

УДК 623.746.5:629.735.05

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).59-66](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).59-66)**В. С. ТРИГУБ**<https://orcid.org/0009-0005-2142-8780>*(Інститут Військово-Морських Сил НУ
«Одеська морська академія», м. Одеса)***І. А. БІЛАН**<https://orcid.org/0000-0003-1237-1565>*(Український науково-дослідний інститут
спеціальної техніки та судових експертиз, м. Київ)*

КОМБІНОВАНЕ АКУСТИКО-ТЕПЛОВІЗІЙНЕ ДОНАВЕДЕННЯ АВТОНОМНИХ ДРОНІВ-ПЕРЕХОПЛЮВАЧІВ НА МАЛОШВИДКІСНІ ПОВІТРЯНІ ЦІЛІ ТИПУ SHAHED-136

У статті розглянуто перспективний напрямок дослідження систем пасивного донаведення автономних дронів-перехоплювачів для знищення малошвидкісних БПЛА-камікадзе типу Shahed-136 (Герань-2).

Робота є початковим етапом дослідження, спрямованим на пошук ефективних технічних рішень для створення повністю пасивних, низьковартісних і стійких до радіоелектронної боротьби (далі – РЕБ) систем донаведення.

Ключові слова: дрони-перехоплювачі, акустичне виявлення, тепловізійне наведення, Shahed-136, пропорційна навігація, сенсорне злиття, гармонічний аналіз, згорткова нейронна мережа, кінцевий автомат, подавлення власного шуму.

ВСТУП

Повномасштабна війна в Україні виявила критичну вразливість традиційних систем протиповітряної оборони до масованого застосування малошвидкісних БПЛА-камікадзе типу Shahed-136 (Герань-2). Зазначені цілі рухаються на висотах 50–150 м зі швидкістю 150–180 км/год., мають низьку радіолокаційну помітність (ефективна поверхня розсіювання менше 0,1 м² завдяки переважно композитному планеру малого розміру), слабе інфрачервоне випромінювання через часткове маскування вихлопної системи та відносно низьку вартість, приблизно 20–50 тис. USD за одиницю.

Традиційні зенітно-ракетні комплекси забезпечують дальність виявлення малих БПЛА у діапазоні кількох кілометрів, проте не здатні ефективно діяти в умовах масованого застосування роїв дешевих БПЛА-камікадзе. Висока вартість перехоплення, необхідність активного радіовипромінювання, що демаскує позицію, та обмежений боєкомплект роблять їх малоприсадибними для цього класу загроз [1–5].

Актуальним науковим напрямком є розробка автономних дронів-перехоплювачів класу 7–10 доймів, здатних виконувати пасивне донаведення за фізичними полями цілі без будь-якого активного випромінювання. Ключова перевага такого підходу – це повна стійкість до засобів РЕБ та економічна ефективність, що робить масове застосування роїв раціональним.

Представлена стаття є першим етапом розробки загальної методики доведення дронів-перехоплювачів за фізичними полями ударних БПЛА противника. В подальших роботах методика буде розширена на радіочастотне та оптичне фізичні поля, а також на комплексне наведення відповідно до систематики, обґрунтованої у базових методологічних дослідженнях. Вибір акустичного та теплового полів як першочергових обумовлений найбільшою практичною актуальністю для цілей типу Shahed-136 та наявністю верифікованої сенсорної бази для їх реєстрації.

В Україні вже випробовуються акустичні мережі виявлення типу Sky Fortress та ARes із дальністю виявлення Shahed до 5 км, а також FPV-перехоплювачі STING та OSIRIS UEB-1 із тепловізійними головками самонаведення [12, 13]. Проте комбіноване акустико-тепловізійне донаведення на борту одного автономного перехоплювача з пропорційною навігацією, сенсорним злиттям і фільтрацією власного шуму у відкритій науковій літературі описано недостатньо. Запропонований у роботі напрямок спрямований на заповнення цієї прогалини.

Мета роботи – це теоретичне обґрунтування та постановка напрямку дослідження комбінованого акустико-тепловізійного донаведення як перспективного шляху вирішення проблеми перехоплення Shahed-136 та аналогічних БПЛА.

Для досягнення мети сформульовано такі завдання:

- 1) провести порівняльний аналіз акустичних сигнатур Shahed-136 та інших типів БПЛА для оцінки універсальності запропонованого підходу;
- 2) проаналізувати фізичні поля малошвидкісних повітряних цілей типу Shahed-136 (акустичне та теплове) з метою виявлення характерних сигнатур, придатних для пасивного виявлення;
- 3) обґрунтувати вибір сенсорної бази (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) мікрофонів серії Infineon IM73A135 для акустичного каналу та неохолоджених сенсорів довгохвильового інфрачервоного випромінювання LWIR з тепловізійною чутливістю NETD до 25 мК;
- 4) розробити концепцію архітектури сенсорного злиття та кінцевого автомата (Finite State Machine, FSM) для динамічного перемикання між акустичним і тепловізійним каналами;
- 5) виконати математичне моделювання співвідношення сигнал/шум (Signal to Noise Ratio, SNR) та пропорційної навігації (розрахунок точки зустрічі);
- 6) визначити основні технічні обмеження та напрямки подальших досліджень.

