DOI 10.15276/imms.v16.no1.116
УДК 623.746:534.6:004.942

Informatics and Mathematical Methods in Simulation
Vol.16 (2026), No. 1, pp. 116-125

МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ АКУСТИЧНОЇ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ТА АКТИВНОЇ ПРОТИДІЇ ПОВІТРЯНИМ ЦІЛЯМ

П.К. Ніколюк, Д.Ю. Кохан

Донецький національний університет імені Василя Стуса
21, 600-річчя вул., Вінниця, 21021, Україна
Emails: p.nikolyuk@donnu.edu.ua, kokxan.d@donnu.edu.ua

Представлено результати розробки та моделювання інтегрованої симуляційної системи, що поєднує підсистему пасивної акустичної локації та підсистему активної протидії повітряним цілям. Запропоновано гетерогенну архітектуру сенсорного масиву, яка складається з двох вузькоспрямованих («shotgun») та двох всеспрямованих («omni») мікрофонів, і алгоритмічно реалізується з використанням зваженого методу найменших квадратів (WLS). Проведено порівняльний аналіз точності локалізації для WLS і класичного OLS у діапазоні співвідношення сигнал/шум від –10 до +20 дБ. Доведено, що WLS забезпечує зниження середньоквадратичної похибки локалізації більш ніж удвічі за низького SNR. Друга частина роботи присвячена оцінюванню бойової ефективності адаптивного методу наведення «Pure Pursuit» у реалістичних умовах із шумами, часовими затримками та обмеженням маневреності ракети. Результати підтверджують критичну роль точності локалізації та динамічного наведення у формуванні загальної ефективності системи «виявлення – ураження».

Ключові слова: пасивна акустична локація, зенітно-ракетний комплекс, зважений метод найменших квадратів, Pure Pursuit, ймовірність ураження, симуляційне моделювання.

Вступ. Сучасні умови ведення бойових дій та охорони критичної інфраструктури висувають підвищені вимоги до засобів виявлення повітряних загроз. Особливу небезпеку становлять малорозмірні низьколітаючі об’єкти, зокрема безпілотні літальні апарати та крилаті ракети, що ускладнює їх виявлення традиційними радіолокаційними системами через малу ефективну площу розсіювання та можливість маневрування поблизу рельєфу місцевості [1].

У цій ситуації пасивні акустичні системи локалізації розглядаються як перспективна альтернатива або доповнення до радіолокації. Пасивна акустика забезпечує прихованість роботи, відносно низьку вартість розгортання та певну стійкість до радіоелектронних засобів придушення, що робить її привабливою для застосувань у системах протидії малим повітряним цілям [2]. Ефективність акустичних підходів значною мірою залежить від архітектури сенсорного масиву та методів обробки сигналів, зокрема від оцінювання різниць часу приходу сигналів (TDOA) і використання статистично обґрунтованих процедур оцінювання положення [3].

Більшість існуючих досліджень зосереджено на задачах локалізації та оцінювання точності визначення положення цілі, при цьому рідко проводиться кількісний аналіз впливу вибору конфігурації сенсорів і алгоритмів оцінювання на кінцеву бойову ефективність інтегрованої системи «виявлення — ураження». Залишається недостатньо вивченим, яким чином зміни в архітектурі масиву та в процедурах зважування вимірювань транслюються у зміну ймовірності ураження цілі за реалістичних умов оперативної роботи засобу протидії [4].

У роботі запропоновано комплексну симуляційну модель, що поєднує підсистему пасивного акустичного виявлення, алгоритми локалізації на базі TDOA та динамічну модель засобу активної протидії. У межах цієї моделі досліджено вплив комбінованих конфігурацій мікрофонних масивів (вузькоспрямовані «shotgun» і всеспрямовані «omni») та застосування зваженого методу найменших квадратів (WLS) на точність локалізації (RMSE) при різних рівнях співвідношення сигнал/шум (SNR). Додатково

оцінено ефективність методу наведення ракети типу «Pure Pursuit» у задачі перехоплення за реалістичних обмежень маневреності ракети та наявності стохастичних похибок у вимірюваннях.

Мета роботи. Основною метою даної роботи є розробка, валідація та дослідження комплексної симуляційної моделі інтегрованої системи «акустична локація — засіб активної протидії», яка дозволяє кількісно оцінювати вплив архітектурних і алгоритмічних рішень підсистеми виявлення на кінцеву оперативно-бойову ефективність комплексу. Модель побудована так, щоб відтворювати реалістичні умови оперативного застосування: варіації співвідношення сигнал/шум, стохастичні похибки вимірювань, а також кінематичні й тактичні обмеження засобу ураження. Поставлена мета передбачає отримання кількісних метрик (зокрема RMSE локалізації та ймовірності ураження) й системний аналіз залежностей між параметрами сенсорної підсистеми, методами обробки даних та результатом перехоплення.

Для досягнення цієї мети сформульовано та реалізовано низку науково-технічних задач. Перша задача полягає в розробці та порівняльній оцінці методів локалізації для двох сенсорних конфігурацій: контрольної (чотири всеспрямовані мікрофони – «omni») з використанням класичного методу найменших квадратів (OLS) та пропонованої комбінованої конфігурації (дві вузькоспрямовані і дві всеспрямовані) із застосуванням статистично обґрунтованого зваженого методу найменших квадратів (WLS). Для обох варіантів передбачається чисельний експеримент у широкому діапазоні SNR із метою оцінки стабільності алгоритмів, розподілу похибки та статистичних характеристик оцінок положення цілі.

