

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-1>
УДК 621.391

ПИРИГ ЯРОСЛАВ

Національний університет «Львівська політехніка»
<https://orcid.org/0009-0001-2104-8439>
e-mail: yaroslav.r.pyrih@lpnu.ua

ПИРИГ ЮЛІЯ

Національний університет «Львівська політехніка»
<https://orcid.org/0000-0002-8973-4005>
e-mail: yuliia.v.klymash@lpnu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНФІГУРАЦІЙ ПРОСТОРОВОГО РОЗМІЩЕННЯ СЕНСОРНИХ ВУЗЛІВ У ДВОВИМІРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Стаття присвячена дослідженню оптимального просторового розміщення сенсорних вузлів у безпроводних сенсорних мережах. Основна ідея авторського методу полягає у забезпеченні рівномірного розподілу вузлів на двовимірній площині з одночасною мінімізацією надлишкового просторового перекриття зон їх дії, що є критично важливим для підвищення ефективності покриття та раціонального використання мережевих ресурсів. У ході експериментальних досліджень визначено оптимальні параметри роботи генетичного алгоритму, за яких досягається найкраща якість розміщення вузлів. Аналіз динаміки зміни значення фітнес-функції залежно від кількості поколінь показав стабілізацію процесу оптимізації після досягнення 130 поколінь, що свідчить про збіжність алгоритму та його здатність знаходити близькі до оптимальних конфігурації. Порівняльний аналіз з рівномірним, жадібним та випадковим алгоритмами пошуку показав суттєву перевагу запропонованого підходу. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що авторський генетичний алгоритм є ефективним інструментом для задачі оптимального просторового розміщення сенсорних вузлів у безпроводних сенсорних мережах із частково сформованою топологією.

Ключові слова: розміщення сенсорних вузлів, генетичний алгоритм, жадібний алгоритм, фітнес-функція.

PYRIH YAROSLAV, PYRIH YULIYA

Lviv Polytechnic National University

INVESTIGATION OF SPATIAL CONFIGURATION OF SENSOR NODE PLACEMENT IN A TWO-DIMENSIONAL ENVIRONMENT

This paper focuses on the investigation of optimal spatial deployment strategies for sensor nodes in wireless sensor networks. The proposed solution aims to achieve a balanced distribution of sensing elements across a two-dimensional environment while simultaneously reducing redundant overlaps between their coverage areas. Such an approach is essential for enhancing coverage effectiveness and ensuring efficient utilisation of network resources. The node deployment task is modelled as a complex optimisation problem in which the search domain consists of all feasible coordinate configurations of sensor nodes, considering both existing infrastructure and newly introduced elements. A key contribution of the proposed methodology lies in the application of a dedicated fitness evaluation mechanism designed to penalise local concentration of nodes within the deployment area. This enables the prevention of clustering effects and supports the formation of a more evenly distributed network topology without causing substantial disruption to the original network structure. Through extensive simulation experiments, the most favourable operating conditions of the genetic algorithm were determined. The highest deployment performance was achieved using a population of 800 candidate solutions evolved over 200 generations, with crossover and mutation probabilities selected within the intervals {0.5; 0.8} and {0.05; 0.2}, respectively. Additionally, a sensing radius of 30 m and a minimum permissible separation distance of 20 m between neighbouring nodes were found to be optimal. Examination of the fitness function behaviour across successive generations revealed that the optimisation process reaches a steady state after approximately 130 iterations, indicating reliable convergence towards high-quality solutions. The simulation outcomes demonstrate that the proposed genetic-based strategy successfully places all newly introduced sensor nodes without generating overlapping coverage regions. Comparative evaluation against uniform, greedy, and random deployment techniques highlights the clear superiority of the developed approach. Overall, the results confirm that the proposed genetic algorithm constitutes an efficient and robust solution for addressing the problem of spatial sensor node placement in wireless sensor networks characterised by partially established topologies.

