

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-38>
УДК 621.391.8

МИХАЛЕВСЬКИЙ ДМИТРО

Вінницький національний технічний університет
<http://orcid.org/0000-0001-5797-164X>
e-mail: adotq@ukr.net

ШАЛІМОВА АНАСТАСІЯ

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба
<https://orcid.org/0009-0009-4456-475X>
e-mail: anastasiiashalimova2002@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ НА БАЗІ БПЛА ДЛЯ ВІЙСЬКОВИХ ЦІЛЕЙ

У статті проведено аналіз безпроводних сенсорних мереж для їх використання у складі безпілотних літальних апаратів для використання у військових цілях. Встановлено, що підвищення ефективності сенсорних мереж на базі БПЛА для військових цілей вимагає комплексного підходу, який поєднує адаптивні маршрути, енергоефективні алгоритми та сучасні технології машинного навчання. Успішна реалізація цих методів дозволить забезпечити оперативний збір і аналіз даних у найскладніших умовах бойових дій. Інтеграція, саме машинного навчання, дозволяє значно підвищити ефективність військових операцій, знижуючи ризики для військових підрозділів і покращуючи стратегічне планування, що є запорукою швидкого реагування на дії противника.

Розглянуто особливості використання сенсорів для військових цілей, зокрема використання децентралізованого режиму роботи сенсорної мережі та використання географічних координат вузлів для ефективного прокладання маршрутів. Найбільш оптимальним методом є побудова геолокаційної сенсорної мережі із децентралізованим режимом роботи із адаптивним алгоритмом врахування факторів навколишнього середовища

Запропоновано використовувати рекурентну нейронну мережу глибокого навчання із довгою короткочасною пам'яттю для оцінювання потужності сигналу на вході приймача. Складність та реалістичність послідовностей оцінювання поширення сигналу сенсорних мереж у просторі залежить від кількості прихованих шарів та кількості вхідних даних.

Ключові слова: безпроводні сенсорні мережі, сенсорні поля, безпілотні літальні апарати, адаптивна маршрутизація, машинне навчання.

MYKHALEVSKIY DMYTRO

Vinnitsia National Technical University

SHALIMOVA ANASTASIIA

Ivan Kozhedub Kharkiv National University of the Air Force

ENHANCING THE EFFICIENCY OF UAV-BASED SENSOR NETWORKS FOR MILITARY PURPOSES

In this paper, analyzes wireless sensor networks for their use in unmanned aerial vehicles for military purposes. It is established that increasing the efficiency of UAV-based sensor networks for military purposes requires an integrated approach that combines adaptive routes, energy-efficient algorithms and modern machine learning technologies. Successful implementation of these methods will allow for operational data collection and analysis in the most difficult combat conditions. Integration, namely machine learning, allows significantly increasing the efficiency of military operations, reducing risks for military units and improving strategic planning, which is the key to a quick response to enemy actions.

The features of the use of sensors for military purposes are considered, in particular, the use of a decentralized sensor network operation mode and the use of geographical coordinates of nodes for effective routing. The most optimal method is to build a geolocation sensor network with a decentralized operation mode with an adaptive algorithm for taking into account environmental factors.

It is proposed to use a deep learning recurrent neural network with a long short-term memory to estimate the signal strength at the receiver input. The complexity and realism of the sequences for estimating the signal propagation of sensor networks in space depends on the number of hidden layers and the amount of input data. It has been established that increasing the efficiency of UAV-based sensor networks for military purposes requires an integrated approach that combines adaptive routing, energy-efficient algorithms, and modern machine learning technologies. Successful implementation of these methods will allow for operational data collection and analysis in the most difficult combat conditions.

Keywords: wireless sensor networks, sensor fields, UAV, adaptive routing, machine learning.

