

УДК 621.382.3:534.1:621.396.96

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-24

¹Татарчук Д. Д., ¹Богдан О. В., ¹Діденко Ю. В., ¹Лупина Б. І., ²Жеребець О. М.¹ Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна² Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, Київ, Україна

МІКРОМЕХАНІЧНИЙ КАЛОРИМЕТРИЧНИЙ СЕНСОР КОЛИВАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ ЧАСТИНОК ГАЗУ ДЛЯ ПАСИВНОГО АКУСТИЧНОГО ПЕЛЕНГАТОРА БПЛА

У статті розглянуто проблему виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) за допомогою пасивних методів, зокрема акустичних. Проаналізовано сучасні технології детекції БПЛА, наведено їхні переваги та обмеження. Обґрунтовано доцільність застосування інфразвукових сенсорів для створення пасивних акустичних пеленгаторів, що дають змогу виявляти об'єкти без активного випромінювання. Описано принцип роботи мікромеханічного калориметричного сенсора коливальної швидкості частинок газу, побудованого на основі теплового потоку, який забезпечує високу чутливість у широкому діапазоні частот. Показано, що такий тип сенсорів, виготовлених за МЕМС-технологією, дає змогу визначати вектор акустичної швидкості в просторі, що є основою для точної пеленгації джерела інфразвукового та низькочастотного акустичного діапазону випромінювання. Зазначено, що чутливість сенсорів Microflowm узгоджується зі спектральними характеристиками шумів як електричних, так і реактивних двигунів БПЛА. Проведений аналіз підтверджує перспективність використання мікромеханічних теплових сенсорів у системах пасивного акустичного виявлення та ідентифікації безпілотних апаратів.

Ключові слова: БПЛА, сенсор коливальної швидкості частинок газу, акустична пеленгація, шумовий спектр, Microflowm.

Постановка проблеми. Останнім часом у різних сферах життєдіяльності людини все активніше використовують безпілотні літальні апарати (БПЛА). Найбільш інтенсивно їх застосовують у [1–3]:

1. Військовій сфері (розвідка, коригування вогню, радіоелектронна боротьба тощо);
2. Сфері безпеки та охорони правопорядку (моніторинг масових заходів, прикордонний контроль, пошуково-рятувальні операції тощо);
3. Сільському господарстві (аерофотозйомка полів, обробка та оцінка стану посівів тощо);
4. Будівництві (інспекція стану об'єктів, контроль за будівництвом тощо);
5. Геодезії та картографії (аерофотозйомка для топографії, моніторинг ерозії, зсувів, паводків і стану повітря тощо);
6. Логістиці та доставці;
7. Інших сферах.

З огляду на широке застосування БПЛА у військовій сфері, зростає потреба у створенні ефективних засобів виявлення та пеленгації таких об'єктів. Традиційні методи активної радіолокації можуть бути неефективними або небажаними в умовах радіомовчання чи необхідності маскування власних засобів виявлення. У зв'язку з цим набувають актуальності пасивні методи виявлення БПЛА, які не випромінюють сигналів і працюють виключно у режимі приймання.

Одним із перспективних напрямів є використання інфразвукових датчиків – пристроїв, здатних реєструвати низькочастотні коливання повітря, що виникають внаслідок руху літальних апаратів. Інфразвук і низькочастотні акустичні коливання мають здатність поширюватися на значні відстані з мінімальним затуханням, що відкриває можливості для виявлення БПЛА навіть за межами прямої видимості.

Однак на сьогоднішній день існує низка невирішених технічних та наукових проблем, пов'язаних із застосуванням інфразвукових сенсорів для цієї мети: низький рівень сигналу на фоні природних шумів та завад від змінних метеоумов (вітер, грім, інші джерела інфразвуку); складність точного визначення напрямку на джерело сигналу за допомогою обмеженої кількості

датчиків; необхідність розробки ефективних алгоритмів фільтрації та обробки сигналів у режимі реального часу.

Таким чином, постає необхідність дослідження можливості та доцільності використання інфра звукових датчиків як основи для створення пасивного акустичного пеленгатора БПЛА.

Аналіз останніх досліджень. Натепер існує кілька груп методів виявлення БПЛА (таблиця 1) [4-8].