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ

ТА АНАЛІЗ АКУСТИЧНИХ СИГНАТУР БПЛА

Аналіз відомих технічних рішень у сфері протидії малорозмірним БПЛА дозволяє виявити ключову про-

Таблиця 1. Порівняльний аналіз існуючих систем протидії БПЛА

Система	Принцип	Активне чи пасивне	Дальність, км	Стійкість до РЕБ	Обмеження
SAN [26]	Сітка та RF глушіння	Активне	до 0,3	Низька	Потребує RF сигналу
Goodrich US10399674 [27]	Перехоплення сіткою	Активне	до 6 м	Низька	Потребує наземного радару та оператора
Sky Fortress та ARes [12]	Акустична мережа	Пасивне	до 5	Висока	Лише виявлення, без наведення
STING та OSIRIS UEB-1 [12]	LWIR головка самонаведення	Пасивне	до 0,5	Висока	Ефективне лише на термінальній фазі, вразливе до теплового фону
Nyzhnyk & Partyka (концепція) [28]	RF, акустика та оптика	Пасивне	5–7	Висока	Відсутній алгоритм пріоритизації каналів та FSM
Запропонована система	Акустика та LWIR	Повністю пасивне	до 3,2 (суша) та 5,8 (море)	Максимальна (до 95 %)	Параметри підлягають верифікації в MATLAB

галину: жодна з існуючих систем не реалізує повністю пасивного бортового донаведення з комбінуванням акустичного та теплового каналів. У табл. 1 наведено порівняльний аналіз найбільш відомих систем [6, 25–29].

Аналіз табл. 1 свідчить, що запропонований підхід є єдиним серед розглянутих, який поєднує повну пасивність на всіх фазах наведення з алгоритмічним механізмом адаптивного перемикачання між сенсорними каналами. Найближчим аналогом за принципом є концепція Nyzhnyk & Partyka [28], однак вона не формалізує логіку управління каналами у вигляді кінцевого автомата та не вирішує задачу подавлення власного шуму перехоплювача.

Для обґрунтування доцільності та універсальності запропонованого напрямку дослідження проведено порівняльний аналіз акустичних сигнатур поширених типів БПЛА на основі робіт [1–5].

Багатороторні квадрокоптери (типу DJI Mavic 3, Mavic Pro Platinum). Основні гармоніки 200–400 Гц, менш виражені низькочастотні складові. Ефективна дальність акустичного виявлення: з одним мікрофоном сягає близько 78 м, з урахуванням використання згорткових нейронних мереж (Convolutional neural network, CNN) до 200 м [1, 2].

FPV-дрони 7-дюймові. Домінуючі гармоніки 300–900 Гц із вираженими піками від безколекторних двигунів. Швидкість польоту до 120 км/год. Пропорційна навігація з коефіцієнтом $N = 4,5$ компенсує різкі зміни курсу. Акустична дальність сягає 150–300 м, тепла від 400 м [2, 3].

БПЛА з нерухомим крилом (типу Лелека-100, Фурія). Гармоніки 1000–2000 Гц. Дальність акустичного виявлення до 500 м. Вищий тепловий контраст через поршневий двигун прискорює перехід на термінальну фазу [5].

Гібридні VTOL та однороторні гелікоптери. Виражена «гвинтова» модуляція з когерентними радіо та акустичними гармоніками. Застосовується спільний гармонічний аналіз для злиття акустичного та RF-каналів [2, 4].

Малі електричні FPV-камікадзе. Низькочастотні піки 150–300 Гц. Дальність виявлення з IM73A135 ся-

гає до 1 км. Комбінована система компенсує слабкий тепловий сигнал раннім захопленням за акустикою [3].

Shahed-136 вирізняється серед усіх аналізованих типів БПЛА. Він має найнижчі частоти (75–100 Гц) і найвищу абсолютну потужність акустичного сигналу, що формує найбільший запас SNR для системи виявлення [4, 5]. Водночас запропонований підхід є перспективним і для інших типів БПЛА завдяки універсальності архітектури сенсорного злиття.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Методологія дослідження базується на комплексному аналізі пасивних фізичних полів Shahed-136, а саме: акустичного та теплового, та на теоретичному обґрунтуванні можливості створення комбінованої системи донаведення.

Акустичне поле Shahed-136 формується двигуном MD-550 та дволопатевою гвинтом фіксованого кроку. Двигун MD-550 – це іранська копія німецького Limbach L550E та являє собою чотирьохциліндровий двотактний двигун об'ємом 550 см³. Особливістю двотактного циклу є те, що кожен циліндр здійснює робочий хід при кожному оберті вала, що суттєво впливає на спектральний склад акустичного поля порівняно з чотиритактними двигунами.

Акустичний спектр Shahed-136 є детермінованим і утворений набором дискретних гармонік, зумовлених трьома незалежними фізичними механізмами.

Фундаментальна частота обертання вала $f_0 \approx 75 - 100$ Гц (позначається також f_{shaft}). Під час польоту БПЛА на крейсерській швидкості, оберти двигуна становлять 4500–6000 об/хв., що відповідає $f_0 = 75 - 100$ Гц. Це основний тон акустичного сигналу.

Другий механізм – це прохід лопатей гвинта (Blade Pass Frequency, BPF): $f_2 = 2f_0$ (для дволопатевого гвинта). При $f_0 = 100$ Гц дає домінуючий пік на 200 Гц.

Третій механізм – це робочі такти двигуна (firing frequency): $f_4 = 4f_0$ (для чотирьохциліндрового двотактного двигуна відбуваються чотири вибухи за один оберт вала). При $f_0 = 100$ Гц формує потужний пік на 400 Гц.

Таким чином, акустичний портрет Shahed-136 можливо описати рядом дискретних гармонік

$$f_i = i \cdot f_0, \quad (1)$$

Закінчення табл. 1а

де $i = 1, 2, 3, \dots$ – це обертони акустичного поля, $f_0 \approx 75\text{--}100$ Гц – це фундаментальна частота.

При крейсерських 6000 об/хв. структура спектра набуває такого вигляду: $f_1 \approx 100$ Гц (вал), $f_2 \approx 200$ Гц (ВРФ, гвинт), $f_4 \approx 400$ Гц (найбільш виражена), $f_6 \approx 600$ Гц, $f_8 \approx 800$ Гц і так далі до 10–12 значущих гармонік у діапазоні до 1,5–2 кГц. При цьому найбільша енергія акустичного випромінювання зосереджена у першій декаді гармонік [4, 5]. Детектування акустичного спектру БПЛА можливо з використанням чутливих мікрофонних сенсорів, для яких критичним параметром є співвідношення сигнал/шум SNR на низьких частотах, де власний та фоновий шум навколишнього середовища є найбільш відчутними.