Вступ

Сенсорні мережі є однією з найперспективніших технологій сучасності, яка знаходить широке застосування в різних галузях, від моніторингу довкілля, до військових операцій [1]. Вони складаються з великої кількості невеликих, дешевих сенсорних вузлів, які розподілені в просторі та здатні збирати дані про фізичні умови навколишнього середовища. Значної актуальності такі мережі набули, у військовій сфері, для забезпечення ефективного керування та забезпечення безпеки тактичних операцій, які значною мірою залежать від точності, швидкості та ефективності збору даних. Одним із напрямків підвищення ефективності є поєднання сенсорних мереж із безпілотними літальними апаратами (БПЛА) [2], що відкриває нові можливості для виконання спеціалізованих завдань пов'язаних із розвідкою, спостереженням, виявленням цілей і забезпечення безпеки особового складу. Однак, використання таких мереж у військових умовах потребує подолання значних технічних викликів, зокрема обмеженого

енергоресурсу, необхідності оперативної передачі даних та складності роботи в небезпечних або недоступних зонах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій та постановка проблеми

БПЛА відіграють ключову роль у військових сенсорних мережах, сприяючи підвищенню їхньої ефективності, надійності та адаптивності. Завдяки своїй мобільності й гнучкості, можна визначити ряд переваг над традиційною побудовою [3]. До головної переваги можна віднести розширення покриття мережі.

Згідно [2], сенсорні мережі являють собою розподілену систему із масивів сенсорів та пристроїв їх самоорганізації, об'єднаних на базі безпроводних каналів. Це дає можливість створення сенсорних сегментів різного розміру, радіусу дії та призначення. В якості ретрансляторів, широкого поширення набули БПЛА, що дозволяють швидко створювати й розширювати мережі в складних умовах, таких як віддалені райони або зони бойових дій. Вони можуть виступати як мобільні вузли, підтримуючи зв'язок між сенсорами в різних точках. Одним із оптимальних застосувань у військових цілях є моніторинг і розвідка завдяки можливості інтеграції військового обладнання з сенсорами, що відіграє вирішальну роль у плануванні різних військових операцій. Застосування БПЛА може використовуватись для збору даних у реальному часі, включаючи виявлення загроз, моніторинг руху ворога чи контроль стану об'єктів інфраструктури.

Аналіз параметрів руху є основою для вдосконалення маневреності та ефективності виконання завдань [4]. Основні параметри включають швидкість, прискорення, висоту, кут нахилу, а також рівень стабільності БПЛА. Використання методів маневрування й аналізу параметрів руху дозволяє БПЛА забезпечувати стабільність з'єднання та оптимальне покриття мережі навіть у складних умовах. Найбільш поширені з них: метод RSSI, для визначення відстані між передавальною та приймальною частиною сенсорів на базі вимірювання основного енергетичного параметра; метод проходження сигналу від передавача до приймача (ToA), який використовує оцінювання часу проходження сигналу та метод оцінювання повного циклу проходження сигналу (RTA).

Використання БПЛА дає змогу впроваджувати захищені канали зв'язку та технології протидії електромагнітним атакам, що підвищує загальну стійкість мереж. Згідно [5], захист від зовнішніх впливів на базі БПЛА, дозволяє значно підвищити ефективність каналів передачі інформації та забезпечити стійкість до різних загроз, зокрема до електромагнітних атак. Вони можуть використовуватись як ретранслятори, для створення автономних мереж, використовувати сучасні методи шифрування та мобільність, для оперативного розгортання навіть у складних умовах. Для протидії електромагнітним атакам, БПЛА можуть працювати на частотах, які складніше заглушити чи порушити, і автоматично змінювати частоти у разі загрози та із застосуванням спеціальних антен і технологій придушення шумів.

Таким чином, використання БПЛА в сучасних умовах є важливим інструментом для забезпечення безпеки зв'язку та протидії загрозам в електромагнітному спектрі. Тому, БПЛА мають незамінні переваги в сучасних військових сенсорних мережах, які значно підвищують оперативну ефективність та безпеку для каналів передачі інформації.

Метою роботи є аналіз технологій для підвищення ефективності сенсорних мереж на базі БПЛА та виявлення їх переваг і недоліків при застосуванні у військових цілях.