Друга задача спрямована на кількісну оцінку кінцевої бойової ефективності засобу активної протидії при використанні адаптивного алгоритму наведення ракети типу «Pure Pursuit». У межах цієї задачі моделюються реалістичні обмеження: обмежена маневреність і енергетичний ліміт ракети, випадкові втрати супроводу цілі та занижений рівень SNR у сенсорній підсистемі. Вивчається залежність ймовірності ураження від ключових параметрів сценарію, зокрема від швидкості цілі, та взаємозв’язок між точністю локалізації й успішністю перехоплення.

Очікуваний результат роботи – надання кількісних доказів ефективності інтегрованого підходу: показати, наскільки застосування комбінованого масиву й WLS знижує похибку локалізації порівняно з класичною архітектурою, і як це, у свою чергу, підвищує ймовірність ураження при реалістичних умовах. Крім того, робота має окреслити практичні рекомендації щодо проєктування сенсорної підсистеми та вибору алгоритмів наведення для систем протидії малим повітряним цілям, а також визначити напрями подальших досліджень і вдосконалення моделі.

Основна частина. Для досягнення поставленої мети було розроблено комплексну двовимірну симуляційну модель, яка імітує повний цикл роботи інтегрованої системи протидії. Архітектурно модель складається з трьох ключових, взаємопов’язаних підсистем.

Першою є підсистема акустичного виявлення, що відповідає за моделювання фізичного рівня. Вона імітує генерацію тонального акустичного сигналу повітряною ціллю, його поширення в середовищі з урахуванням геометричного затухання (обернено пропорційно відстані) та додавання адитивного білого гаусового шуму, що визначається заданим рівнем співвідношення сигнал/шум (SNR). Ця підсистема також моделює прийом сигналу мікрофонним масивом, застосовуючи до нього відповідні діаграми спрямованості.

Другою є підсистема локалізації, яка виконує первинну та вторинну обробку даних. Вона отримує змодельовані сигнали з мікрофонів, здійснює оцінку різниць часу прибуття (TDOA) між парами сенсорів та, на основі цих даних, виконує обчислення 2D-координат цілі. Ця підсистема реалізує два різні алгоритми мультилатерації для

порівняльного аналізу: звичайний метод найменших квадратів (OLS) та зважений метод найменших квадратів (WLS).

Третьою є підсистема активної протидії, що імітує логіку та динаміку мобільного зенітно-ракетного комплексу (ЗРК). Вона функціонує як скінченний автомат [5], отримуючи координати від підсистеми локалізації. На основі цих даних та власної логіки, ЗРК приймає рішення про перехоплення, моделює політ ракети за заданим методом наведення та визначає факт ураження або промаху [6].

Загальний вигляд головного вікна симуляційної моделі, що візуалізує одночасну роботу всіх трьох підсистем, наведено на рисунку 1. На ньому відображено 2D-карту оперативної обстановки з позиціями мікрофонів (M1 – M4), засобу ураження (ЗРК) та його зоною ефективності, а також реальні (отримані від моделі руху) та оцінені (отримані від підсистеми локалізації) траєкторії цілей.

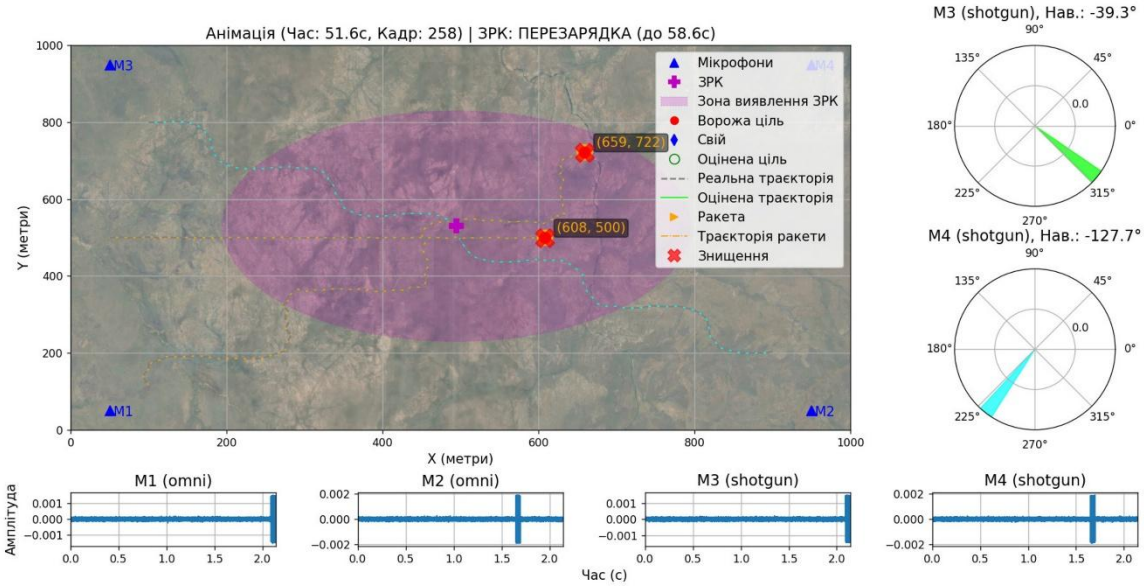

Рис. 1. Загальний вигляд симуляційної моделі інтегрованої системи «виявлення – ураження»