Keywords: placement of sensor nodes, genetic algorithm, greedy algorithm, fitness function.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.02.2026
Прийнята до друку / Accepted 11.03.2026
Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Пиріг Ярослав, Пиріг Юлія

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Безпроводні сенсорні мережі (БСМ) є важливим елементом кіберфізичних систем, Інтернету речей, інтелектуальних транспортних систем, систем екологічного моніторингу та «розумних» міських інфраструктур. Ефективність функціонування таких мереж значною мірою визначається просторовим розміщенням сенсорних вузлів, яке безпосередньо впливає на показники покриття території, надійність передавання даних, енергоефективність та масштабованість мережі.

У реальних умовах розгортання БСМ часто відбувається поетапно. Це означає, що до вже існуючої мережевої інфраструктури необхідно додавати нові сенсорні вузли з урахуванням їх поточного просторового розташування. Такий сценарій характерний для модернізації систем моніторингу, розширення зон покриття або підвищення точності збору даних. Водночас задача оптимального розміщення додаткових вузлів у двовимірному просторі за наявності фіксованих елементів мережі є складною оптимізаційною задачею, що належить до класу

НР-складних.

Стандартні підходи для розташування сенсорних вузлів, зокрема рівномірні, випадкові або жадібні алгоритми, не завжди забезпечують достатню ефективність у випадках складної просторової конфігурації або наявності обмежень, пов'язаних з уже встановленими вузлами. У зв'язку з цим зростає інтерес до застосування інтелектуальних та еволюційних алгоритмів [1, 2], здатних адаптуватися до умов середовища та знаходити близькі до оптимальних рішення в умовах багатокритеріальності.

Отже, актуальність дослідження задачі розміщення сенсорних вузлів зумовлена поєднанням зростаючої практичної значущості БСМ, складності задачі оптимізації в реальних умовах, що стимулює подальші наукові дослідження в цій області.

Аналіз досліджень та публікацій

Проблема оптимального розміщення сенсорних вузлів у безпроводних сенсорних мережах привертає значну увагу науковців, що зумовлено необхідністю забезпечення рівномірного покриття території, зменшення енергоспоживання та підвищення надійності функціонування мережі. У сучасних дослідженнях активно розглядаються як класичні методи оптимізації, так і підходи, засновані на інтелектуальних алгоритмах, машинному навчанні та комбінуванні статичних і мобільних компонентів мережі.

У роботі [3] представлено стратегію адаптивного розміщення вузлів на основі глибокого навчання, яка використовує найсучасніші моделі нейронних мереж для прогнозування ідеальних конфігурацій. На основі імітаційного моделювання показано, що глибоке навчання покращує коефіцієнт покриття та енергоспоживання порівняно зі стандартними підходами до розміщення, незважаючи на більш тривалий час виконання.

Автори [4] запропонували алгоритм, який може використовувати невелику кількість статичних вузлів разом з набором мобільних вузлів для покращеного покриття необхідної площі. Оскільки ефективне розгортання статичних вузлів та керована мобільність мобільних вузлів є критично важливими для максимізації покриття площі, представлено три формулювання змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP): перше ефективно розгортає набір статичних вузлів, а два інші – планують шлях набору мобільних вузлів таким чином, щоб максимізувати покриття площі та мінімізувати загальну кількість рухів, необхідних для досягнення бажаного покриття. Результати моделювання демонструють вищу продуктивність запропонованих алгоритмів для різної площі мережі та кількості статичних та мобільних вузлів.

У [5] досліджується використання алгоритму імітації відпалу для вирішення проблеми розміщення вузлів у БСМ. Представлено авторський підхід на основі його використання, який систематично покращує розміщення вузлів шляхом ефективного дослідження та використання простору рішень. Показано, що впровадження авторського рішення значно розширює обсяг та якість покриття мережі та зв'язку, одночасно зменшуючи споживання енергії.

У роботі [6] наведено комплексне порівняння традиційних та заснованих на машинному навчанні методів розміщення вузлів, оцінюючи їхню ефективність за кількома ключовими характеристиками. Аналіз підкреслює, що методи на основі машинного навчання загалом перевершують традиційні підходи в покритті, адаптивності та енергоефективності, а також забезпечують покращену масштабованість.