Для реєстрації акустичних сигналів БПЛА пропонується використовувати мікрофонний масив з 4–8 елементів на базі MEMS мікрофона Infineon IM73A135 (табл. 1а).

Таблиця 1а. Ключові параметри MEMS-мікрофона Infineon IM73A135V01 (таблиця сформована автором за даташитом)

Параметр	При повному живленні	При низькому живленні
Співвідношення сигнал/шум	73 дБ	71 дБ
Акустична точка переваження	135 дБ	130 дБ
Струм споживання	170–230 мкА	70–80 мкА
Напруга живлення	2,3–3,0 В	1,52–1,8 В
Власний шум	21 дБ	23 дБ

Параметр	При повному живленні	При низькому живленні
Допуск чутливості (після калібрування)	±1 дБ	
Захист від води та пилу	IP57	
Час запуску	10–30 мс	
Габарити корпусу	4 × 3 × 1,2 мм	

Мікрофон має SNR 73 дБ, де ефективний SNR на частоті 100 Гц оцінюється на рівні 68–70 дБ внаслідок спектрального нахилу 1/f-шуму завдяки технології Sealed Dual Membrane, що мінімізує вплив шуму (1/f noise) [6]. Власний шум мікрофона становить 21 дБ. Точка акустичного переваження становить 135 дБ в режимі «Повне живлення» і 130 дБ в режимі «Низьке живлення», що виключає тимчасову фіксацію сенсора в умовах інтенсивного акустичного впливу від власних гвинтів дрона-перехоплювача. Мікрофон відповідає класу захисту IP57 на рівні компонента, що суттєво підвищує надійність системи в умовах атмосферних опадів. Завдяки всеспрямованій діаграмі спрямованості IM73A135 чутливий до звуку з будь-якого боку без необхідності точного наведення на ціль, що є ідеальним для систем акустичного моніторингу. Також слід зазначити що мікрофон є омнідирекційним, тому всі криві залишаються майже круглими. Відхилення від ідеального кола зростає з частотою через акустичну тінь малого корпусу (4×3×1,2 мм) (рис. 1).

Рівень звукового тиску $J_p(r)$ дБ, що створюється Shahed-136 на відстані r від мікрофона, можна визначити за допомогою наступної емпіричної залежності, враховуючи [20]:

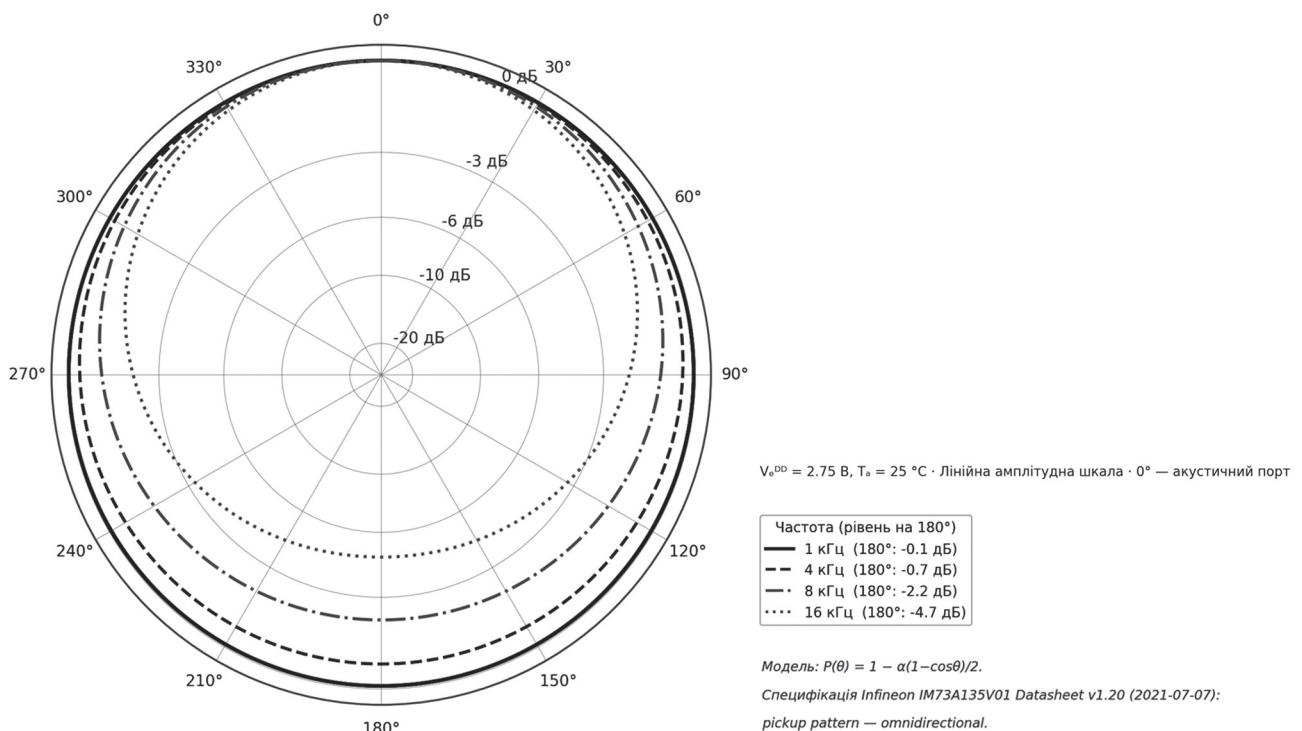


Рис. 1. Діаграма спрямованості MEMS мікрофона Infineon IM73A135

Зроблена автором згідно даташиту мікрофона Infineon IM73A135

$$J_p(r) = J_{p0} - 20 \lg \frac{r}{r_0} - \alpha(f)r, \quad (2)$$

де J_{p0} – рівень звукового тиску на еталонній відстані $r_0 = 1$ м (для Shahed-136 прийнято авторами 105–110 дБ на 100 Гц, що підтверджується даними [4, 5]); $20 \lg \frac{r}{r_0}$ – характеризує втрати на сферичне розсіювання; $\alpha(f)$ – коефіцієнт атмосферного поглинання звуку (дБ/м). Для частоти 100 Гц за стандартних умов (температура повітря 20 °С, відносна вологість 70 %) $\alpha \approx 0,0015\text{--}0,003$ дБ/м [ISO 9613-1:1993].