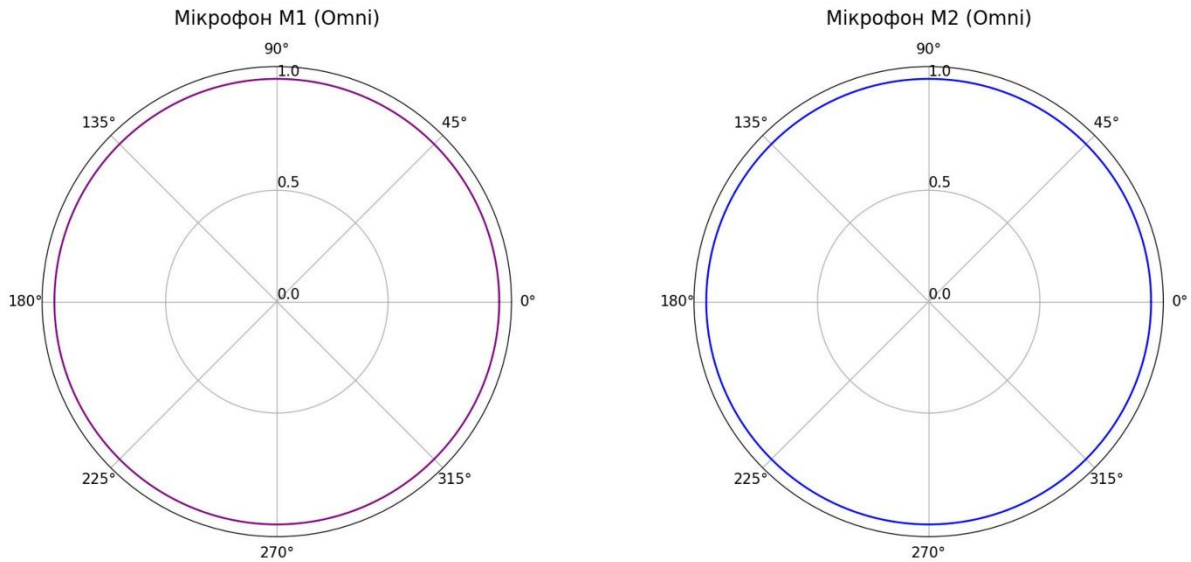

Рис. 2. Діаграми спрямованості всеспрямованих мікрофонів (M1 та M2) у полярній системі координат

В основі моделі виявлення лежить припущення, що повітряна ціль (БПЛА) генерує тональний акустичний сигнал на домінантній частоті f_0. Для простоти, у моделі цей сигнал представлено у вигляді синусоїди з амплітудою A:

$$s(t) = A\sin(2\pi f_0 t) \tag{1}$$

Поширюючись від джерела (цілі) з координатами (x_T, y_T) до k-го мікрофона, розташованого в точці (x_k, y_k), сигнал зазнає двох основних впливів: затухання, обернено пропорційного відстані d_k, та часової затримки τ_k. Крім того, на вході кожного мікрофона додається адитивний білий гаусів шум $n_k(t)$. Таким чином, прийнятий k-м мікрофоном сигнал $r_k(t)$ описується рівнянням:

$$r_k(t) = \frac{A}{d_k}\sin(2\pi f_0(t-\tau_k)) + n_k(t) \tag{2}$$

де відстань d_k та часова затримка τ_k визначаються як:

$$d_k = \sqrt{(x_T - x_k)^2 + (y_T - y_k)^2},\ \tau_k = d_k / c \tag{3}$$

причому c – швидкість звуку, а $n_k(t)$ – адитивний білий гаусів шум. Потужність шуму $n_k(t)$ визначається через параметр співвідношення сигнал/шум (SNR), що задається у децибелах (дБ):

$$SNR_{\text{dB}} = 10\log_{10}(P_s / P_n) \tag{4}$$

де P_s та P_n — середня потужність сигналу та шуму відповідно.

Визначення координат цілі базується на методі TDOA. Для цього спочатку необхідно оцінити різниці в часі прибуття сигналу $\Delta t_{k,0}$ між кожним k-м мікрофоном та опорним мікрофоном (в даній роботі – мікрофон з індексом 0). Ця оцінка $\hat{\tau}_{k,0}$ знаходиться за допомогою методу узагальненої взаємної кореляції (GCC-PHAT), який шукає часовий зсув τ, що максимізує функцію кореляції між сигналами [7]:

$$\hat{\tau}_{k,0} = \underset{\tau}{\operatorname{argmax}} \int_{-\infty}^{\infty} r_0(t) r_k(t+\tau)\,dt \tag{5}$$

де $r_0(t)$ та $r_k(t)$ — сигнали, прийняті опорним та k-м мікрофоном відповідно. Отриманий масив часових затримок $[\hat{\tau}_{1,0}, \hat{\tau}_{2,0}, \ldots, \hat{\tau}_{N-1,0}]$ є вхідними даними для підсистеми локалізації.