Виклад основного матеріалу дослідження

Враховуючи сучасний розвиток теле- та інфокомунікаційних технологій, методів і підходів до підвищення ефективності сенсорних мереж та безпілотних літальних апаратів для виконання військових завдань, до найбільш інноваційних технологій оптимізації можна віднести: створення адаптивних маршрутів, створення ефективного розподілу енергоресурсів та інтеграція машинного навчання або алгоритмів штучного інтелекту.

БПЛА активно застосовуються для збору розвідувальної інформації, спостереження за полем бою та моніторингу об'єктів у реальному часі. Сенсорні мережі, які доповнюють ці апарати, складаються з численних вузлів, які забезпечують збір, обробку та передачу даних. Все це приводить до зростання кількості сенсорів і вимагає розробки адаптивних алгоритмів керування та маршрутизації трафіку, особливо при створенні складних сегментів мережі. Для вирішення такої проблеми застосовується адаптивна маршрутизація. Методи адаптивної маршрутизації враховують динамічні зміни на полі бою, забезпечуючи ефективне планування маршрутів для збору даних і повернення БПЛА до бази з мінімальними енерговитратами.

Традиційні алгоритми маршрутизації для сенсорних мереж на базі БПЛА мають суттєві недоліки, пов'язані із умовами використання, наприклад, висока мобільність, нестабільність сеансів передачі даних, факторів впливу у безпроводних каналах [6], обмеження енергоспоживання та ін. Для вирішення таких недоліків і зменшення інформаційних втрат необхідно впроваджувати оптимізовані алгоритми маршрутизації, адаптовані до умов роботи БПЛА. Особливо це стосується для групового використання дронів (роїв) та при покритті значних територій сенсорами, що вимагає надійного зв'язку між дронами, ретрансляторами і наземними вузлами обробки даних.

Для таких умов найбільш оптимальним є використання децентралізованого режиму роботи (ad-hoc) сенсорної мережі та використання географічних координат вузлів для ефективного прокладання маршрутів. Але, і в такому випадку, характерно існування затримок і розривів у сеансах передачі кадрів

через високу динамічність вузлів та підвищене споживання енергії. Тому, найбільш оптимальним методом підвищення ефективності маршрутизації можна виділити, побудову геолокаційної сенсорної мережі із децентралізованим режимом роботи із адаптивним алгоритмом врахування факторів навколишнього середовища [4]. Суть методу показано на рис. 1.

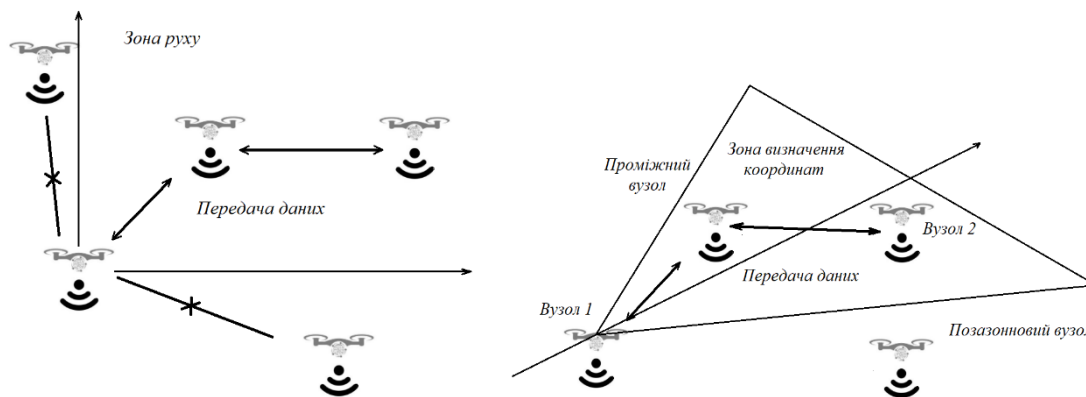


Рис. 1. Побудова геолокаційної сенсорної мережі (а) та визначення оптимального маршруту між вузлами (б)

Для визначення оптимальних маршрутів використовується технологія навчання з підкріпленням для налаштування оптимальних маршрутів передачі інформації із врахування факторів зовнішнього середовища. Це дозволяє зменшити енергоспоживання, кількість помилок в сеансах передачі кадрів та узгодити параметри БПЛА із сенсорами. Ці дані разом із координатами від системи GPS формують основу адаптивного протоколу маршрутизації, на базі якого виконується вибір необхідного вузла БПЛА. Необхідний вузол обирається за допомогою векторів та обчислення кута пересилання від вихідних вузлів до вузлів призначення використовуючи порівняння лише IP адреси. Оптимізація кутів виконується за допомогою навчання із підкріпленням.