Таблиця 1 – Методи виявлення БПЛА

№ п/п	Група методів	Переваги та недоліки	Обладнання (приклади)
1.	Радіотехнічні методи (радіолокаційні) Опис: виявлення БПЛА за допомогою відбитого радіосигналу	Переваги: можливість виявлення в будь-яку погоду, вдень і вночі. Недоліки: погане виявлення пластикових FPV-дронів із малою ЕПР (ефективною площею розсіювання).	РЛС малого радіусу дії, 3D-радар, FMCW-радар, PESA/AESA (AN/TPQ-50, Thales Ground Alerter 10)
2.	Радіотехнічна розвідка (радіомоніторинг) Опис: виявлення сигналів управління, телеметрії або відеопотоку дрона	Переваги: пасивність, не демаскує систему виявлення. Недоліки: не виявляє повністю автономні БПЛА без активного зв'язку.	Dedrone RF-300, Rohde & Schwarz ARDRONIS
3.	Оптичні методи (візуальні, ІЧ, УФ) Опис: використання камер видимого або інфрачервоного діапазону для фіксації силуету або теплового сліду БПЛА.	Переваги: точне розпізнавання типу, напрямку, кількості. Недоліки: залежність від освітлення, погодних умов, туману.	тепловізори FLIR, системи відеоаналітики з неймережами
4.	Акустичні методи Опис: виявлення шумів двигуна, пропелерів або електроніки дрона.	Переваги: ефективність в умовах лісу чи міської забудови, здатність виявляти всі типи БПЛА. Недоліки: чутливість до вітру, шуму, обмежена дальність.	DroneShield, CerbAir HYDRA
5.	Магнітометричні методи Опис: фіксують зміну магнітного поля від електродвигунів або акумуляторів БПЛА	Переваги: пасивність, нечутливість до погодних умов. Недоліки: ефективність лише на короткій відстані (до 50 м), застосовуються рідко.	Датчики для периметрової охорони
6.	Інтегровані системи (мультиmodalні) Опис: поєднання вищеперахованих методів у різних комбінаціях.	Переваги: найвища точність, стійкість до помилкових спрацювань. Недоліки: висока вартість, складність налаштування.	

Метою роботи є аналіз можливості використання мікромеханічного калориметричного сенсору коливальної швидкості частинок газу для реалізації пасивного акустичного пеленгатора БПЛА.

Викладення основного матеріалу. Активне використання БПЛА зумовило створення різноманітних типів. Їх розрізняють [9-12]:

1. За масою (злітною вагою): надлегкі (до 2 кг), легкі (2...25 кг), середньої важкості (25...150 кг), важкі (понад 150 кг);

2. За дальністю дії: близького радіуса (до 10 км), тактичного рівня (10...150 км), оперативного рівня (150...650 км), стратегічного рівня (понад 650 км);

3. За висотою польоту: низьковисотні (до 3 км), середньовисотні (3...9 км), висотні (понад 9 км);

4. За конструкцією: коптерні (багатороторні), літакові (з фіксованим крилом), гібридні (вертикального зльоту та приземлення);

5. За ступенем автономності: керовані (радіокеровані та на оптоволокну), напівавтономні, повністю автономні.

Кожен з типів БПЛА має свої особливості. Враховуючи вищевказане зрозуміло, що своєчасне виявлення БПЛА є достатньо складним завданням, що потребує різноманітних підходів.

З таблиці 1 видно, що найбільш універсальними з точки зору виявлення різних типів БПЛА є акустичні методи. Крім того акустичні методи пасивні, що, у разі військового використання, робить їх захищеними від засобів ураження противника. Але вони мають невеликий радіус дії і чутливість до сторонніх акустичних шумів.

За принципом дії акустичні датчики поділяють на [13-17]: п'єзоелектричні (принцип дії яких ґрунтується на прямому п'єзоелектричному ефекті), ємнісні (принцип дії ґрунтується на зміні ємності між пластинами через їх коливання під дією змінного тиску), оптичні (принцип дії ґрунтується на зміні інтерференційної картини, спричиненої звуковими хвилями), магнітострикційні (принцип дії ґрунтується на деформації феромагнітного матеріалу під дією тиску, спричиненого звуковими хвилями), мембранні (принцип дії ґрунтується на реєстрації коливань тонкої мембрани під дією акустичної хвилі).

Для низки конструкцій БПЛА характерним є висока інтенсивність сигналу низькочастотному акустичному діапазоні, наприклад БПЛА з електричним двигуном збуджують характерні гармоніки від обертання лопатей (рис. 1) [18].