Отриманий набір оцінок різниць часу прибуття $[\hat{\tau}_{1,0}, \ldots, \hat{\tau}_{N-1,0}]$ є вхідними даними для задачі мультилатерації, яка полягає у розв'язанні системи нелінійних рівнянь відносно невідомих координат цілі (x, y). Кожне рівняння k в системі описує гіперболічну криву, що відповідає виміряній часовій затримці $\hat{\tau}_{k,0}$:

$$\sqrt{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} - \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} = c \cdot \hat{\tau}_{k,0} \tag{6}$$

де k пробігає значення від 1 до $N-1$ (кількість мікрофонів мінус опорний). Ця система є надлишковою і розв'язується чисельними методами, мінімізуючи сукупну похибку [8]. Ключовим аспектом даної роботи є порівняння двох різних підходів до розв'язання цієї системи, що безпосередньо пов'язані з двома різними конфігураціями сенсорного масиву.

Перша конфігурація, контрольна, складається з чотирьох ідентичних всеспрямованих мікрофонів. Вони приймають сигнал та навколишній шум однаково з усіх напрямків. Для цієї однорідної системи вимірювань природно застосовувати звичайний метод найменших квадратів (OLS). Цей метод мінімізує суму квадратів різниць (нев'язок) між розрахованими та виміряними TDOA, припускаючи, що всі вимірювання $\hat{\tau}_{k,0}$ мають однакову надійність (однакову дисперсію похибки) [9]:

$$R_{\mathrm{OLS}}(x,y) = \sum_{k=1}^{N-1} \left((\tau_k(x,y) - \tau_0(x,y)) - \hat{\tau}_{k,0} \right)^2 \to \min \tag{7}$$

де $\tau_k(x,y)$ та $\tau_0(x,y)$ — це теоретичні часи прибуття (розраховані з d_k / c та d_0 / c), а $\hat{\tau}_{k,0}$ — виміряна TDOA.

Друга конфігурація, пропонована, є комбінованою та складається з двох всеспрямованих («omni») та двох вузькоспрямованих мікрофонів типу «shotgun». Вузькоспрямовані мікрофони мають вузький головний пелюсток, що дозволяє їм досягати значного коефіцієнту підсилення сигналу та придушення шуму з-поза осі. В моделі ці мікрофони динамічно наводяться на попередню оцінену позицію цілі, що забезпечує значне локальне покращення SNR [10] (в даній моделі оцінене як +15.6 дБ).

Це створює неоднорідну систему вимірювань: оцінки TDOA, отримані з використанням «shotgun» мікрофонів, є значно надійнішими (мають меншу дисперсію похибки), ніж оцінки від «omni» мікрофонів, особливо при низьких загальних SNR.

Застосування OLS до такої системи є статистично неефективним, оскільки він ігнорує цю різницю в надійності. Тому для комбінованої конфігурації пропонується зважений метод найменших квадратів (WLS) [11, 12]. WLS мінімізує суму квадратів нев'язок, зважених за їхньою надійністю. Ваговий коефіцієнт w_k для кожної TDOA-оцінки $\hat{\tau}_{k,0}$ обирається обернено пропорційним до її дисперсії $\sigma^2_{\mathrm{TDOA},k}$ [13]:

$$w_k = \frac{1}{\sigma^2_{\mathrm{TDOA},k}} \tag{8}$$

Дисперсія похибки TDOA $\sigma^2_{\mathrm{TDOA},k}$ залежить від суми дисперсій похибок сигналів на опорному (σ_0^2) та k-му мікрофоні (σ_k^2). Кожна з цих дисперсій, у свою чергу, обернено пропорційна ефективному SNR на даному мікрофоні [7]:

$$\sigma^2_{\mathrm{TDOA},k} = \sigma_0^2 + \sigma_k^2 \quad , \quad \sigma_i^2 \propto \frac{1}{\mathrm{SNR}_i} \tag{9}$$

Таким чином, TDOA-оцінки, отримані з пари «shotgun»-мікрофонів, матимуть найменшу дисперсію і, відповідно, найбільшу вагу w_k. Це дозволяє алгоритму WLS приділяти більше уваги надійним даним і менше — зашумленим. Функція втрат WLS, що мінімізується, має вигляд:

$$R_{\mathrm{WLS}}(x,y) = \sum_{k=1}^{N-1} w_k \left((\tau_k(x,y) - \tau_0(x,y)) - \hat{\tau}_{k,0} \right)^2 \to \min \tag{10}$$

Цей підхід дозволяє коректно інтегрувати переваги вузькоспрямованих сенсорів на алгоритмічному рівні, що є ключовою гіпотезою першої частини дослідження.

Оцінені координати цілі (x, y), отримані від підсистеми локалізації, слугують вхідними даними цілевказання для третьої ключової компоненти моделі — підсистеми активної протидії. Ця підсистема імітує поведінку та кінематику зенітно-ракетного комплексу (ЗРК) в рамках реалістичного сценарію перехоплення.