Використання адаптивної маршрутизації дає можливість створення ефективного розподілу енергоресурсів в умовах обмеженого ресурсу блоків живлення БПЛА та автономних сенсорів. З іншого боку, ефективне розподілення енергії між сенсорами та БПЛА може суттєво зменшити втрати ресурсів і збільшити тривалість роботи системи та забезпечити надійну передачу інформації. Для підвищення ефективності енергоспоживання можна виділити наступне.

Адаптивні алгоритми керування енергією для динамічного коригування траєкторії польоту БПЛА та використання графіків активації вузлів датчиків на основі доступної енергії в блоках живлення й пріоритетів завдань. Наприклад, кластеризація може групувати датчики за близькістю та подібністю даних, зменшуючи надлишкові передачі.

Алгоритми планування завдань, які виконують адаптивне керування пріоритетними енергоефективними операціями, наприклад, такими як адаптивним алгоритмом врахування факторів навколишнього середовища або надання пріоритету обчислень вузлам із більшими резервами енергії. БПЛА також можуть передавати завдання обробки даних наземним станціям для збереження енергії.

Використання об'єднання ресурсів для виконання певного енергоємного завдання, шляхом розгортання кількох БПЛА з узгодженими параметрами, або розподіл покриття та агрегації даних між всією групою. Кооперативні алгоритми забезпечують збалансоване споживання енергії серед БПЛА та оптимізують надлишковість покриття.

Інтеграція технологій збору енергії, таких як сонячні панелі для БПЛА та датчиків, які збільшують час роботи. Враховуючи роботу [7], таку побудову можна представити, як показано на рис. 2.

Головна ідея полягає у використанні надлишкової потужності для визначення її як загальної залишкової потужності для певного БПЛА в будь-який момент часу. В даній структурі БПЛА є додатковими вузлами для забезпечення стабільного зв'язку між наземними станціями. Використовуючи імовірність зниження потужності випромінювання для кожного вузла мережі, існує можливість досягнути кращої оптимізації покриття мережі та забезпечити більшу ємність мережі шляхом зв'язування сенсорних вузлів з наземними вузлами та БПЛА. Також, можуть використовуватися гібридні джерела живлення для доповнення існуючих резервів енергії.

Ефективний розподіл енергоресурсів у мережах датчиків на основі БПЛА є вирішальним для їхньої стійкості та функціональності. Але, враховуючи що всі алгоритми підвищення ефективності є адаптивними, кращим варіантом постає питання інтеграції машинного навчання та штучного інтелекту.

Машинне навчання може використовуватися для прогнозування потреб у ресурсах, виявлення оптимальних шляхів передачі даних і адаптації до змін у навколишньому середовищі [8]. Інтеграція машинного навчання в сенсорні мережі на базі БПЛА є перспективним напрямом для оптимізації збору та обробки даних у реальному часі. У військових цілях такі мережі, забезпечують високу мобільність і здатність до моніторингу великих територій, пошуку та ідентифікації об'єктів, а також для прогнозування дій противника, оптимізацію розподілу ресурсів, прогнозування ситуацій і виявлення аномалій та ін.