Автори [7] розробили метод розміщення датчиків для сценаріїв, де високоякісні прилади використовуються разом із недорогими датчиками у багатокласовій мережі моніторингу. Новизна методу полягає у використанні замкнутої форми оберненої інформаційної матриці Фішера у термінах матриць рангу 1, які дозволяють виразити опуклу релаксацію задачі розміщення датчиків. Результати моделювання підтвердили ефективність використання запропонованого рішення.

Таким чином, аналіз сучасних наукових публікацій свідчить про інтенсивний розвиток методів оптимального розміщення сенсорних вузлів із використанням інтелектуальних та евристичних підходів, що в свою чергу зумовлює доцільність подальших досліджень, спрямованих на аналіз конфігурацій просторового розміщення нових сенсорних вузлів з урахуванням уже встановлених елементів мережі та використання адаптивних алгоритмів оптимізації.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: дослідження ефективності просторового розміщення сенсорних вузлів на площині за умов наявності попередньо встановлених вузлів із використанням авторського алгоритму.

Виклад основного матеріалу

У роботі [8] авторами було запропоновано метод оптимального просторового розміщення сенсорних вузлів на основі генетичного алгоритму, орієнтований на забезпечення рівномірного розподілу вузлів на площині та мінімізацію надлишкового просторового перекриття. Розроблений підхід базується на еволюційному механізмі пошуку глобально оптимальних конфігурацій розміщення з урахуванням як нових, так і вже існуючих вузлів мережі, що дозволяє зменшити порушення початкової топологічної структури та зберегти її регулярність.

Особливістю запропонованого методу є формулювання задачі розміщення як задачі оптимізації, у якій простір рішень визначається множиною можливих конфігурацій координат вузлів на досліджуваній площині. Для оцінювання якості кожної конфігурації використовується спеціалізована фітнес-функція, спрямована на мінімізацію локального перевантаження елементів площини, що, у свою чергу, забезпечує більш рівномірний просторовий розподіл сенсорних вузлів.

У межах поточної статті розроблений раніше метод не модифікується, а використовується як базовий інструмент для проведення імітаційного моделювання та аналізу його ефективності в різних сценаріях

розміщення вузлів. Основна увага зосереджена на дослідженні результатів застосування методу в умовах частково сформованої топології, зокрема за наявності фіксованої множини існуючих вузлів та додавання нових елементів мережі. Такий підхід дозволяє оцінити здатність методу адаптуватися до змін конфігурації мережі та забезпечувати збалансоване розміщення вузлів без суттєвого погіршення просторових характеристик.

За результатами серії чисельних експериментів встановлено, що максимальна результативність запропонованого підходу досягається за таких параметрів налаштування алгоритму: чисельність популяції становить 800 особин, кількість еволюційних ітерацій — 200, інтервали імовірностей виконання операцій схрещування та мутації знаходяться в межах $\{0.5; 0.8\}$ та $\{0.05; 0.2\}$.

На рисунку 1 наведено результати процесу еволюційного формування раціональної конфігурації розташування вузлів для кількості поколінь у діапазоні від 25 до 100, де жовтим кольором позначено існуючі вузли, синім – нові. Розташування 5 існуючих вузлів задано рандомно, на основі чого отримано такі їх координати: $\{(96, 50), (73, 73), (27, 73), (27, 4), (50, 27)\}$.

Рис. 2 демонструє найкраще розміщення 20 нових вузлів при 5 існуючих, яке отримано при $G=131$. Для розуміння ефективності і особливостей роботи алгоритму в процесі його виконання наведено еволюцію значень фітнес-функції протягом ітераційного процесу на рис. 3.

