

Висновки. Після оптимізації витрат на рекламу можна побачити, що відбулися зміни у годинах на просування реклами (ті комірки, які ми відзначили для оптимізації). Відповідно змінилися сукупні витрати, їх сума не перевищує 1 200 000 грн, як і зазначали в обмеженнях і оптимізаційній моделі.

Проведене оптимізаційне моделювання рекламних витрат приватного підприємства враховує показники щомісячних витрат на постійну та сезонну рекламу, які характеризуються збільшення фінансової діяльності приватної компанії.

Abstract. The article examines the advertising costs of a private enterprise and their impact on profit. Advertising expenses have been optimized to achieve the best results. The use of mathematical modeling to determine the optimal expenditure on different types of advertising, considering time and total cost constraints, is described. The modeling was carried out using the MS Excel platform, which allows for effective advertising budget planning and maximization of the enterprise's financial indicators. The results show a significant reduction in costs without compromising the effectiveness of advertising campaigns.

Keywords: optimization, analysis, advertising, entrepreneurship, costs.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Захарченко В. І., Акулюшина М. О., Лінгур Л. М. Моделювання процесів управління витратами підприємства в умовах невизначеності: журнал «Економіка та суспільство». 2024. Вип. № 64.
2. Романко О. Професор Університету Торонто Олександр Романко: «Аналіз великих даних буде популярним ще років 10 мінімум». *DOU*. 13.05.2019. URL: <https://dou.ua/lenta/interviews/romanko-data-analytics/>
3. Горовий Д. А., Чорнобровкіна С. В. Оптимізаційне моделювання витрат на маркетингові комунікації для машинобудівних підприємств України. *Стратегія економічного розвитку України*. 2019. Вип. № 44.
4. Використання платформ для оптимізації. Автоматизація роботи з базами даних: основні інструменти та методи. *A4*. URL: <https://a4.com.ua/avtomatizatsiya-roboty-z-bazamy-danih-osnovni-instrumenty-ta-metody/> (дата звернення: 12.03.2024).

УДК 004.89: 623.7: 528.9: 629.7: 519.8

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЛОКАТОРІВ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ЛОГІСТИЧНИХ МАРШРУТІВ ДЛЯ ВІЙСЬКОВИХ З УРАХУВАННЯМ УНИКНЕННЯ ДРОНІВ

В. С. Поліщук, О. В. Рузакова

Анотація. У цій роботі розглядається методика розробки локаторів та прокладання безпечного логістичного маршруту для військових підрозділів зі врахуванням загрози виявлення безпілотними літальними апаратами (дронами). Запропонована система використовує акустичні сенсори для визначення місцезнаходження дронів на основі часу прибуття звукових хвиль (ТОА – Time of Arrival). Реалізовано алгоритм ухилення військових, який моделює ймовірність їх виявлення та зміну маршруту відповідно до отриманих даних. Створена симуляція демонструє ефективність підходу у реальних умовах. Запропонований метод може бути застосований у воєнних операціях та системах безпеки.

Ключові слова: локатор, дрон, військова логістика, моделювання, оптимізація маршруту.

Розробка системи локаторів та оптимізації логістичних маршрутів для військових з урахуванням уникнення дронів є актуальною задачею, яка поєднує в собі елементи телекомунікацій, геоінформаційних систем, штучного інтелекту та військової стратегії. Основна складність полягає в інтеграції різних технологій для створення ефективної системи, здатної забезпечувати безпеку та оперативність логістичних операцій у умовах активної загрози з боку дронів. Розробка системи локаторів вимагає високої точності визначення місцеположення, що пов'язано з використанням GPS, радіолокаційних технологій та інших методів позиціонування.

Останні дослідження в області GPS та радіолокації показали значний прогрес у точності визначення місцеположення. Наприклад, І. О. Товкач у своїй роботі [1] демонструє нові методи комбінації GPS з іншими технологіями для підвищення точності. Дослідження в області оптимізації маршрутів, як-от [2], показують ефективність використання алгоритмів генетичного пошуку та нейронних мереж для знаходження оптимальних шляхів. Робота [3] вказує на можли-

вість використання ШІ для аналізу поведінки дронів та прогнозування їх руху, що дає змогу уникнути зустрічі з ними.