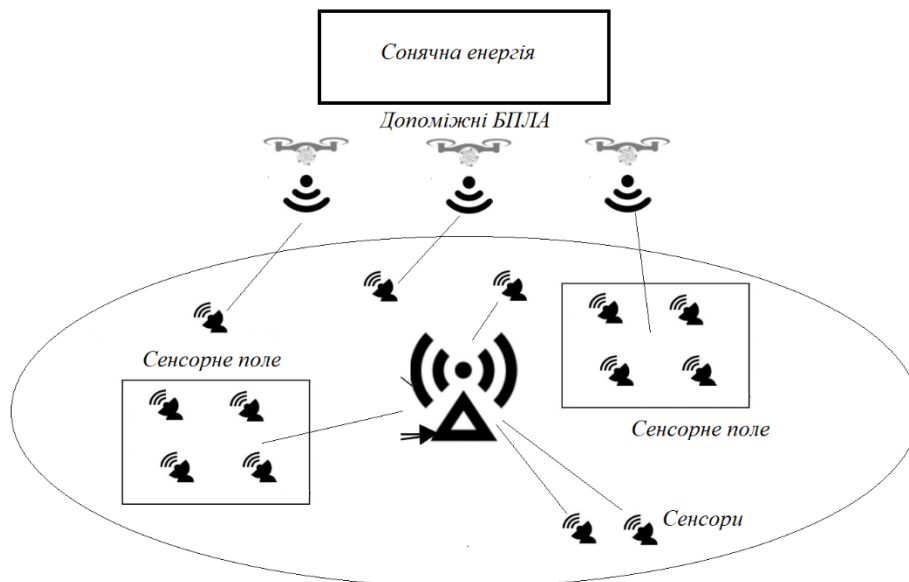


Рис. 2. Структура сенсорної мережі на базі БПЛА із сонячними панелями

В основу алгоритмів штучного інтелекту покладено нейронні мережі на базі динамічних моделей, які можуть використовуватись для створення послідовностей обробки даних із подальшим прогнозуванням їх поведінки. Особливо актуальним є їх застосування для оцінювання покриття сенсорних мереж для підвищення ефективності безпроводних каналів із врахуванням значної кількості факторів впливу [9-10]. Для цього, доцільно використати рекурентні нейронні мережі із глибоким навчанням із довгою короточасною пам'яттю, які використовуються для обробки різноманітних послідовностей. В результаті можна отримати дані, які є схожими до даних отриманих на основі моделей регресійного аналізу.

Враховуючи [11], базову побудову нейронної мережі для оцінювання параметрів безпроводних каналів сенсорних мереж можна представити як на рис. 3.

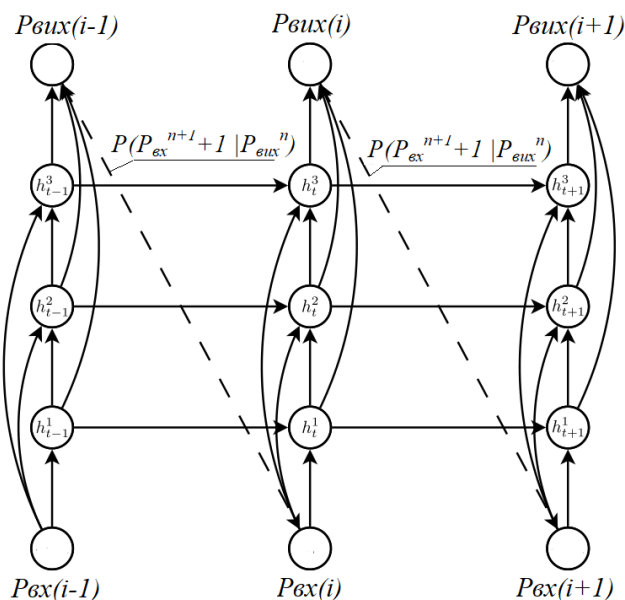


Рис. 3. Структура нейронної мережі із глибоким навчанням

На вхід подається векторна послідовність, яка може бути сформована із набору значень потужності сигналу на вході приймача, отриманих на основі алгоритму моніторингу [10]. Таким чином, послідовність $P = (P_{вх}^1, \dots, P_{вх}^n)$, надходить на вхід нейромережі та відбувається взаємодія із m внутрішніх рекурентних шарів для обчислення векторних послідовностей $h = (h_1^m, \dots, h_n^m)$. Після багатозарових обчислень отримується вихідна послідовність $P_{вих} = (P_{вих}^1, \dots, P_{вих}^n)$, яка в свою чергу використовує розподіл передбачення $P(P_{вх}^{n+1} + 1 | P_{вих}^n)$. Глибина мережі визначається кількістю прихованих шарів та здатністю проходження інформації у просторі та часі. Таким чином, можна створювати складні та реалістичні послідовності поширення сигналу у просторі для підвищення ефективності безпроводних каналів сенсорних мереж.