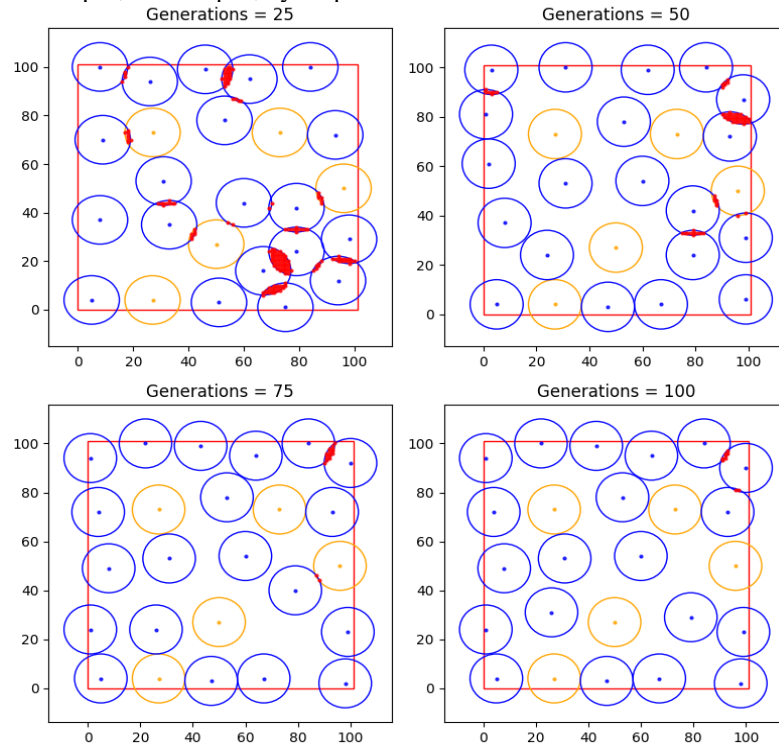


Рис. 1. Етапи збіжності розробленого алгоритму під час оптимізації просторового розташування вузлів

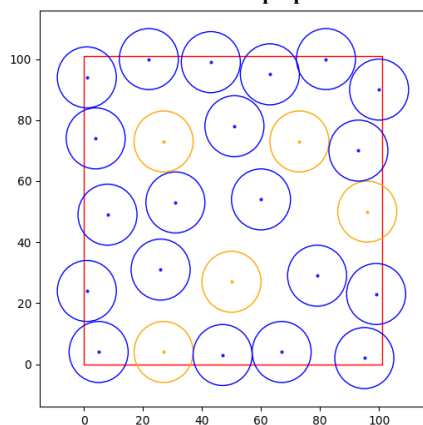


Рис. 2. Фінальна конфігурація розміщення 20 нових сенсорних вузлів за наявності 5 попередньо встановлених

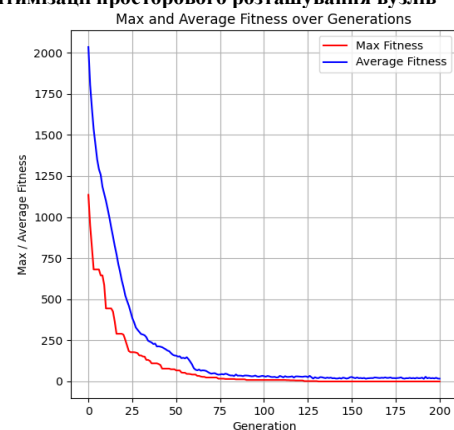


Рис. 3. Еволюція фітнес-функції протягом ітераційного процесу

Отже, використання розробленого авторами ГА дозволило здійснити оптимальне розташування вузлів, уникнувши зон «перекриттів».

Після досягнення $G=130$ значення фітнес-функції є практично незмінним, що вказує на стабільність роботи алгоритму. Таким чином, розроблений ГА знаходить оптимальне співвідношення між пошуком нових рішень та покращенням вже знайдених, що дозволяє як уникати локальних оптимумів, так і фокусуватися на ділянках, де є можливість знайти глобальний оптимум.