Результуюче SNR на вході мікрофона:

$$SNR = J_p(r) - J_{\text{noise}}, \quad (3)$$

де J_{noise} – еквівалентний рівень власного шуму мікрофона на робочій частоті ≈ 21 дБ для IM73A135.

За прийнятими значеннями $J_{p0} = 108$ дБ та $\alpha = 0,002$ дБ/м отримані результати зведено до табл. 16.

Т а б л и ц я 16. Розрахунковий SNR мікрофона IM73A135 для акустичної сигнатури Shahed-136

Відстань	J_p , дБ	SNR, дБ	Оцінка
500 м	53	32	Дуже добрий запас
1 км	46	25	Прийнятний для надійного виявлення
2 км	38	17	Достатній для згорткової нейронної мережі після фільтрації
3 км	Приблизно 30	10–12	Межа надійного виявлення

Таким чином, мікрофон IM73A135 забезпечує запас SNR понад 15–20 дБ на дистанціях до 2–2,5 км навіть з урахуванням атмосферного поглинання та шуму. Лімітуючим фактором на великих відстанях є зовнішній фоновий шум навколишнього середовища, а не власний шум мікрофона. Вибір IM73A135 дозволяє реалізувати надійне дальнє пеленгування Shahed-136 на дистанціях до 3–5 км над сушею та до 5–7 км над морем.

Практичну підтвердженість розрахункового підходу демонструють натурні дослідження [5]: дослідний макет на базі мікрофонної решітки надійно виявляє БПЛА типу Фурія ($f_0 = 1068$ Гц, крок гармонік 356 Гц) на відстані до 500 м, а БПЛА типу Лелека 10 ($f_0 = 1985$ Гц, крок 331 Гц) аналогічно, за умови наявності щонайменше трьох кратних гармонік у прийнятому спектрі. Shahed-136 з MD-550 забезпечує значно нижчу фундаментальну частоту (приблизно 100 Гц) і вищу абсолютну потужність акустичного випромінювання, що формує суттєво більший запас SNR на аналогічних дистанціях.

Однією з ключових проблем при реалізації акустичного каналу є високий рівень власного шуму пропелерів і двигунів дрона-перехоплювача, який може перевищувати рівень корисного сигналу від цілі в умовах низького SNR на дистанціях порядку десятків метрів. Для подолання цього обмеження пропонується дворівнева стратегія подавлення.

На першому рівні мікрофони IM73A135 розміщуються на виносних штангах довжиною 15–25 см відносно площини пропелерів. Таке рішення знижує рівень власного шуму на 6–12 дБ завдяки закону зворотних квадратів. На другому рівні алгоритми Least Mean Squares, LMS (метод найменших середніх квадратів) або Recursive Least Squares, RLS (рекурсивний метод найменших квадратів) із референтним сигналом з польотного контролера (оберти двигунів, RPM) або з додаткового мікрофона, спрямованого безпосередньо на власні двигуни. Адаптивний фільтр динамічно віднімає домінуючі гармоніки власного шуму в реальному часі, підтримуючи прийнятне SNR навіть під час інтенсивного маневрування.

Комбінування фізичної десоціації та адаптивної фільтрації є ключовим елементом дослідження, що забезпечує працездатність акустичного каналу в реальних умовах польоту. На подальших етапах планується моделювання та експериментальна перевірка ефективності запропонованих методів подавлення шуму.

Двигун Shahed-136 створює теплове випромінювання з температурою 300–500 °С. Однак реальний тепловий контраст цілі є відносно низьким: вихлопна система частково маскується конструкцією планера, а мала потужність двигуна MD-550 (особливо на крейсерській швидкості) обмежує загальне теплове випромінювання. Через це надійне виявлення за тепловою сигнатурою можливе переважно на заключній стадії зближення, коли кутовий розмір гарячої плями двигуна стає достатнім для LWIR-сенсора.

Додатковим обмежувальним чинником є явище трати теплового контрасту в певні моменти доби, переважно на світанку та у сутінки, температурний контраст між об'єктом та підстильною поверхнею наближається до нуля. Це робить неохолоджені болометри тимчасово неефективними, що додатково обґрунтовує необхідність резервного акустичного каналу.

Для реалізації тепловізійного каналу пропонуються неохолоджені LWIR-сенсори з параметрами NETD до 25 мК та роздільною здатністю 640×512 пікселів, аналогічні тим, що застосовані у FPV-перехоплювачах типу STING та ін. [16]. При досягненні дистанції менше 500 м двигун Shahed-136 забезпечує тепловий контраст понад 5–10 К відносно холодного неба, що є достатнім для надійного відстеження центра маси плями з точністю до 2 пікселів.

Через обмежений тепловий контраст цілі наявність резервного шляху донаведення є обов'язковою: у разі втрати або недостатності теплового сигналу система автоматично повертається до акустичного каналу. Процес донаведення реалізується у вигляді кінцевого автомата (Finite State Machine, FSM), який забезпечує динамічне перемикання між акустичним і тепловізійним каналами залежно від поточного. Такий підхід дозволяє оптимально поєднати дальність акустичного виявлення з точністю тепловізійного трекінгу. Логіка FSM включає три основні стани та резервний.

Перший стан – це акустичний пошук (дальня фаза, дистанція до цілі понад 2 км). Після виходу в район цілі, за даними зовнішньої мережі ППО або GPS-наве-

дення, мікрофонний масив є єдиним активним каналом. В цьому випадку мікрофони IM73A135 функціонують у режимі низького живлення, а тепловізор перебуває в режимі очікування для економії енергії. При переході до активної фази необхідно враховувати час запуску мікрофона 10–30 мс після подачі напруги, а також час перемикання між режимами 10 мс невизначеного вихідного сигналу.