Логіка роботи ЗРК описується у вигляді скінченного автомату (Finite State Machine, FSM) [6, 14], що є поширеним підходом для моделювання автономних систем. Автомат визначає операційний цикл ЗРК через низку послідовних станів. Базовим станом є «Очікування» (Idle), в якому ЗРК готовий до дії та безперервно отримує оновлені дані про ціль. Коли ціль потрапляє у зону ураження, відбувається перехід у стан «Захоплення» (Engaging), де імітується тактична затримка на підготовку до пуску $T_{\mathrm{launch_delay}}$, що вносить елемент варіативності. Після затримки відбувається «Пуск» (Launched), і з цього моменту активується модель кінематики та наведення ракети. Незалежно від результату атаки (ураження чи промах), ЗРК переходить у стан «Перезарядка» (Reloading), де він неактивний протягом фіксованого часу, імітуючи час, необхідний на підготовку до наступного перехоплення.

Ключовим елементом другої задачі дослідження є модель наведення ракети, що активується у стані «Пуск». Для кількісної оцінки ефективності використовується адаптивний метод пропорційного переслідування, або «Pure Pursuit». На відміну від примітивних методів, що спрямовують ракету у статичну точку, розраховану в момент пуску, «Pure Pursuit» є динамічним процесом. На кожному кроці симуляції Δt, система наведення ракети обчислює бажаний вектор напрямку $\vec{d}_{\text{des}}(t)$, що веде від поточної позиції ракети $\vec{P}_m(t)$ до поточної оціненої позиції цілі $\vec{P}_T(t)$:

$$\vec{d}_{\text{des}}(t) = \frac{\vec{P}_T(t) - \vec{P}_m(t)}{\left\|\vec{P}_T(t) - \vec{P}_m(t)\right\|} \tag{11}$$

Для забезпечення реалістичності моделі, на кінематику ракети накладено два фундаментальних обмеження. По-перше, ракета має фіксовану швидкість v_m (у даній роботі 180 м/с). По-друге, введено обмежену маневреність: ракета не може миттєво змінити свій поточний вектор напрямку $\vec{v}_{\text{dir}}(t)$ на бажаний $\vec{d}_{\text{des}}(t)$. Введено максимальну кутову швидкість розвороту ракети $\omega_{\max}$. Це означає, що за крок Δt, вектор напрямку може повернутися лише на максимальний кут $\theta_{\max} = \omega_{\max} \cdot \Delta t$. Фактичний новий напрямок $\vec{v}_{\text{dir}}(t + \Delta t)$ знаходиться шляхом повороту $\vec{v}_{\text{dir}}(t)$ в бік $\vec{d}_{\text{des}}(t)$ на кут, що не перевищує $\theta_{\max}$.

Таким чином, оновлення позиції ракети на кожному кроці відбувається за виразом:

$$\vec{P}_m(t + \Delta t) = \vec{P}_m(t) + \vec{v}_{\text{dir}}(t + \Delta t) \cdot v_m \cdot \Delta t \tag{12}$$

Крім кінематичних, у модель другого експерименту введено й інші «реалістичні» стохастичні та тактичні фактори. Ефективність ЗРК тестується в умовах суттєво зашумлених вхідних даних, що відповідає низькому SNR (SNR = -5 дБ). Крім того, існує ненульова ймовірність втрати супроводу цілі, що на поточному кроці підсистема локалізації не надасть оновлених координат, змушуючи ракету летіти "всліпу" до останньої відомої позиції. Нарешті, ракета має обмеження палива і може перебувати в польоті лише обмежений час, після чого атака вважається невдалою. Перехоплення вважається успішним, якщо відстань між ракетою та реальною позицією цілі стає меншою за заданий радіус ураження R_k.

Результати моделювання та їх аналіз. Для валідації розробленої моделі та кількісного порівняння алгоритмічних та архітектурних рішень було проведено два ключових обчислювальних експерименти. Перший з них, присвячений вирішенню першої задачі дослідження, полягав в оцінці точності та стабільності підсистеми локалізації шляхом порівняння двох системних конфігурацій. Перша конфігурація, контрольна, складалася з чотирьох всеспрямованих сенсорів («4 'omni'») з обробкою даних за допомогою звичайного методу найменших квадратів (OLS). Друга, пропонована, включала комбінований масив («2 'shotgun' + 2 'omni'») з обробкою за допомогою зваженого методу найменших квадратів (WLS).

Для обох конфігурацій було проведено серію з 10 симуляцій на кожній тестовій точці для усереднення результатів. Моделювання проводилося у широкому діапазоні співвідношення сигнал/шум (SNR) – від -10 дБ (дуже складні умови виявлення) до +20 дБ (сприятливі умови). Як інтегральну метрику якості використовувалася середньоквадратична похибка (RMSE) локалізації, що показує середнє відхилення оціненої позиції від реальної.

Результати обчислювального експерименту зведено у Таблиці 1 та візуалізовано на рисунку 3.

Таблиця 1.