На рис. 4 представлено результати розміщення 20 нових сенсорних вузлів при 5 існуючих шляхом використання розробленого ГА (Genetic), рівномірного (Mesh), жадібно (Greedy) та випадкового (Random) алгоритмів пошуку.

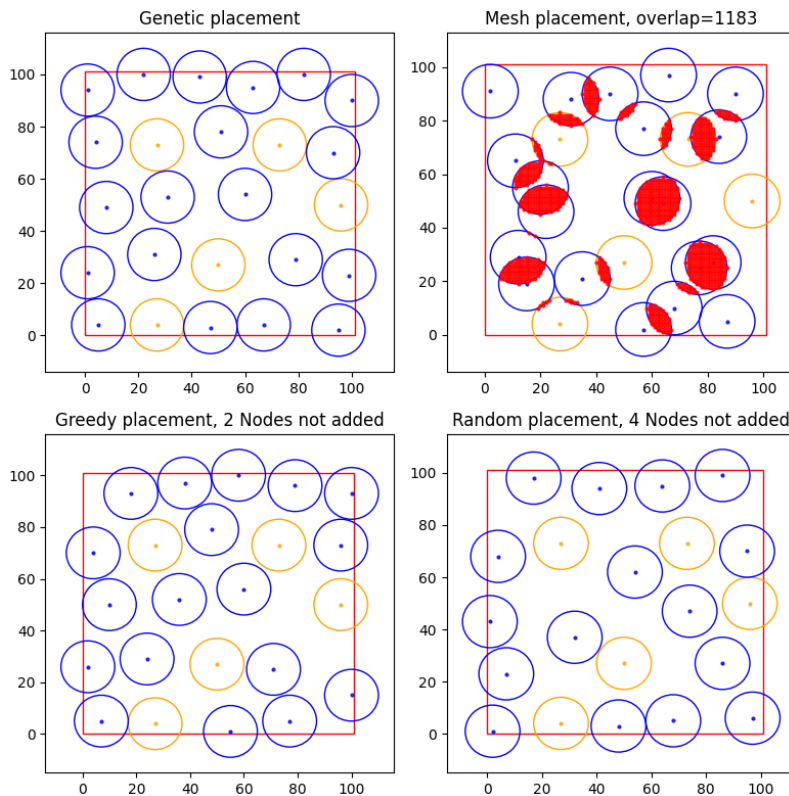


Рис.4. Результати роботи алгоритмів розміщення 20 нових сенсорних вузлів при 5 існуючих

Як бачимо з рис. 4, розроблене рішення показує найбільш ефективну роботу в заданих умовах. При цьому для рівномірного пошуку $overlap=1183$, що вказує на наявність зон перекриття сенсорних вузлів (11,83% площі). Для жадібного та випадкового пошуку перекриття відсутнє, однак ці методи продемонстрували нижчу ефективність у процесі розміщення 20 нових вузлів при наявності 5 існуючих.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У роботі проведено комплексне дослідження ефективності авторського генетичного алгоритму для задачі просторового розміщення сенсорних вузлів у двовимірному середовищі за умов наявності попередньо встановлених елементів мережі.

Отримані результати моделювання продемонстрували здатність алгоритму адаптуватися до заданої конфігурації існуючих вузлів і формувати оптимальні координати нових елементів мережі. Встановлено, що найкраща конфігурація для сценарію з 20 новими та 5 існуючими вузлами досягається при $G = 131$.

Порівняльний аналіз результатів, отриманих із використанням генетичного, рівномірного, жадібно та випадкового алгоритмів, показав переваги розробленого підходу. Генетичний алгоритм забезпечив повне розміщення всіх 20 нових вузлів без утворення зон перекриття. Для рівномірного алгоритму зафіксовано наявність перекриттів, що охоплюють 11,83 % площі, тоді як жадібний і випадковий підходи не змогли розмістити всі вузли, що свідчить про їхню нижчу ефективність в умовах заданих обмежень.

Отже, результати дослідження підтверджують, що запропонований генетичний алгоритм є ефективним інструментом для задачі оптимального розміщення сенсорних вузлів у безпроводних сенсорних мережах з частково сформованою топологією.