Перехід до другого стану здійснюється при виконанні умови:

$$SNR_{\text{acoustic}} > T_1, \quad (4)$$

де T_1 – поріг виявлення фундаментальної гармоніки MD-550 ($f_0 \approx 100$ Гц).

Другий стан – це гібридний режим (перехідна фаза, дистанція до цілі 500–2000 м). Акустичний канал надає грубий пеленг для звуження зони пошуку тепловізора. Перехід активується при одночасному виконанні двох критеріїв: виявлення теплової плями розміром більше 2×2 пікселів та температурний контраст $\Delta T > NETD \times 5$. Дані з обох каналів зливаються за зваженою схемою.

Третій стан – це термінальна фаза (дистанція до цілі менше 500 м). Система повністю переходить на тепловізійний канал, що є основним. Акустичний канал виконує відсікання хибних спрацювань. Перехід відбувається при перевищенні кутовим розміром теплової плями встановленого порогу.

Резервний режим. При втраті сигналу в будь-якому основному стані система автоматично повертається до попереднього стану або задіює Доплер корекцію з акустики. У випадку повної втрати акустичного сигналу можливо задіяти інерційний фільтр Калмана для повторного захоплення. Гістерезис 50 м запобігає частому перемикаю.

На подальших етапах дослідження планується детальне моделювання FSM у MATLAB та програмна реалізація на Raspberry Pi 5 або Jetson Orin Nano.

Пропонується дані з акустичного та тепловізійного каналів перетворювати на команди керування дроном-перехоплювачем через єдиний алгоритмічний ланцюг на бортовому комп'ютері (On Board Computer, OBC) типу Raspberry Pi 5 або Jetson Orin Nano.

Обчислювальні можливості стандартних польотних контролерів на базі мікроконтролерів STM32 та F7 під управлінням програмного забезпечення Betaflight або INAV є недостатніми для самостійної реалізації повного циклу алгоритмів донаведення в режимі реального часу. Це обмеження зумовлене тим, що такі контролери ефективно працюють лише з PID-регуляторами та стабілізацією, тоді як обробка складних спектрограм нейронних мереж та фільтрів Калмана вимагає окремого бортового комп'ютера (OBC). Тому перехоплювач обов'язково дообладнується окремим OBC. Після виконання всього обчислювального циклу OBC передає польотному контролеру готові команди прискорення. Для забезпечення стійкої роботи контуру пропорційної навігації критично важливо підтримувати затримку циклу керування на рівні, що не перевищує 20 мс.

Основним методом наведення є класична пропорційна навігація (Proportional Navigation, PN), в основі якої є прогнозування точки зустрічі з ціллю.

Принцип PN полягає в зведенні до нуля кутової швидкості лінії візування λ . Командне прискорення обирається перпендикулярно лінії візування наступним чином:

$$a_c = N \cdot V_c \cdot \dot{\lambda}, \quad (5)$$

де a_c – командне прискорення; N – навігаційна константа, за якою обирається точка зустрічі (оптимально 3,5–4,5; при $N < 3$ рух навздогін, при $N > 5$ – рух на випередження); V_c – швидкість зближення (визначається з доплерівської складової акустичного сигналу); $\dot{\lambda}$ – кутова швидкість лінії візування після фільтра Калмана 2-го порядку:

$$\dot{\lambda} = \frac{d}{dt} \left[\text{atan2}(y_c - y_p, x_c - x_p) \right], \quad (6)$$

де (x_c, y_c) – координати цілі; (x_p, y_p) – координати перехоплювача.

Shahed-136 летить майже прямолінійно зі сталою швидкістю 150–180 км/год. При $N = 4$ перехоплювач витрачає мінімальне прискорення (до 2–3 g), що є ідеальним для 7-дюймового FPV з обмеженим ресурсом акумулятора. Алгоритм PN виконується на OBC кожні 10 мс за чотирма кроками:

1. отримання поточних координат цілі з модуля сенсорного злиття (в прямокутній інерційній пов'язаній з перехоплювачем системі координат);
2. розрахунок $\dot{\lambda}$ і V_c ;
3. обчислення a_c та розкладання на команди roll/pitch/yaw rate;
4. передача на польотний контролер по MAVLink або MSP.

На дальній фазі мікрофонний масив IM73A135 формує 8-канальний аудіопотік, який після попередньої обробки перетворюється на мел-спектрограми. CNN за 5–8 мс видає азимут і кут місця цілі з точністю $\pm 3^\circ$. Паралельно прораховується Доплерівська складова акустичного сигналу для розрахунку відносної швидкості. Тепловізор знаходиться в режимі очікування.

На перехідній фазі азимут з акустики (θ_a) та тепловий центр маси (θ_t) об'єднуються за зваженим середнім значенням:

$$\theta_{\text{fused}} = w_a \cdot \theta_a + w_t \cdot \theta_t, \quad (7)$$

де ваги перераховуються кожні 10 мс:

$$w_a = \frac{SNR_a}{SNR_a + \text{contrast}_t}, w_t = 1 - w_a. \quad (8)$$

При SNR акустики понад 10 дБ і тепловому контрасті більше 1,5 К ваги приблизно рівні. Фільтр Кальмана об'єднує обидва джерела, забезпечуючи плавний перехід і стійкість до часткової втрати одного каналу. Пропорційна навігація працює вже на об'єднаних координатах. Такий підхід відповідає рівню сенсорного злиття, запропонованому в роботі [28]. На термінальній фазі LWIR сенсор фіксує гарячу пляму двигуна з тепловим контрастом 5–10 К. Алгоритм відстежує центр маси плями з точністю до 2 пікселів. Акустичний канал переходить у режим резервного підтвердження та відсікання теплових завад.

Резервний режим. При повній втраті сигналу система повертається до Доплерівської корекції акустичного сигналу або переходить на інерційний фільтр Калмана

до повторного захоплення. Гістерезис 50 м запобігає частому перемиканню.