Порівняльні результати точності локалізації для конфігурацій WLS та OLS

SNR (дБ)	RMSE 2 «shotgun + 2 omni (WLS)» (м)	STD «2 shotgun + 2 omni (WLS)» (м)	RMSE «4 omni (OLS)» (м)	STD «4 omni (OLS)» (м)
-10	1.248	0.075	2.713	0.162
-5	0.702	0.034	1.559	0.062
0	0.395	0.033	0.890	0.041
5	0.224	0.010	0.483	0.029
10	0.124	0.006	0.274	0.010
15	0.070	0.004	0.154	0.008
20	0.040	0.003	0.084	0.005

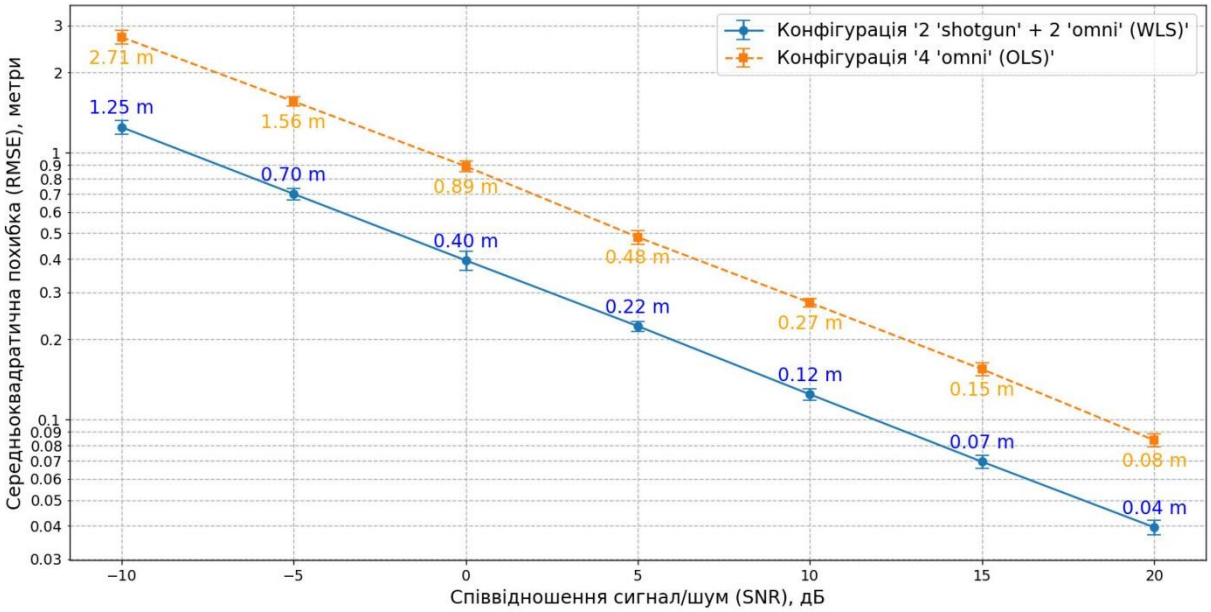

Рис. 3. Залежність точності локалізації (RMSE) від SNR

Аналіз отриманих даних дозволяє зробити кілька ключових висновків. Пропонована конфігурація «2+2 WLS» демонструє суттєво вищу точність локалізації порівняно з контрольною «4 omni OLS» в усьому досліджуваному діапазоні SNR.

Найбільш показовою є різниця в області низьких значень SNR, яка є найскладнішою і водночас найважливішою для пасивних акустичних систем. При SNR = -10 дБ, пропонована система (RMSE 1.248 м) забезпечує точність у 2.17 рази вищу, ніж контрольна (RMSE 2.713 м). Це підтверджує основну гіпотезу: зважений метод найменших квадратів (WLS) ефективно використовує переваги гетерогенного масиву. Алгоритм коректно ідентифікує TDOA-вимірювання, отримані з «shotgun» мікрофонів (де ефективний SNR значно вищий завдяки придушенню шуму), і надає їм більшої ваги при розв'язанні системи рівнянь. На противагу, OLS однаково враховує всі вимірювання, дозволяючи «шумним» даним від «omni» сенсорів погіршувати загальну точність оцінки. Зі зростанням SNR перевага WLS-системи зберігається, хоча абсолютна різниця похибок зменшується, оскільки обидві системи починають працювати в умовах високої достовірності вимірювань.

Отримані у першому експерименті дані підтверджують, що комбінована архітектура сенсорів у поєднанні з WLS-обробкою здатна забезпечити високу точність цілевказання навіть за вкрай несприятливих акустичних умов. Це дає змогу перейти до вирішення другої задачі дослідження: з'ясувати, чи достатньо цієї точності для ефективного перехоплення цілі, та як ця ефективність залежить від параметрів самої цілі.

Для цього було проведено другий обчислювальний експеримент, що моделює повний цикл перехоплення з використанням адаптивного методу наведення. Щоб

наблизити умови до реалістичних, у модель було свідомо введено низку «жорстких» тактичних та кінематичних обмежень, описаних у методології. Зокрема, моделювання проводилося при низькому SNR (-5 дБ); використовувалася повільна ракета ($v_m = 180$ м/с) з обмеженою маневреністю та обмеженим часом польоту (20 сек); також було введено 5% ймовірність зриву супроводу цілі на кожному кроці.

