

*Кохан Д. Ю., здобувач вищої освіти,
Ніколюк П. К., д-р фіз.-мат. наук, професор,
професор кафедри інформаційних технологій,
Донецький національний університет імені Василя Стуса*

МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ АКУСТИЧНОЇ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ТА АКТИВНОЇ ПРОТИДІЇ ПОВІТРЯНИМ ЦІЛЯМ

Анотація. Розглянуто підхід до моделювання інтегрованої системи пасивної акустичної локації та мобільних засобів протидії. Досліджено використання комбінованого масиву мікрофонів (всеспрямованих та вузькоспрямованих) для виявлення і супроводу цілей. Проаналізовано логіку поведінки рухомого ЗРК, що отримує дані від акустичної системи.

Ключові слова: акустична локація, моделювання, TDOA, діаграма спрямованості, засоби протидії, ЗРК, БПЛА.

Вступ. Актуальність задачі виявлення малорозмірних повітряних загроз, як от БПЛА, обумовлена їх здатністю оминати традиційні РЛС [1]. Пасивні акустичні системи є перспективною альтернативою, проте їх ефективність значно зростає під час інтеграції з автоматизованими засобами протидії. Метою роботи є дослідження такої інтегрованої системи шляхом розробки 2D-симулятора, що моделює не лише процес акустичного виявлення, але й динамічну реакцію засобів ураження (ЗРК). Програмна реалізація виконана на Python з використанням matplotlib.

Основний текст. В основі моделі лежить поєднаний масив мікрофонів. Він поєднує всеспрямовані мікрофони (M1, M2) для первинного виявлення та вузькоспрямовані (M3, M4) для супроводу. Модель імітує поширення акустичного сигналу від цілі, який для простоти задається як синусоїдальний:

$$s(t) = A \sin(2\pi f_0 t), \quad (1)$$

де A – амплітуда сигналу;

f_0 – його основна частота.

Обчислення координат цілі (x, y) відбувається за методом TDOA (Time Difference of Arrival). Алгоритм використовує взаємну кореляцію сигналів, прийнятих опорним (s_0) та k -м (s_k) мікрофоном [2], для знаходження часової затримки $\Delta t_{k,0}$ як аргументу, що максимізує функцію кореляції:

$$\Delta t_{k,0} = \operatorname{argmax}_{\tau} \int s_0(t) s_k(t + \tau) dt, \quad (2)$$

де τ – зсув у часі.

Отримані затримки $\Delta t_{k,0}$ потім використовуються для розв'язання задачі мультилатерації методом найменших квадратів для обчислення 2D-координат цілі.

Ключовою особливістю моделі є симуляція динамічного засобу протидії (ЗРК), що функціонує як скінченний автомат, що є поширеним підходом для моделювання автономних систем [4]. Отримавши координати ворожої цілі, ЗРК переходить зі стану «Очікування» у «Рух до цілі», фізично переміщуючись для скорочення дистанції. Досягнувши ефективною відстані, він переходить у «Захоплення», ініціюючи затримку перед пуском. Після пуску («Пуск») система моде-

лює політ ракети та переходить у стан «Перезарядка» незалежно від результату, що імітує реальний бойовий цикл [3]. Модель також включає логіку ідентифікації «свій-чужий» (IFF) для запобігання враженню дружніх об'єктів.

Візуалізація, реалізована через matplotlib, дає змогу в реальному часі аналізувати взаємодію всіх компонентів. На ній відображається не лише рух цілі (реальний та оцінений), але й зміна позиції ЗРК, його зона ураження, траєкторія ракети та поточний стан (наприклад, 'ПЕРЕЗАРЯДКА').