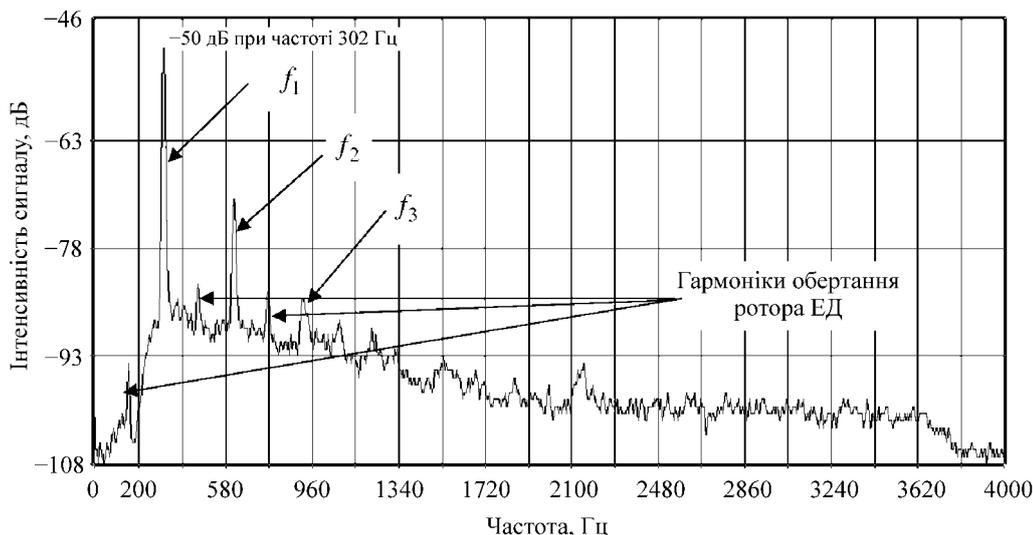


Рисунок 1 – Типовий спектр акустичного випромінювання БПЛА з електричним двигуном (частота обертання гвинта близько 9000 об./хв.) [18]

Останнім часом у військовій сфері все частіше використовують БПЛА з реактивними двигунами, що мають такі джерела акустичного сигналу як широкосмуговий шум турбулентного струменя, у якому домінують частоти від 10 до 16 Гц та від 315 до 6300 Гц, та тональні компоненти, пов'язані з обертанням ротора, вихлопом тощо (рис. 2) [19].

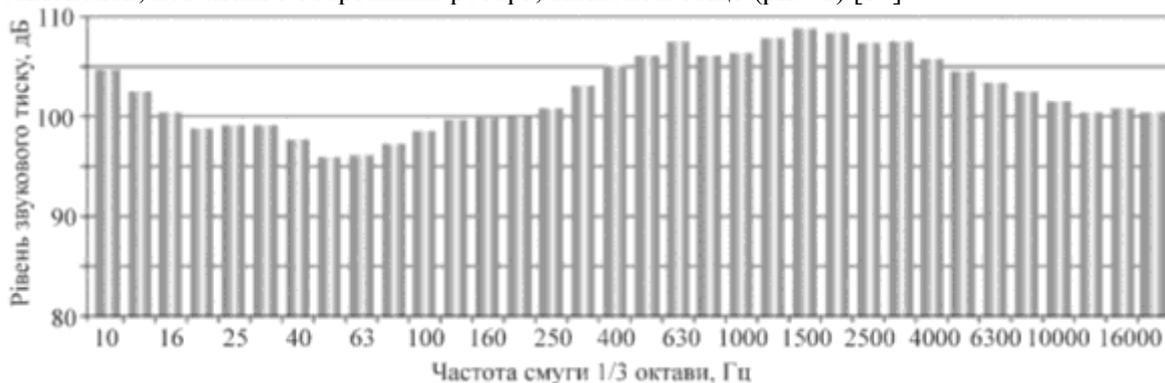


Рисунок 2 – Частотний спектр шумів реактивного БПЛА [19]

Тому для практичних застосувань виявлення інфразвукових і низькочастотних акустичних хвиль та їх оброблення мають суттєве значення.

Важливими перевагами інфразвукових і низькочастотних акустичних сигналів є мале загасання амплітуди, полегшене подолання та обминання перешкод, мала залежність від напрямку і швидкості вітру та шумів атмосферного тиску. За рахунок розповсюдження акустичних хвиль в інфразвуковому діапазоні (до одиниць Гц), вони фіксуються на великій відстані від об'єкта (для БПЛА – до 20...35 км) і не згасають, як це відбувається з електромагнітними хвилями на крапельках води в атмосфері. Використання датчиків інфразвукових сигналів дасть змогу підвищити роздільну здатність і зменшити вплив зовнішніх атмосферних явищ на точність локалізації цілей.