ВИСНОВКИ

У роботі, яка є першим етапом розробки загальної методики доведення дронів-перехоплювачів за фізичними полями ударних БПЛА противника, теоретично обґрунтовано концепцію комбінованої акустико-тепловізійної системи донаведення. Отримано такі основні результати.

Обґрунтовано вибір MEMS-мікрофона Infineon IM73A135 як оптимального сенсора акустичного каналу, де розрахунковий SNR перевищує 25 дБ на відстані 1 км та 17 дБ на відстані 2 км, що забезпечує надійне захоплення цілі задовго до введення тепловізійного каналу. Лімітуючим фактором є зовнішній фоновий шум середовища, а не власний шум мікрофона (21 дБ).

Розроблено концепцію трифазового кінцевого автомата (FSM) з резервним режимом, що забезпечує плавне та адаптивне перемикання між акустичним, гібридним і тепловізійним режимами. Обидва канали взаємно компенсують слабкі сторони один одного, акустика за низькою тепловою сигнатурою, тепловізор за шумом у міській забудові.

Теоретично обґрунтовано перевагу пропорційної навігації (PN, $N = 4$) над чистим наведенням, де очікуване зростання ймовірності перехоплення на 25–30 % та зменшення енерговитрат на 40 %, що є критичним для 7-дюймового FPV з обмеженим джерелом живлення. Верифікація оцінки запланована в MATLAB на наступному етапі дослідження.

Сформовано прогнозовані характеристики системи на основі аналітичних розрахунків та даних літератури, де очікувана ймовірність захоплення становить приблизно 82 % на дистанціях 2–4 км, акустична дальність первинного захоплення 3,2 км (суша) та 5,8 км (море), стійкість до РЕБ на рівні приблизно 95 % завдяки повній пасивності. Усі показники підлягають верифікації в MATLAB та натурних випробуваннях.

Ідентифіковано ключові технічні обмеження, такі як: субхвильова апертура масиву на частоті 100 Гц, ризик хибних спрацювань у цивільному акустичному середовищі та явище втрати теплового контрасту. Подолання цих обмежень вимагає мультимодальної верифікації цілі та адаптивної ваги каналів у FSM.

В подальших дослідженнях передбачається проведення комплексного математичного моделювання в середовищі MATLAB для верифікації розрахункових характеристик системи, зокрема ймовірності захоплення цілі, переваг пропорційної навігації над методом чистого наведення, а також ефективності адаптивної фільтрації шуму та алгоритму FSM. Наступним етапом є апаратна реалізація запропонованих рішень на базі програмованої логічної інтегральної схеми (FPGA) та на комп'ютері, який розміщений на одному маленькому чіпі (SoC), що включає розробку обчислювального блоку для паралельної обробки восьми аудіоканалів та відеопотоку від LWIR-сенсора. У межах цієї архітектури планується впровадження адаптивного фільтра Калмана зі змінними вагами, здатного автоматично підвищува-

ти пріоритет акустичного пеленгатора за умов низької достовірності даних тепловізійного каналу. Крім того, передбачається формування бібліотеки цифрових відбитків Shahed-136 шляхом систематичного накопичення акустичних і теплових сигнатур цілі у різних режимах польоту та атмосферних умовах, що забезпечить базу для навчання алгоритмів штучного інтелекту та систем машинного зору.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Сокольський С. О. Акустичне виявлення безпілотних літальних апаратів : дис. ... д-ра філос. : 172. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2023. 183 с.
2. Атаманчук А. В. Метод виявлення та ідентифікації БПЛА з застосуванням нейронної мережі : кваліф. робота магістра : 172. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя. 2022. 89 с.
3. Тютюнник В. А. та ін. Акустичний метод ідентифікації застосування БПЛА як джерел надзвичайних ситуацій. *Social Development and Security*. 2025. Т. 15. № 1. С. 300—310. DOI: 10.33445/sds.2025.15.1.26.
4. Даник Ю. Г., Пулеко І. В., Бугайов М. В. Виявлення БПЛА на основі аналізу акустичних та радіолокаційних сигналів. *Вісн. ЖДТУ*. 2014. № 4(71). С. 71—80.
5. Чигінь В. І. та ін. Вдосконалення способу виявлення БПЛА за результатами спектрального аналізу акустичних сигналів. *Військ.-техн. зб.* 2019. № 20. С. 58—63. DOI: 10.33577/2312-4458.20.2019.58-63.
6. Infineon Technologies AG. IM73A135 Data Sheet: High SNR Microphones with Sealed Dual Membrane Technology. Rev. 1.20. Munich. 2021. 32 p.
7. Infineon Technologies AG. IM69D130 Data Sheet. Rev. 1.00. Munich. 2017. 28 p.
8. Бугайов М. В. Аналіз ефективності виявлення тактичних БПЛА пасивними та активними засобами спостереження. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*. Житомир. 2015. Вип. 10. С. 5—19.
9. Saravanakumar, A. & Senthilkumar, K. (2014). Exploitation of acoustic signature of low flying aircraft using acoustic vector sensor. *Defence Science J.* Vol. 64. No. 2. Pp. 95—98.
10. Pham, T. & Srour, N. (2004). TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs. *Proc. SPIE*. Vol. 5417. Pp. 24—29.
11. DroneShield. *Acoustic Detection Technology White Paper*. Sydney. 2024.
12. Єрмоєнко О. О., Бабич А. П., Поплавець С. І. Удосконалення системи ППО поля бою в умовах застосування FPV-дронів. *Системи обробки інформації*. 2025. Вип. 4(183). С. 29—36.
13. Melnyk, O. et al. *Contemporary Methods of Countering Unmanned Systems: Technologies and Prospects*. Судноводіння. 2024. № 36. С. 102—115. DOI: 10.31653/2306-5761.36.2024.102-115.
14. Чигінь В. І. Акустичні методи виявлення малорозмірних повітряних цілей : монографія. Львів : НАСВ. 2020. 148 с.
15. Kay, S. M. (1998). *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory*. Prentice Hall. 560 p.