Висновки

Отже, підвищення ефективності сенсорних мереж на базі БПЛА для військових цілей вимагає комплексного підходу, який поєднує адаптивні маршрути, енергоефективні алгоритми та сучасні технології машинного навчання. Успішна реалізація цих методів дозволить забезпечити оперативний збір і аналіз даних у найскладніших умовах бойових дій. Інтеграція, саме машинного навчання, дозволяє значно підвищити ефективність військових операцій, знижуючи ризики для військових підрозділів і покращуючи стратегічне планування, що є запорукою швидкого реагування на дії противника.

References

1. U. Jain, M. Hussain. Securing Wireless Sensors in Military Applications through Resilient Authentication Mechanism. *Procedia Computer Science*. Vol. 171, 2020, Pp. 719-728. [Doi: 10.1016/j.procs.2020.04.078](https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.078).
2. Mykhalevskiy, D., Vasylyshyn, V., Riabkov, V., Myronenko, R., & Bryl, D. (2024). Method for improving the coverage efficiency of wireless sensor networks based on UAVs. *Machinery & Energetics*, 15(2), 81-94. doi: 10.31548/machinery/2.2024.81.
3. Mykhalevskiy, D.M., Kychak, V.M. Development of information models for increasing the evaluation efficiency of wireless channel parameters of 802.11 standard. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 56, 2019. no. 5, 22-32. DOI: 10.2478/lpts-2019-0028
4. C. Park, S. Lee, H. Joo, H. Kim. Empowering Adaptive Geolocation-Based Routing for UAV Networks with Reinforcement Learning. *Drones* 2023, 7, 387. <https://doi.org/10.3390/drones7060387>
5. Y. Pan, X. Da, H. Hu, Z. Zhu, R. Xu, L. Ni. Energy-efficiency Optimization of UAV-based Cognitive Radio System. *IEEE ACCESS*, VOL. XX, 2019. Pp. 1-10. [HTTPS://DOI.ORG/10.1109/ACCESS.2019.2939616](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939616)
6. D. Mykhalevskiy. Devising a technique to evaluate fluctuations in the main parameters of a wireless channel of the 802.11 standard. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No 6/9 (108), pp. 18–24. 2020. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.218720.
7. Manzoor et al., "Ruin Theory for Energy-Efficient Resource Allocation in UAV-Assisted Cellular Networks," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 6, pp. 3943-3956, June 2021, DOI:10.1109/TCOMM.2021.3064968
8. Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N. Gomez, Łukasz Kaiser, Illia Polosukhin. Attention is All you Need. [NIPS'17: Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems](https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2017/file/3e5b0d17d37d8fd7dd5a4a95131eb63d-Paper.pdf). 04 December 2017. Pages 6000 – 6010.
9. Mykhalevskiy D., Vasylyshyn N., Horodetska O. Development of a mathematical model for estimating signal strength at the input of the 802.11 standard receiver // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6, Issue 9 (90). P. 38–43. doi: 10.15587/1729-4061.2017.114191
10. Mykhalevskiy, D. Development of a method for assessing the effective information transfer rate based on an empirical model of statistical relationship between basic parameters of the Standard 802.11 wireless channel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, 5/9 (107), 26-35. doi: [10.15587/1729-4061.2020.213834](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.213834)
11. A. Graves. Generating Sequences With Recurrent Neural Networks. arXiv:1308.0850 [Doi: 10.48550/arXiv.1308.0850](https://arxiv.org/abs/1308.0850)