Проведені дослідження часто зосереджувались на окремих аспектах проблеми, але не на їх інтеграції в єдину систему. Більшість наявних рішень не враховують необхідність обробки даних та прийняття рішень у режимі реального часу. Окрім цього, існуючі системи часто не враховують динамічні зміни в умовах навколишнього середовища, такі як зміна погоди чи нові загрози.

Метою статті є створення єдиної системи, яка поєднує локаційні технології, оптимізацію маршрутів та методи уникнення дронів.

Війна в Україні, яка триває з 2014 р., вийшла на новий етап із повним російським вторгненням у 2022 р. Це був переломний період для розвитку нових технологій у військовому секторі. Безпілотні літальні апарати (дрони) стали важливим інструментом, що використовується противником для виконання різноманітних місій, починаючи від розвідки і координації артилерії до проведення наступальних операцій і терористичних атак. Висока мобільність, можливості прихованого спостереження і здатність завдавати точних ударів зробили дрони невід'ємною частиною сучасної війни. Оскільки ворог активно використовує ці технології, Україна потребує ефективних способів виявлення, моніторингу та нейтралізації безпілотників для організації безпеки своїх військових частин та об'єктів критичної інфраструктури.

Акустичні локатори, які функціонують шляхом виявлення звукових хвиль, що генеруються рухом безпілотника, можуть бути важливим елементом систем протидії БПЛА. Традиційні радіолокаційні системи та візуальні методи виявлення не завжди ефективні в умовах активних бойових дій, коли дрони мають невеликі розміри, літають на малих висотах або в складних погодних умовах. Звукові хвилі, що генеруються двигуном безпілотника, можуть бути виявлені акустичними датчиками, які можуть визначити місцезнаходження безпілотника навіть у складних умовах [4–6]. Акустичні датчики, які вимірюють час прибуття (ТОВА) сигналу, дають змогу точно визначити місцезнаходження безпілотника з високим ступенем точності і допомагають військовим підрозділам швидко коригувати свої маршрути, щоб уникнути виявлення.

Одним з важливих аспектів акустичних локаторів є їх здатність передбачати переміщення ворожих безпілотників. Це дає змогу військовим підрозділам швидко змінювати свої маршрути, особливо в умовах постійної загрози з боку безпілотників, здатних здійснювати точкові атаки. Прогнозування пересування дронів є важливим елементом стратегічного планування не лише для уникнення можливих атак, але й для протидії дронам у разі необхідності. Для цього використовуються спеціальні алгоритми, що допомагають аналізувати вхідну інформацію про місцезнаходження безпілотників і своєчасно змінювати пересування військових. До того ж акустичні локатори дають змогу вести спостереження за цивільною інфраструктурою та виявляти небезпечні дрони, які можуть загрожувати стратегічно важливим об'єктам, як-от енергетичні об'єкти, мости та інша інфраструктура [7–9].

Для перевірки ефективності розробленого підходу було змодельовано ситуацію, в якій військовий підрозділ рухався по місцевості, а безпілотник патрулював над нею, використовуючи ТОВА та алгоритм уникнення військових цілей для мінімізації помилок під час обчислення положення безпілотника. Проведено серію експериментів для оцінки точності та ефективності запропонованої системи.