16. IEEE Std 1451.5-2007. Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators. New York : IEEE. 2007.
17. Bar-Shalom, Y., Li, X., R. & Kirubarajan, T. (2001). Estimation with Applications to Tracking and Navigation. Wiley. 552 p.
18. Blackman, S. & Popoli, R. (1999). Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Artech House. 1230 p.
19. Infineon Technologies. Application Note: Microphone Array Beamforming with IM73A135. 2022.
20. MATLAB & Simulink Documentation. Sensor Fusion and Tracking Toolbox. MathWorks. 2025.
21. ISO 9613-1:1993. Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors. P. 1. Geneva : ISO. 1993. 21 p.
22. Дзеверін І. Г. та ін. Математичне моделювання ефективності бойового застосування підрозділів БпЛА винищувачів (перехоплювачів) при спільних діях. Системи озброєння і військова техніка. 2025. № 3(83). С. 39—46. DOI: 10.30748/soivt.2025.83.05.
23. Evdokimenkov, V. N., Kozorez, D. A. & Rabinskiy, L. N. (2021). Unmanned aerial vehicle evasion manoeuvres from enemy aircraft attack. J. of the Mechanical Behavior of Materials. Vol. 30. Pp. 87—94. DOI: 10.1515/jmbm-2021-0009.
24. TensorFlow Lite Documentation for Audio Classification. Google. 2025.
25. Microflown Avisa. Acoustic Vector Sensors for UAV Detection. Arnhem. 2023.
26. Król M. et al. (2017). SAN: An Integrated Unmanned Air Vehicles Interdictor System Concept. Problems of Mechatronics. Vol. 8. No. 4(30). Pp. 79—94. DOI:10.5604/01.3001.0010.7319.
27. Goodrich, W. (2019). Systems and Methods Countering an Unmanned Air Vehicle : pat. US 10,399,674 B2. Sep. 3.
28. Nyzhnyk, A. O. & Partyka, A. I. (2025). Development of the Concept of a UAV Detection and Neutralization System Using Interceptor Drones. Computer Systems and Networks. Vol. 7. No. 1. Pp. 235—246. DOI: 10.23939/csn2025.01.235.
29. Тютюник В. А. Автоматизовані системи моніторингу надзвичайних ситуацій з використанням акустичних сенсорів : дис. ... д-ра техн. наук. Харків. 2024.
30. ta radiolokatsionykh syhnaliv” [UAV detection based on acoustic and radar signal analysis]. Visn. ZhDTU. No. 4(71). Pp. 71—80 [in Ukrainian].
31. Chyhin, V. I. et al. (2019). “Vdoskonalennia sposobu vyivlennia BPLA za rezultatamy spektralnoho analizu akustychnykh syhnaliv” [Improving UAV detection using spectral analysis of acoustic signals]. Viisk.-tekhn. Zb. No. 20. Pp. 58—63. DOI: 10.33577/2312-4458.20.2019.58-63.
32. Infineon Technologies AG. IM73A135 Data Sheet: High SNR Microphones with Sealed Dual Membrane Technology. Rev. 1.20. Munich. 2021. 32 p.
33. Infineon Technologies AG. IM69D130 Data Sheet. Rev. 1.00. Munich. 2017. 28 p.
34. Buhaiov, M. V. (2015). “Analiz efektyvnosti vyivlennia taktychnykh BPLA pasyvnymy ta aktyvnymy zasobamy” [Analysis of tactical UAV detection effectiveness by passive and active means]. Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiynykh system. Zhytomyr. Iss. 10. Pp. 5—19 [in Ukrainian].
35. Saravanakumar, A. & Senthilkumar, K. (2014). Exploitation of acoustic signature of low flying aircraft using acoustic vector sensor. Defence Science J. Vol. 64. No. 2. Pp. 95—98.
36. Pham, T. & Srour, N. (2004). TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs. Proc. SPIE. Vol. 5417. Pp. 24—29.
37. DroneShield. Acoustic Detection Technology White Paper. Sydney. 2024.
38. Yeromenko, O. O., Babych, A. P. & Poplavets, S. I. (2025). “Udoskonalennia systemy PPO polia boiu v umovakh zastosuvannia FPV-droniv” [Improving the battlefield air defense system under FPV drone use]. Systemy obrobky informatsii. Iss. 4(183). Pp. 29—36.
39. Melnyk, O. et al. (2024). Contemporary Methods of Countering Unmanned Systems: Technologies and Prospects. Sudnovodinnia. No. 36. Pp. 102—115. DOI: 10.31653/2306-5761.36.2024.102-115.
40. Chyhin, V. I. (2020). “Akustychni metody vyivlennia malorozmnykh povitrianykh tsilei” [Acoustic methods for detecting small aerial targets]: monohrafiia. Lviv : NASV. 148 p. [in Ukrainian].
41. Kay, S. M. (1998). Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory. Prentice Hall. 560 p.
42. IEEE Std 1451.5-2007. Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators. New York : IEEE. 2007.
43. Bar-Shalom, Y., Li, X., R. & Kirubarajan, T. (2001). Estimation with Applications to Tracking and Navigation. Wiley. 552 p.
44. Blackman, S. & Popoli, R. (1999). Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Artech House. 1230 p.
45. Infineon Technologies. Application Note: Microphone Array Beamforming with IM73A135. 2022.
46. MATLAB & Simulink Documentation. Sensor Fusion and Tracking Toolbox. MathWorks. 2025.
47. ISO 9613-1:1993. Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors. P. 1. Geneva : ISO. 1993. 21 p.
48. Dzeverin, I. H. et al. (2025). “Matematychno modeliuвання efektyvnosti boiovoho zastosuvannia pidrozdiliv BpLA vynyshchuvachiv (perekhopliuvachiv) pry spilnykh