Все це дає підстави вважати акустичну пасивну пеленгацію на основі інфразвукових датчиків оптимальним варіантом виявлення та первинної ідентифікації БПЛА.

На наш погляд, як чутливий елемент у таких системах можуть бути використані теплові датчики потоку *Microflown* для акустичних вимірювань швидкості частинок або аналогічні [20].

Принцип дії теплових датчиків потоку *Microflown* базується на нагріванні дроту (або тонкоплівкового терморезистора, ізольованого від кремнієвої підкладки) за рахунок проходження електричного струму. Коли на нього впливає потік середовища, він додатково охолоджується, що призводить до зміни температури. Це, у свою чергу, спричиняє зміну електричного опору терморезистора, генеруючи змінний електричний сигнал, який залежить від швидкості потоку. У конструкції первинного перетворювача використовують щонайменше два нагрітих дроти (тонкоплівкові терморезистори з активним підігрівом, виготовлені за МЕМС-технологією) або один нагрівач і два температурні датчики, розташовані на відстані кількох десятків – сотень мікрометрів один від одного. Це дає змогу реалізувати термокондуктометричний метод визначення швидкості акустичної хвилі шляхом вимірювання температурної різниці між сенсорами. Такий підхід забезпечує високу чутливість до малих швидкостей повітря, що робить його ефективним для акустичних вимірювань. Завдяки малим розмірам перетворювачів, виготовлених за МЕМС-технологією, їх можна розміщувати у трьох взаємно перпендикулярних площинах для точного визначення вектора швидкості акустичної хвилі в певній точці звукового поля. Це, в свою чергу, дає змогу обчислити просторове розташування джерела звуку або потенційної акустичної загрози.

Метод вимірювання інтенсивності акустичної хвилі, який застосовується в технології *Microflown*, базується на одночасному визначенні звукового тиску та векторної величини – швидкості «акустичної частинки». На відміну від скалярного тиску, швидкість руху середовища має напрям, тому для повної реконструкції вектора швидкості необхідно проводити вимірювання у трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Оскільки кожен сенсор *Microflown* реєструє швидкість лише в одному напрямку, для повного просторового аналізу використовують три датчики, розташовані ортогонально один до одного. У поєднанні з мікрофоном, що фіксує звуковий тиск, така система дає змогу повністю охарактеризувати звукове поле в конкретній точці простору. Це дає змогу обчислити вектор звукової інтенсивності в широкому частотному діапазоні – від 0,5 Гц до 20 кГц [21].

Як видно з рис. 1 та 2 найбільша інтенсивність шумів двигуна БПЛА лежить у діапазоні частот 300...600 Гц (для електричного) та 10...16 Гц і 315...6300 Гц (для реактивного), що узгоджується із чутливістю теплових датчиків потоку *Microflown* (рис. 3).

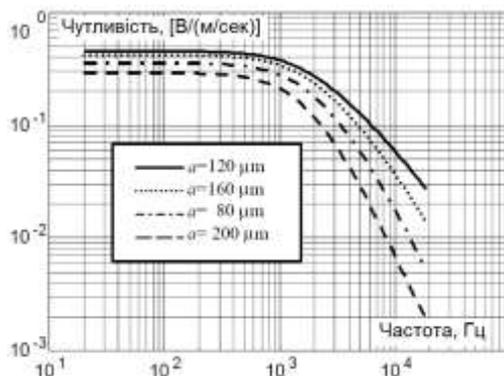


Рисунок 3 – Спектральна залежність чутливості потокового мікрофона (a – відстань між дротами) [20]

Висновки.

1. Проведений аналіз показав, що пасивні акустичні методи є ефективним засобом виявлення БПЛА різних типів, особливо у випадках, коли активні радіотехнічні системи недоцільні або небезпечні. При цьому необхідно враховувати навколишній фон акустичних завад.

2. Використання інфразвукових сенсорів дає змогу здійснювати пеленгацію об'єктів на значних відстанях завдяки низькому затуханню хвиль у цьому діапазоні.

3. Мікромеханічні калориметричні сенсори коливальної швидкості частинок газу, виготовлені за МЕМС-технологією, забезпечують високу чутливість і можливість визначення напрямку поширення акустичної хвилі.