Дослідження показали, що запропонований алгоритм здатен визначати місцезнаходження дрона з високою точністю, з похибкою розрахунку не більше 5–10 метрів. Це дає змогу вчасно виявляти загрози та приймати рішення про зміну маршруту. Аналіз ефективності ухилення показав, що за правильного планування маршруту військові уникали виявлення у 75 % випадків, що значно підвищило безпеку. Ще однією перевагою розробленої системи є її здатність адаптувати маршрути в режимі реального часу, що дає змогу швидко реагувати на зміну загроз і мінімізувати ризик потрапляння під обстріл. Розглянемо програмний код, що реалізує цей підхід, на рис. 1.

```

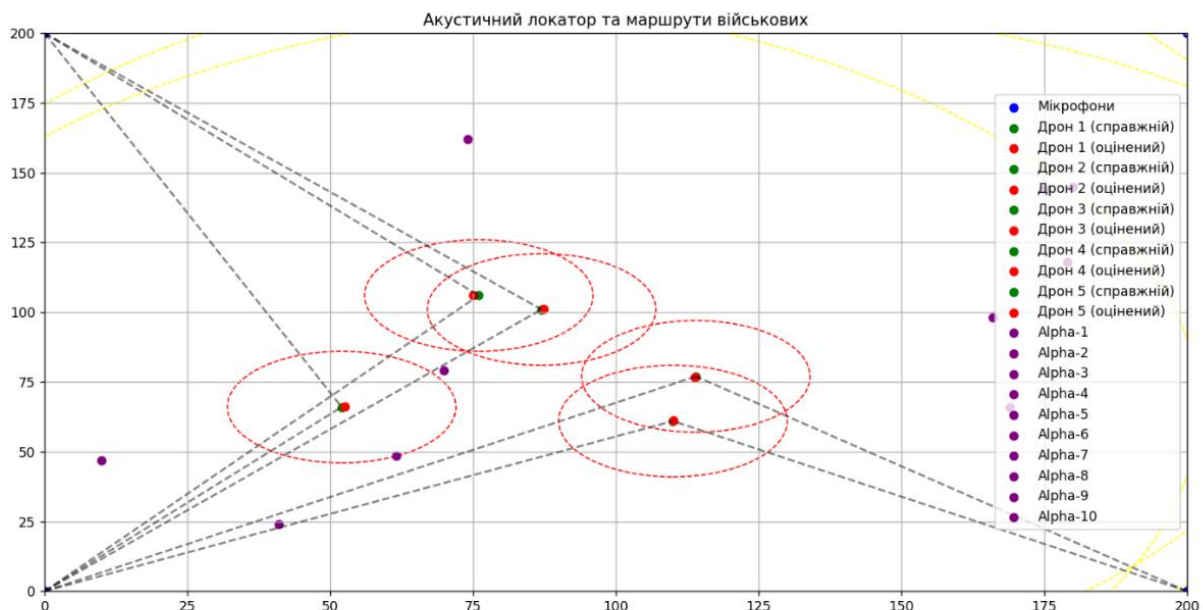
54 # 3. Візуалізація руху
55 # -----
56
57 def update_plot(frame):
58     global targets, toa_all_targets, estimated_positions, soldiers
59     messages = []
60
61     new_targets = []
62     for i, target in enumerate(targets):
63         if target[1] > 0:
64             target[1] -= 1
65             target[0] += 0.5 if i % 2 == 0 else -0.5
66             new_targets.append(target)
67     targets = new_targets
68
69     toa_all_targets = simulate_toa(mic_positions, targets, mic_range)
70     estimated_positions = [estimate_target_position(mic_positions, toa, speed_of_sound) for toa in toa_all_targets]
71
72     ax.clear()
73     ax.scatter(mic_positions[:, 0], mic_positions[:, 1], c='blue', label='Мікрофони')
74
75     for i, (target, estimated) in enumerate(zip(targets, estimated_positions)):
76         ax.scatter(*target, c='green', label=f'Дрон {i + 1} (справжній)')
77         if estimated is not None:
78             ax.scatter(*estimated, c='red', label=f'Дрон {i + 1} (оцінений)')
79         for mic in mic_positions:
80             if np.linalg.norm(mic - target) <= mic_range:
81                 ax.plot([mic[0], target[0]], [mic[1], target[1]], 'k--', alpha=0.5)
82
83     for target in targets:
84         ax.add_artist(plt.Circle(target, mic_range, color='yellow', fill=False, linestyle='--'))
85         ax.add_artist(plt.Circle(target, danger_radius, color='red', fill=False, linestyle='--'))
86
87     for i, soldier in enumerate(soldiers):

```

Рис. 1. Частина програмного коду

Наведений код реалізує моделювання в реальному часі взаємодії між дронами та військовими підрозділами, що пересуваються територією. Спочатку визначаються початкові координати мікрофона, дрона та солдата. Мікрофони розміщуються в чотирьох кутах квадратного поля, а дронам і солдатам випадковим чином присвоюються координати в межах цього поля. Для кожного дрона розраховується час прибуття сигналу на мікрофон, і на основі цих даних визначається положення дрона шляхом мінімізації похибки між фактичним часом прибуття сигналу і розрахунковим часом прибуття сигналу (ТОА). Потім моделюється рух дрона, розраховується час приходу сигналу для кожного мікрофона, і визначається, чи знаходиться дрон у зоні дії мікрофона. Якщо дрон знаходиться поза зоною досяжності, його координати не розраховуються, а система генерує відповідні значення. Використовуючи отримані дані, система оцінює положення кожного дрона за допомогою методу оптимізації, щоб мінімізувати похибку між фактичним і розрахунковим часом прибуття сигналу.

