOI: [10.1016/j.apacoust.2012.06.011](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.06.011).
- [9] V. S. Didkovskiy, V. Y. Akimenko, O. I. Zaporozhets, V. G. Savin, and V. I. Tokarev, *Fundamentals of Acoustic Ecology*. Kirovograd: Imeks LTD, 2002.
- [10] V. Didkovskiy, O. Korzhyk, S. Kozheruk, A. Kozak, R. Kostiuik, and S. Liakhevych, "Noise Measurement of the Multicopter UAV," in *2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*, 2019, pp. 67–70, DOI: [10.1109/APUAVD47061.2019.8943922](https://doi.org/10.1109/APUAVD47061.2019.8943922).
- [11] O. Korzhyk, A. Kozak, V. Didkovskiy, and S. Naida, "Construction the Device of Acoustic Noise Air Bearing," in *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2020, pp. 683–687, DOI: [10.1109/ELNANO50318.2020.9088899](https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088899).
- [12] O. Korzhyk, S. Kozheruk, A. Kozak, P. Larin, and R. Kostiuik, "Multicomponent vector acoustic antenna of direction finding and detection devices," u201809649, 2018, URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=255661>.
- [13] S. O. Kozheruk and O. V. Korzhyk, "Correlation direction finder for small aircraft," *Visnyk NTUU KPI Seriya — Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, no. 79, pp. 41–47, Dec. 2019, DOI: [10.20535/RADAP.2019.79.41-47](https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.79.41-47).
- [14] S. O. Kozheruk, *Acoustic information systems*. Kyiv: Igor Sikorsky KPI, 2018, URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/22800>.
- [15] I. A. Rumynskaia, *Fundamentals of hydroacoustics*. Leningrad: Shipbuilding, 1979.
- [16] "ISO — ISO 3745:2012 — Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms." URL: <https://www.iso.org/standard/45362.html>.

Надійшла до редакції 05 березня 2021 р.



Improved Unmanned Aerial Vehicle Noise Direction Finding System

A. V. Kozak, ORCID [0000-0002-4756-7931](https://orcid.org/0000-0002-4756-7931)

Department of Acoustics and Acoustoelectronics ames.kpi.ua

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)
Kyiv, Ukraine

Abstract—The work is devoted to the development of the acoustic direction of creation of means of detection of unmanned aerial vehicles (UAVs). The work of these tools is based on the principles of noise direction finding with the use of such variable characteristics of the acoustic field as: sound intensity, frequency spectrum and spatial spectrum. The architecture of UAV detection devices on the acoustic field corresponds to the algorithms of reproduction in separate paths of the device of ideology of registration and control of dynamics of change of characteristic of an acoustic field which defines the specified change as the fact of detection. The technical implementation of the above detection devices is to create a path of parallel octave, 1/2 octave and 1/3 octave filters, a path of narrowband filtering and a path of detection by power (intensity).

The ideology of construction of detection devices is based on variability and physical manifestations of changes in such characteristics of acoustic noise as: sound intensity in the space — time interval of observation, broadband filtering, narrowband filtering, correlation characteristics.

To ensure the detection of acoustic power (or intensity) with subsequent measurement of the level, the counter-inclusion (by switching or using operational amplifiers) of the elements of the cross-shaped group is used. An important and new feature is that one of the linear discrete acoustic antennas with an enlarged base additionally has two more pressure receivers symmetrically relative to the phase center.

For broadband filtration, a comb of 1/3 octave band and semi-octave filters is used. In turn, the path of the narrowband spectrum is an octave band filter and a unit for calculating the fast Fourier transform.

The path of the correlation direction-finding method implements the determination of changes in the autocorrelation coefficient and the corresponding electrical parameter (say the current through the display circuit) in the processing path in situations of fixing the direction to the target.

Therefore, the proposed system for detecting useful noise signals should contain four paths, the physical implementation of detection in which is performed by software implementation of detection algorithms and, threshold processing and indication of results.

In order to improve and increase the reliability of detection, the direction finder is supplemented by the path of detection on the mutual spectrum and the path of the correlation method of direction finding.

The processing of input acoustic information of the type of specific noise-like signal is carried out by using the instrumental laboratory software package Lab View and Math Lab. We will add that the article contains theoretical and practical results of measurements of noise loading and range of action of a noise direction finder. Experimental studies in terms of detection and measurement of the main characteristics of the device were conducted in laboratory and field conditions.

At the same time, the present demonstrates the rapid development of the UAV fleet, which determines the urgency of the work and the development of the device as a means of counteracting small aircraft of various recognitions is its goal.

Keywords — *unmanned aerial vehicle; intensity; sound pressure levels; spectral characteristics.*