4. Сенсори типу *Microflow* здатні працювати у частотних діапазонах, характерних для шумів електричних та реактивних двигунів БПЛА, що робить їх придатними для створення пасивних акустичних пеленгаторів.

5. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку алгоритмів обробки інфразвукових і низькочастотних акустичних сигналів і оптимізацію конструкції сенсорних модулів для підвищення точності пеленгації та заводостійкості системи.

Інформаційні джерела

1. Mendu B. State-of-the-Art Review on the Application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Power Line Inspections: Current Innovations, Trends, and Future Prospects / B. Mendu, N. Mbuli // Drones. 2025. Vol. 9, Is. 4. PP. 265-1–265-27. DOI: [10.3390/drones9040265](https://doi.org/10.3390/drones9040265)

2. Faisal Abbas Shah S. Applications, challenges, and solutions of unmanned aerial vehicles in smart city using blockchain / S. Faisal Abbas Shah, T. Mazhar, T.A. Shloul, T. Shahzad, Y.-C. Hu, F. Mallek, H. Hamam // PeerJ Computer Science. 2024. Vol. 10. PP. e1776-1–e1776-35. DOI: [10.7717/peerj-cs.1776](https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1776)

3. Molina A. A. A Review of Unmanned Aerial Vehicle Applications in Construction Management / A. A. Molina, Y. Huang, Y. Jiang // Standards. 2023. Vol. 3, Is. 2. PP. 95–109. DOI: [10.3390/standards3020009](https://doi.org/10.3390/standards3020009)

4. Seidaliyeva U. Advances and Challenges in Drone Detection and Classification Techniques: A State-of-the-Art Review / U. Seidaliyeva, L. Ilibayeva, K. Taissariyeva, N. Smailov, E. T. Matson // Sensors. 2024. Vol. 24, Is. 1. PP. 125-1–125-31. DOI: [10.3390/s24010125](https://doi.org/10.3390/s24010125)

5. Fallatah A. A Comprehensive Review of Emerging Techniques for Drone Detection and Identification / A. Fallatah, T. Alturki, Y. Alsabban, I. Radhwi // Robotics & Automation Engineering Journal. 2025. Vol. 6, Is. 3. PP. 555688-1–555688-7. DOI: [10.19080/RAEJ.2025.06.555688](https://doi.org/10.19080/RAEJ.2025.06.555688)

6. Rahman M. H. A Comprehensive Survey of Unmanned Aerial Vehicles Detection and Classification Using Machine Learning Approach: Challenges, Solutions, and Future Directions / M. H. Rahman, M. A. S. Sejan, M. A. Aziz, R. Tabassum, J.-I. Baik, H.-K. Song // Remote Sensing. 2024. Vol. 16, Is. 5. PP. 879-1–879-42. DOI: [10.3390/rs16050879](https://doi.org/10.3390/rs16050879)

7. Kashi R. N. A survey and analysis of drone detection systems using a systems approach superposed on scenarios / R. N. Kashi, A. Prashanth, S. R. Kashi, G. Prabhakara // Systems Engineering. 2024. Vol. 27, Is. 3. PP. 598–636. DOI: [10.1002/sys.21735](https://doi.org/10.1002/sys.21735)

8. Zitar R. A. A Review of UAV Visual Detection and Tracking Methods / R. A. Zitar, M. Al-Betar, M. Ryalat, S. Kassaymeh // 9th Annual Conf. on Computational Science & Computational Intelligence (CSCI'22) (2022, Las Vegas, United States). DOI: [10.48550/arXiv.2306.05089](https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.05089)

9. Penn State University. (n.d.). Classification of the Unmanned Aerial Systems. Retrieved July 2025 from <https://www.e-education.psu.edu/geog892/node/5>

10. Types of Drones and UAVs (2025). Retrieved July 2025 from <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/types-of-drones>

11. Mohsan S. A. H. Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends / S. A. H. Mohsan, N. Q. H. Othman, L. Yanlong, M. H. Alsharif, M. Khan // Intelligent Service Robotics. 2023. Vol. 16, Is. 1. PP. 109–137. DOI: [10.1007/s11370-022-00452-4](https://doi.org/10.1007/s11370-022-00452-4)

12. Adoni W. Y. H. Investigation of Autonomous Multi-UAV Systems for Target Detection in Distributed Environment: Current Developments and Open Challenges / W. Y. H. Adoni, S. Lorenz, J. S. Fareedh, R. Gloaguen, M. Bussmann // Drones. 2023. Vol. 7, Is. 4. PP. 263-1–263-37. DOI: [10.3390/drones7040263](https://doi.org/10.3390/drones7040263)