У цьому експерименті оцінювалася ймовірність ураження цілі залежно від її власної швидкості, яка варіювалася від 40 м/с до 120 м/с. Для кожної точки швидкості було проведено 300 симуляційних прогонів для отримання статистично значущої оцінки. Результати наведено у таблиці 2 та на рисунку 4.

Таблиця 2.

Ймовірність ураження цілі при використанні адаптивного методу наведення

Швидкість цілі (м/с)	P_p (%)
40	91%
50	87%
60	87%
70	63%
80	81%
90	79%
100	69%
110	49%
120	29%

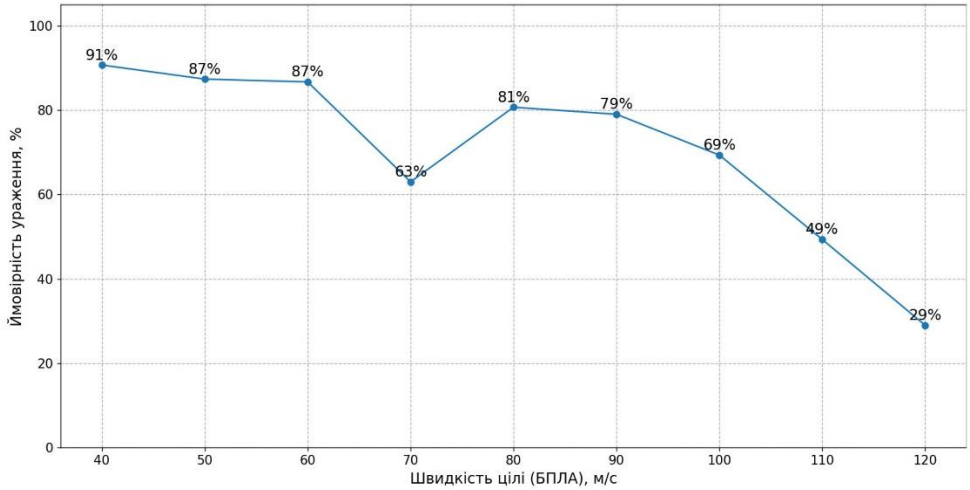

Рис. 4. Залежність ймовірності перехоплення від швидкості цілі для адаптивного методу наведення

Аналіз результатів другого експерименту підтверджує критичну важливість використання адаптивного методу наведення. Навіть за сукупності несприятливих факторів, метод «Pure Pursuit» демонструє високу ефективність проти цілей, що рухаються з відносно низькою швидкістю, досягаючи 91% ймовірності перехоплення для цілі зі швидкістю 40 м/с.

Зі зростанням швидкості цілі спостерігається очікуване, але нелінійне зниження ефективності. Це падіння ймовірності перехоплення (наприклад, до 29% при 120 м/с) пояснюється не стільки похибками локалізації, скільки суто кінематичними обмеженнями самої ракети. Повільна ракета з обмеженою маневреністю фізично не встигає компенсувати швидке переміщення цілі та вийти в точку перехоплення в межах свого енергетичного ліміту. Невеликий стрибок ефективності в районі 80-90 м/с може бути пов’язаний зі стохастичною природою моделі та особливостями геометрії перехоплення у конкретному сценарії.

Загалом, результати другого експерименту доводять, що високої точності локалізації (досягнутої завдяки WLS) недостатньо самій по собі. Для реалізації цієї точності у високий показник ймовірності перехоплення необхідно використовувати адаптивні методи наведення, здатні компенсувати похибки вимірювань та маневри цілі в реальному часі.

Висновки. У ході виконаного дослідження було розроблено та валідовано комплексну симуляційну модель, що інтегрує підсистему пасивної акустичної локації та підсистему активної протидії повітряним цілям. Розроблена модель дозволила кількісно оцінити та порівняти ключові архітектурні та алгоритмічні рішення, що впливають на загальну ефективність системи «виявлення-ураження».

За результатами першого обчислювального експерименту було кількісно доведено перевагу пропонованої комбінованої архітектури сенсорного масиву. Конфігурація, що складається з двох вузькоспрямованих («shotgun») та двох всеспрямованих («omni») мікрофонів, у поєднанні зі зваженим методом найменших квадратів (WLS), продемонструвала значно вищу точність локалізації порівняно з контрольною системою. Зокрема, в умовах низького співвідношення сигнал/шум, пропонований підхід забезпечив підвищення точності (зниження RMSE) у 2.17 разів, підтвердивши, що WLS-алгоритм ефективно використовує надійніші вимірювання від «shotgun» сенсорів.

За результатами другого експерименту, що проводився в реалістичних умовах з урахуванням кінематичних та тактичних обмежень, було оцінено бойову ефективність комплексу. Доведено, що для успішного перехоплення маневрової цілі критично необхідне використання адаптивного методу наведення «Pure Pursuit», який дозволив досягти високих показників ймовірності перехоплення, зокрема 91% для цілі зі швидкістю 40 м/с. Таким чином, робота доводить, що ефективність сучасної системи акустичної протидії залежить від синергії трьох компонентів: архітектури сенсорів (комбінований масив), алгоритму обробки (WLS) та алгоритму наведення. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення моделі для 3D-простору та аналіз складніших акустичних ефектів.