Запропонований підхід може бути використаний як основа для подальших досліджень у напрямі масштабування мережі, урахування динамічної мобільності вузлів та інтеграції додаткових критеріїв оптимізації, таких як енергетична ефективність і надійність зв'язку.

Література

1. Al-Ani K. W. A review on metaheuristic algorithms employed in WSN // Proceedings of the ASU Int. Conf. in Emerging Technologies for Sustainability and Intelligent Systems –Bahrain, 2024. – P. 1454–1458.
2. Singh P. K., Kaur J. A review of routing techniques for different applications in wireless sensor network // Proceedings of the 2nd International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences (ICTACS). – Tashkent, Uzbekistan, 2022. – P. 174–179.
3. Priyadarshi R., Singh A. V., Vishwakarma A. K., Ranjan R. Deep learning-enhanced adaptive node placement

in wireless sensor networks // Proceedings of the IEEE 16th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN). – Indore, India, 2024. – P. 273–277.

4. Kumari S., Srirangarajan S. Node placement and path planning for improved area coverage in mixed wireless sensor networks // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2024. – Vol. 9, № 8. – P. 6800–6807.

5. Priyadarshi R., Gupta B., Ghosh S. Simulated annealing for optimal placement of wireless sensor network nodes // Proceedings of the 27th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC). – Greater Noida, India, 2024. – P. 1–5.

6. Priyadarshi R., Kumar R. R., Yang T., Rathore R. S. Machine learning-based approaches for predictive node placement in wireless sensor networks // Proceedings of the International Conference on Electrical and Computer Engineering Researches (ICECER). – Gaborone, Botswana, 2024. – P. 1–6.

7. Paredes-Ahumada J., Ferrer-Cid P., Barcelo-Ordinas J. M., Garcia-Vidal J. Convex relaxation method for sensor placement in multiclass monitoring networks // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2024. – Vol. 73. – Art. no. 9517213. – P. 1–13.

8. Пиріг Я. Р., Пиріг Ю. В. Метод еволюційної оптимізації структури безпроводної сенсорної мережі // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2025. – № 3. – С. 71–75.

References

1. Al-Ani, K. W. (2024). A review on metaheuristic algorithms employed in WSN. In Proceedings of the ASU International Conference in Emerging Technologies for Sustainability and Intelligent Systems, pp. 1454–1458.

2. Singh, P. K., & Kaur, J. (2022). A review of routing techniques for different applications in wireless sensor network. In Proceedings of the 2nd International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences (ICTACS 2022), pp. 174–179.

3. Priyadarshi, R., Singh, A. V., Vishwakarma, A. K., & Ranjan, R. (2024). Deep learning-enhanced adaptive node placement in wireless sensor networks. In Proceedings of the IEEE 16th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN 2024), pp. 273–277.

4. Kumari, S., & Srirangarajan, S. (2024). Node placement and path planning for improved area coverage in mixed wireless sensor networks. IEEE Robotics and Automation Letters, 9(8), 6800–6807.

5. Priyadarshi, R., Gupta, B., & Ghosh, S. (2024). Simulated annealing for optimal placement of wireless sensor network nodes. In Proceedings of the 27th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2024), pp. 1–5.

6. Priyadarshi, R., Kumar, R. R., Yang, T., & Rathore, R. S. (2024). Machine learning-based approaches for predictive node placement in wireless sensor networks. In Proceedings of the International Conference on Electrical and Computer Engineering Researches (ICECER 2024), pp. 1–6.

7. Paredes-Ahumada, J., Ferrer-Cid, P., Barceló-Ordinas, J. M., & Garcia-Vidal, J. (2024). Convex relaxation method for sensor placement in multiclass monitoring networks. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 73, Article 9517213, 1–13.

8. Pyrih, Y. R., & Pyrih, Y. V. (2025). Evolutionary optimisation method for the structure of a wireless sensor network. Measuring and computing devices in technological processes, (3), 71–75.