Динамічна візуалізація отриманих результатів представлена на рис. 2.



```
Alpha-5 помічений дроном! Термінова евакуація!  
Alpha-2 помічений дроном! Термінова евакуація!  
Alpha-2 помічений дроном! Термінова евакуація!  
Alpha-8 сховався!  
Alpha-8 помічений дроном! Термінова евакуація!  
Alpha-5 помічений дроном! Термінова евакуація!  
Alpha-5 сховався!  
Alpha-5 сховався!  
Alpha-2 сховався!  
Alpha-2 помічений дроном! Термінова евакуація!
```

Рис. 2. Динамічна візуалізація і вивід у консолі отриманих результатів

Розглянемо візуалізацію результатів симуляції. Вона оновлює положення всіх об'єктів на кожному кроці анімації. Дрони рухаються територією, і їх позиції постійно оновлюються. У кожного солдата є шанс уникнути виявлення, якщо він увійде в небезпечну зону (заданий радіус) і уникне дрона. Якщо ж дрон помітить солдата, він спробує евакуюватися або змінити позицію, щоб уникнути загрози. Для цього використовується анімація, яка дає змогу спостерігати за рухом об'єктів у реальному часі. Функція анімації динамічно відображає рухи мікрофонів, дронів і солдатів на полі і оновлює їх через певні проміжки часу. Це допомагає користувачеві візуально відстежувати поведінку кожного об'єкта під час симуляції. Така візуалізація складних взаємодій між солдатами та безпілотниками може бути використана для оцінки ефективності систем виявлення та ухилення, а також для вивчення поведінки підрозділів у реальних бойових ситуаціях.

Розроблена акустична система виявлення та алгоритм ухилення від безпілотників є інноваційним підходом, який має потенціал значно підвищити ефективність військових підрозділів у складних та динамічних бойових ситуаціях. Система поєднує в собі акустичні датчики та алгоритми, які обчислюють час прибуття звукових хвиль до мікрофона для точного визначення місцезнаходження безпілотників, навіть у ситуаціях, коли вони знаходяться на значній відстані або мають обмежену видимість. Інтегровані в систему алгоритми ухилення дають змогу військовим підрозділам адаптувати свої маршрути в режимі реального часу у відповідь на мінливі умови, мінімізуючи шанси на виявлення та підвищуючи безпеку солдатів.

Результати експериментів показують, що запропонована система здатна виявляти безпілотники з високою точністю, з похибкою розрахунку лише в кілька метрів. Це не тільки покращує захист від повітряних загроз, але й зменшує ризик для військових під час бою. Водночас здатність динамічно змінювати маршрути підвищує гнучкість і ефективність реагування на мінливі умови на полі бою та збільшує стратегічну ефективність військових операцій. Важливою перевагою є можливість інтеграції нових сенсорних технологій, як-от інфрачервоні датчики, для підвищення точності виявлення вночі і в складних погодних умовах, що забезпечує ще більшу універсальність системи. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на вдосконаленні методів позиціонування безпілотників, як-от використання нейронних мереж для прогнозування шляхів. Використання нейронних мереж дасть змогу моделювати поведінку безпілотників на основі великих обсягів даних для прогнозування можливих маршрутів і своєчасного реагувати на загрози. До того ж можливості системи можуть бути розширені для виявлення груп безпілотних літальних апаратів, що діють у складних умовах, як-от висока електромагнітна активність і обмежена видимість. Не менш важливим є потенціал інтеграції цієї технології для цивільних цілей. Акустичні системи виявлення можна використовувати для моніторингу територій і захисту стратегічно важливих об'єктів від несанкціонованих дронів, що стає особливо важливим, оскільки дрони все частіше використовуються для порушення приватного життя, незаконного спостереження та інших злочинних дій. Серед таких застосувань – охорона аеропортів, промислових об'єктів і державних установ, а також приватних територій, які потребують посиленого контролю і безпеки.