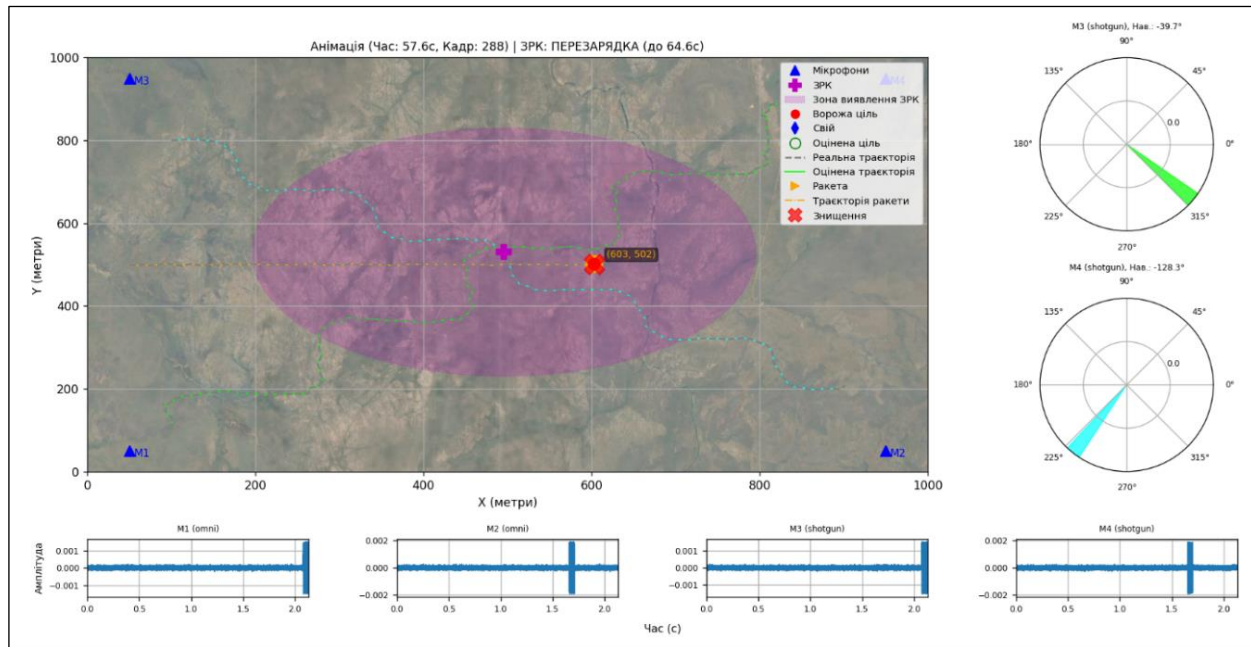


Рисунок 1 – Головне вікно симуляції:
рух цілі, оцінена траєкторія та динамічна робота ЗРК

Висновки. Розроблена модель підтверджує ефективність комбінованого підходу до акустичного виявлення, де всеспрямовані мікрофони забезпечують первинне виявлення, а вузькоспрямовані – точне супроводження. Моделювання логіки станів ЗРК дає змогу оцінити повний цикл «виявлення-ураження», враховуючи час на переміщення та перезарядку. Подальший розвиток може включати моделювання складніших траєкторій цілей та алгоритмів обробки сигналів в умовах сильних завад.

Список використаних джерел

1. Performance Enhancement of Drone Acoustic Source Localization Through Distributed Microphone Arrays / H. Kim, Y. Kwon, S. Park, H. Son, J. Lee, S. Kim. *Sensors*. 2025. Vol. 25(6). P. 1928. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/6/1928> (дата звернення: 26.10.2025).
2. 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(4). P. 320–327.
3. Review and Simulation of Counter-UAS Sensors for Unmanned Traffic Management / E. Casado-Galan, F. J. Gonzalez-Serrano, J. J. Ramirez-Rincon, J. R. Casar-Corredera. *Sensors*. 2022. Vol. 22(1). P. 189. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/1/189> (дата звернення: 26.10.2025).
4. A Parallel Hierarchical Finite State Machine Approach to UAV Control for Search and Rescue Tasks / V. de Araujo, A. P. G. S. Almeida, C. T. Miranda, F. de Barros Vidal. *Proceedings of the 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*. 2014. P. 410–415.