REFERENCES

1. Sokolskyi, S. O. (2023). “Akustychno vyivlennia bezpilotnykh litalnykh aparativ” [Acoustic detection of unmanned aerial vehicles]. Dys. d-ra filos. : 172. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho. 183 p. [in Ukrainian].
2. Atamanchuk, A. V. (2022). “Metod vyivlennia ta identyfikatsii BPLA z zastosuvanniam neironnoi merezhi” [UAV detection and identification method using a neural network]. Kvalif. robota mahistera. Ternopil : TNTU im. I. Puliuiua. 89 p. [in Ukrainian].
3. Tiutiunyk, V. A. et al. (2025). “Akustychnyi metod identyfikatsii zastosuvannia BPLA yak dzherel nadzvychainykh sytuatsii” [Acoustic method for UAV identification as sources of emergencies]. Social Development and Security. Vol. 15. No. 1. Pp. 300—310. DOI: 10.33445/sds.2025.15.1.26.
4. Danyk, Yu. H., Puleko, I. V. & Buhaiov, M. V. (2014). “Vyivlennia BPLA na osnovi analizu akustychnykh

- diiakh” [Mathematical modeling of combat effectiveness of UAV interceptor units in joint operations]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, No. 3(83). Pp. 39—46. DOI: 10.30748/soivt.2025.83.05.
23. Evdokimenkov, V. N., Kozorez, D. A. & Rabinskiy, L. N. (2021). Unmanned aerial vehicle evasion manoeuvres from enemy aircraft attack. *J. of the Mechanical Behavior of Materials*. Vol. 30. Pp. 87—94. DOI: 10.1515/jmbm-2021-0009.
24. TensorFlow Lite Documentation for Audio Classification. Google. 2025.
25. Microflown Avisa. Acoustic Vector Sensors for UAV Detection. Arnhem. 2023.
26. Król, M. et al. (2017). SAN: An Integrated Unmanned Air Vehicles Interdictor System Concept. *Problems of Mechatronics*. Vol. 8. No. 4(30). Pp. 79—94. DOI:10.5604/01.3001.0010.7319.
27. Goodrich, W. (2019). Systems and Methods Countering an Unmanned Air Vehicle : pat. US 10,399,674 B2. Sep. 3.
28. Nyzhnyk, A. O. & Partyka, A. I. (2025). Development of the Concept of a UAV Detection and Neutralization System Using Interceptor Drones. *Computer Systems and Networks*. Vol. 7. No. 1. Pp. 235—246. DOI: 10.23939/csn2025.01.235.
29. Tiutiunnyk, V. A. (2024). “Avtomatyzovani systemy monitorynhu nadzvychainykh sytuatsii z vykorystanniam akustychnykh sensoriv” [Automated emergency monitoring systems using acoustic sensors]: dys. ... d-ra tekhn. nauk. Kharkiv [in Ukrainian].

Tryhub V.S., Bilan I.A.

COMBINED ACOUSTIC-THERMAL TERMINAL GUIDANCE OF AUTONOMOUS INTERCEPTOR DRONES AGAINST LOW-SPEED AIR TARGETS OF THE SHAHED-136 TYPE

This article addresses the critical vulnerability of traditional air defense systems to mass-produced, low-speed kamikaze UAVs like the Shahed-136 (Geran-2). These targets operate at low altitudes (50–150 m) and have minimal radar signatures (RCS < 0.1 m²), making them difficult and expensive to intercept with standard missile systems. The research provides the first stage of a general methodology for guiding interceptor drones via passive physical fields, focusing on a fully passive, low-cost, and EW-resistant solution. The methodology involves a comprehensive analysis of the target’s acoustic and thermal signatures. The acoustic field of the Shahed-136’s MD-550 engine is characterized by a deterministic spectral structure, including the shaft frequency 75–100 Hz, blade passing frequency (BPF), and cylinder firing frequency. For reliable detection, Infineon IM73A135 MEMS microphones are selected due to their high signal-to-noise ratio (SNR), providing a calculated margin of over 25 dB at a range of 1 km. The thermal channel utilizes uncooled Long Wave Infrared (LWIR) sensors with a sensitivity (NETD) of 25 mK to track the heat signature of the engine at

distances under 500 m. A key scientific novelty of this work is the formally specified three-phase Finite State Machine (FSM) architecture. This system dynamically manages the transition between three states: acoustic search (long-range), hybrid tracking (mid-range), and LWIR-based thermal homing (terminal phase). Adaptive weighting algorithms for sensor fusion are proposed to ensure stability during «thermal crossover» periods or in high-noise environments. Furthermore, the study substantiates the use of Proportional Navigation (PN) with a constant $N=4$. Analytical calculations confirm that this approach reduces energy consumption by 40 % while increasing interception probability compared to pure pursuit methods. For a standard 7-inch FPV interceptor, the required commanded acceleration remains within a physically achievable limit of 2.4 g. The projected results indicate an 82 % probability of target acquisition at distances of 2–4 km and a high resistance to electronic warfare (approximately 95 %) due to the system’s complete passivity. This research provides a foundational framework for cost-effective, non-kinetic additions to layered air defense systems, particularly effective against GNSS-independent autonomous platforms.

Keywords: *interceptor drones, acoustic detection, thermal homing, Shahed-136, proportional navigation, sensor fusion, harmonic analysis, convolutional neural network, finite state machine, self-noise suppression, electronic warfare resistance.*

Відомості про авторів:

Тригуб Владислав Сергійович

Інститут Військово-Морських Сил
Національний університет
«Одеська морська академія»
м. Одеса, Україна
<https://orcid.org/0009-0005-2142-8780>

Білан Ірина Анатоліївна

Український науково-дослідний інститут спеціальної
техніки та судових експертиз
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1237-1565>

Information about the authors:

Tryhub Vladyslav

Institute of Naval Forces
National University «Odessa Maritime Academy»
Odessa, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0005-2142-8780>

Bilan Iryna

Ukrainian Research Institute of Special Equipment and
Forensic Expertise
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1237-1565>

Стаття надійшла до редколегії 07.05.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.