Список літератури

1. Casado-Galan E., Gonzalez-Serrano F. J., Ramirez-Rincon J. J., Casar-Corredera J. R. Review and Simulation of Counter-UAS Sensors for Unmanned Traffic Management. *Sensors.* 2022. Vol. 22, No. 1. P. 189. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/22/1/189
2. Chiper D., Stanciu T., Anghel A., Popescu D. Drone Detection and Defense Systems: Survey and a Software-Defined Radio-Based Solution. *Sensors.* 2022. Vol. 22, No. 4. P. 1453. DOI: 10.3390/s22041453
3. Lim J., Joo J., Kim S.-C. Performance Enhancement of Drone Acoustic Source Localization Through Distributed Microphone Arrays. *Sensors.* 2025. Vol. 25, No. 6. P. 1928. DOI: 10.3390/s25061928
4. Wu S., Zheng Y., Ye K., Cao H., Zhang X., Sun H. Sound Source Localization for Unmanned Aerial Vehicles in Low Signal-to-Noise Ratio Environments. *Remote Sensing.* 2024. Vol. 16, No. 11. P. 1847. URL: https://www.mdpi.com/2072-4292/16/11/1847
5. de Araujo V., Almeida A. P. G. S., Miranda C. T., de Barros Vidal F. A. A Parallel Hierarchical Finite State Machine Approach to UAV Control for Search and Rescue Tasks. *11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Vienna, Austria.* 2014. Vol. 1. P. 410–415. DOI: 10.5220/0005121104100415
6. Harel D. Statecharts: A visual formalism for complex systems. *Science of Computer Programming.* 1987. Vol. 8, No. 3. P. 231–274. DOI: 10.1016/0167-6423(87)90035-9
7. Knapp C. H., Carter G. C. The generalized correlation method for estimation of time delay. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing.* 1976. Vol. 24. No. 4. P. 320–327. DOI: 10.1109/TASSP.1976.1162830

8. Altena A., Luesutthiviboon S., de Croon G., Snellen M., Voskuijl M. Comparison of Acoustic Localisation Techniques for Drone Position Estimation Using Real-World Experimental Data. *29th International Congress on Sound and Vibration.Crete, Greece.* 2023.
9. Chan Y. T., Ho K. C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location. *IEEE Transactions on Signal Processing.* 1994. Vol. 42, No. 8. P. 1905–1915. DOI: 10.1109/78.301830
10. Liu M., Hu J., Zeng Q., Jian Z., Nie L. Sound Source Localization Based on Multi-Channel Cross-Correlation Weighted Beamforming. *Micromachines.* 2022. Vol. 13. No. 7. P. 1010. DOI: 10.3390/mi13071010. URL: https://www.mdpi.com/2072-666X/13/7/1010
11. Zhang L., Zhang T., Shin H.-S. An Efficient Constrained Weighted Least Squares Method with Bias Reduction for TDOA-Based Localization. IEEE Sensors Journal. 2021. Vol. 21. No. 7. P. 8823–8833. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3057448
12. Jin B., Xu X., Zhang T. Robust Time-Difference-of-Arrival (TDOA) Localization Using Weighted Least Squares with Cone Tangent Plane Constraint. *Sensors.* 2018. Vol. 18. No. 3. P. 778. DOI: 10.3390/s18030778. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5876713
13. Park C.-H., Chang J.-H. Time-of-arrival source localization based on weighted least squares estimator in line-of-sight/non-line-of-sight mixture environments. *International Journal of Distributed Sensor Networks.* 2016. Vol. 12. No. 12. Article ID 168782. DOI: 10.1177/1550147716683827. URL: https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1550147716683827
14. Samek M. Practical Statecharts in C/C++. Quantum Programming for Embedded Systems. Boca Raton: CRC Press, 2002. 304 p. ISBN 978-1-57820-110-5.

MODELING OF A COMBINED ACOUSTIC DETECTION AND ACTIVE COUNTERACTION SYSTEM FOR AERIAL TARGETS

P.K. Nikoliuk, D.Y. Kokhan

Vasyl Stus Donetsk National University
21, 600-richchia Str., Vinnytsia, 21021, Ukraine
e-mail: p.nikolyuk@donnu.edu.ua, kokxan.d@donnu.edu.ua

The paper presents the results of the development and modeling of an integrated simulation system that combines a passive acoustic localization subsystem and an active counter-measure subsystem for aerial targets. A heterogeneous sensor array architecture is proposed, consisting of two narrow-beam (‘shotgun’) and two omnidirectional (‘omni’) microphones, which is algorithmically implemented using the Weighted Least Squares (WLS) method. A comparative analysis of localization accuracy for WLS and classical OLS is carried out over a Signal-to-Noise Ratio (SNR) range from –10 to +20 dB. It is proven that WLS provides a reduction in the Root Mean Square Error (RMSE) of localization by more than twofold at low SNR. The second part of the work is devoted to evaluating the combat effectiveness of the "Pure Pursuit" adaptive guidance method under realistic conditions with noise, time delays, and limited missile maneuverability. The results confirm the critical role of localization accuracy and dynamic guidance in shaping the overall effectiveness of the "detection-to-engagement" system.

Keywords: passive acoustic localization, surface-to-air missile system, Weighted Least Squares (WLS), Pure Pursuit, probability of kill, simulation modeling.