13. Fraden J. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications (4th ed.) / Jacob Fraden. Springer New York, 2010. 663 p. ISBN 978-1-4419-6466-3
14. Edwards R. A. Chapter 16 – Measurement of Sound Intensity. Recording and Reproduction. The Doppler Effect // Physics for O.N.C. Courses. – Pergamon, 1970. PP. 260–276. ISBN 978-0-0801-3431-4
15. Mallegni N. Sensing Devices for Detecting and Processing Acoustic Signals in Healthcare / N. Mallegni, G. Molinari, C. Ricci, A. Lazzeri, D. La Rosa, A. Crivello, M. Milazzo // Biosensors. – 2022. Vol. 12, Is. 10. PP. 835-1–835-35. DOI: [10.3390/bios12100835](https://doi.org/10.3390/bios12100835)
16. What are the different types of acoustic sensors? (2024) <https://sinay.ai/en/what-are-the-different-types-of-acoustic-sensors>
17. Encyclopedia of Sensors and Biosensors / ed. Roger Narayan. Elsevier, 2023. 2958 p. ISBN 978-0-12-822548-6
18. Даник Ю. Г. Виявлення безпілотних літальних апаратів на основі аналізу акустичних та радіолокаційних сигналів / Ю. Г. Даник, І. В. Пуленко, М. В. Бугайлов // Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки". 2015. Т. 4, № 71. С. 71–80. [https://doi.org/10.26642/tn-2014-4\(71\)-71-80](https://doi.org/10.26642/tn-2014-4(71)-71-80)
19. Konopka W. The influence of jet engine noise on hearing of technical staff / W. Konopka, M. Pawlaczyk-Łuszczynska, M. Śliwińska-Kowalska // Med Pr Work Health Saf. 2014. Vol. 65, Is. 5. PP. 583–592. DOI: [10.13075/mp.5893.00045](https://doi.org/10.13075/mp.5893.00045)
20. Honschoten J. W. Optimization of a thermal flow sensor for acoustic particle velocity measurements / J. W. Honschoten, V. Svetovoy, G. J. M. Krijnen, M. Elwenspoek // Journal of Microelectromechanical Systems. 2005. Vol. 14, Is. 3. PP. 436–443. DOI: [10.1109/JMEMS.2005.844848](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2005.844848)
21. Yntema D. R. A complete three-dimensional sound intensity sensor integrated on a single chip / D. R. Yntema, J. W. van Honschoten, R. J. Wiegerink, M. Elwenspoek // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2008. Vol. 18. PP. 115004-1–115004-9. DOI: [10.1088/0960-1317/18/11/115004](https://doi.org/10.1088/0960-1317/18/11/115004)

¹Tatarchuk D. D., ¹Bohdan O. V., ¹Didenko Yu. V., ¹Lupyna B. I., ²Zherebets O. M.

¹ National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

² Ukrainian Research Institute of Special Equipment and Forensic Science of the Security Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine

MICROMECHANICAL CALORIMETRIC SENSOR OF GAS PARTICLE VELOCITY FOR A PASSIVE ACOUSTIC UAV DIRECTION FINDER

The article addresses the problem of detecting unmanned aerial vehicles (UAVs) using passive methods, particularly acoustic ones. Modern UAV detection technologies are analyzed, and their advantages and limitations are presented. The feasibility of using infrasound sensors for the development of passive acoustic direction finders, which enable object detection without active radiation, is substantiated. The operating principle of a micromechanical calorimetric sensor of gas particle velocity based on heat flux is described, providing high sensitivity over a wide frequency range. It is shown that this type of sensor, fabricated using MEMS technology, makes it possible to determine the acoustic velocity vector in space, which serves as the basis for accurate direction finding of infrasound and low-frequency acoustic radiation sources. It is noted that the sensitivity of Microflown sensors corresponds to the spectral characteristics of the noise generated by both electric and jet UAV engines. The conducted analysis confirms the prospects of using micromechanical thermal sensors in passive acoustic detection and identification systems for unmanned aerial vehicles.

Keywords: UAV, gas particle velocity sensor, acoustic direction finding, noise spectrum, Microflown.

Дата першого надходження
статті до видання
02.09.2025 р

Дата прийняття статті
до друку
05.10.2025 р.

Дата
оприлюднення
25.12.2025 р.