В Україні технології локаторів та оптимізації логістичних маршрутів можуть відігравати особливо важливу роль на тлі зростаючої загрози безпілотних літальних апаратів у воєнний час. З огляду на новітні військові та технологічні виклики Україна потребує сучасних рішень для захисту своїх стратегічних об'єктів та збройних сил від повітряних атак. Поєднання систем акустичного виявлення з алгоритмами ухилення та нейронними мережами, які прогнозують

маршрути польотів безпілотників, може значно підвищити обороноздатність України та забезпечити безпеку об'єктів критичної інфраструктури. Навіть більше, розвиток таких технологій в Україні має великий потенціал не лише для військових, але й для приватного сектору, де безпека має вирішальне значення. Такі технології можуть стати основою сучасної системи національної безпеки, яка захистить Україну від нових загроз та зміцнить її позиції на міжнародній арені.

Abstract. This paper discusses the methodology for developing locators and establishing a safe logistics route for military units, taking into account the threat of detection by unmanned aerial vehicles (drones). The proposed system uses acoustic sensors to determine the location of drones based on the time of arrival of sound waves (TOA). An evasion algorithm has been implemented that models the probability of detection and route change in accordance with the data obtained. The created simulation demonstrates the effectiveness of the approach in real conditions. The proposed method can be applied in military operations and security systems.

Keywords: locator, drone, military logistics, modeling, route optimization.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Товкач І. О. Методи адаптивного оцінювання параметрів руху безпілотного літального апарату на основі вимірювань сенсорної мережі: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. Київ, 2018. 169 с.
2. Abambres M., Marcy M., Doz G. Potential of Neural Networks for Structural Damage Localization. *ACI Avances En Ciencias E Ingenierías*. 2018. Vol. 11, № 2. P. 124–153.
3. Pau J. L., Garg S. Acoustic detection systems for unmanned aerial vehicles (UAVs): Principles and applications. *Journal of Aerospace Engineering*. 2020. Vol. 33, № 2. P. 25–42 (дата звернення: 10.03.2024).
4. Zhang L., Wang H., Liu Y. Target localization and tracking of UAVs using acoustic sensing. A review. *Sensors*. 2019. Vol. 19, № 3. P. 579–594 (дата звернення: 10.03.2024).
5. Bennett J., Tran D. Acoustic sensor networks for UAV detection and tracking. A review. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 3452–3468 (дата звернення: 10.03.2024).
6. Wang Z., Zhang H., Xu Y. Acoustic time-of-arrival estimation for unmanned aerial vehicles (UAVs): Algorithms and challenges. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2020. Vol. 56, № 4. P. 3120–3135 (дата звернення: 10.03.2024).
7. Zhang S., Wu X. Optimization of military logistics with UAVs: Applications in acoustic sensor-based detection systems. *Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*. 2021. Vol. 18, № 2. P. 85–99 (дата звернення: 10.03.2024).
8. Deng Y., Zhang X. Analysis and design of acoustic detection systems for UAV surveillance and countermeasures. *Applied Acoustics*. 2019. Vol. 148. P. 15–26 (дата звернення: 10.03.2024).
9. Shao J., Zhang Y., Li X. Acoustic sensor networks for UAV detection and interception in military applications. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020. Vol. 312. P. 112–120 (дата звернення: 10.03.2024).

УДК 517.95

ЗАСТОСУВАННЯ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ З ЧАСТИННИМИ ПОХІДНИМИ В МАТЕМАТИЧНОМУ МОДЕЛЮВАННІ

А. І. Родюк, А. В. Луценко

Анотація. У статті йдеться про застосування математики для моделювання повсякденних ситуацій. Особливу роль надано застосуванню диференціальних рівнянь з частинними похідними (ДРЧП) в математичному моделюванні. Як приклад такого застосування розглянуто запис ДРЧП для трьох ситуацій: потоку транспорту по односмуговій дорозі, реакції водія на навколишній транспорт і простого злочину – квартирної крадіжки. Підкреслено важливість математики не лише у фундаментальних науках, але й у проблемах, що оточують нас щодня.

Ключові слова: математика, математичне моделювання, модель, диференціальні рівняння з частинними похідними.

Вступ. Математичне моделювання – це застосування математики для опису і дослідження проблем реального світу. За допомогою математичних засобів проблему реального світу інтерпретують в математичну задачу. Водночас основною метою є створення не найбільш повної описової моделі, а найбільш простої, яка все ж містить усі основні фактори впливу, та проведення експериментів з математичним представленням, а не у реальному світі.