

УДК 621.396.96

DOI: 10.31673/2786-8362.2025.018942

Кириченко Р.М.

МЕТОД ЛОКАЛІЗАЦІЇ ВУЗЛІВ У БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ РЕКОНСТРУКЦІЇ РОЗРІДЖЕНИХ МАТРИЦЬ ВІДСТАНЕЙ

Kyrychenko R.M. Method for localizing nodes in wireless sensor networks based on the reconstruction of sparse distance matrices. The article considers modern methods for localizing nodes in wireless sensor networks with an emphasis on increasing the positioning accuracy by combining classical multidimensional scaling (MDS) with greedy heuristic algorithms and methods for restoring the sparse matrix of RSSI signals. A comprehensive approach to detecting anomalies and errors in measurements using spectral analysis and machine learning algorithms is proposed. Experimental modeling in MATLAB was carried out, which confirmed the effectiveness of the developed methods in various network operation scenarios. The results obtained have practical significance for increasing the reliability, security, and performance of wireless sensor networks, which is important for the development of modern Internet of Things (IoT) systems and industrial applications.

Keywords: wireless sensor networks, localization, multidimensional scaling (MDS), greedy heuristics, RSSI, matrix reconstruction, anomaly detection, spectral analysis, machine learning, MATLAB, Internet of Things (IoT), network security, positioning, measurement errors

Кириченко Р.М. Метод локалізації вузлів у безпроводових сенсорних мережах на основі реконструкції розріджених матриць відстаней. У статті розглянуто методи локалізації вузлів у сенсорних мережах із акцентом на підвищення точності позиціонування за рахунок поєднання класичного багатовимірного шкалювання (MDS) з жадібними евристичними алгоритмами та методами відновлення розрідженої матриці сигналів RSSI. Запропоновано метод виявлення помилок у вимірах із застосуванням спектрального аналізу та алгоритмів машинного навчання. Проведено експериментальне моделювання в MATLAB, яке підтвердило ефективність розроблених методів у різних сценаріях функціонування мережі.

Ключові слова: безпроводові сенсорні мережі, локалізація, багатовимірне шкалювання (MDS), жадібні евристики, RSSI, відновлення матриці, виявлення аномалій, спектральний аналіз, машинне навчання, MATLAB, Інтернет речей (IoT), безпека мережі, позиціонування, помилки вимірювань

Вступ

Локалізація вузлів у безпроводових сенсорних мережах (БСМ) є однією з ключових задач для забезпечення коректного функціонування широкого спектра додатків – від моніторингу середовища до тактичних систем управління. У багатьох випадках GPS-недоступний або енергетично недоцільний, тому особливої ваги набувають програмні методи відновлення координат на основі внутрішньої інформації мережі.

Значна кількість методів локалізації базується на обробці показника сили прийнятого сигналу (RSSI), зокрема на принципах багатовимірного масштабування (MDS). Існують також евристичні алгоритми, які покращують відновлення координат за неповними або зашумленими матрицями відстаней.

Недостатньо досліджено питання локалізації у випадку сильної розрідженості матриці відстаней, зокрема методи її відновлення перед застосуванням алгоритмів типу MDS. Також потребує вдосконалення інтеграція евристичних методів побудови координат з процедурами фільтрації аномалій, пов'язаних з зашумленими або некоректними RSSI-вимірами.

Аналіз останніх досліджень. Безперервне зростання кількості застосувань безпроводових сенсорних мереж (БСМ) у критично важливих сферах, таких як моніторинг довкілля, «розумні міста» та військова справа, актуалізує завдання забезпечення їхньої надійності та точності роботи. Основними викликами при цьому залишаються ефективна локалізація вузлів та виявлення несправностей у мережі, особливо в умовах високої динаміки, зашумленості середовища та обмежених обчислювальних ресурсів.

Значну увагу вчених останніх років було зосереджено на розробці методів діагностики несправностей у БСМ із використанням методів машинного навчання та гібридних евристичних алгоритмів. Так, у роботі [1] розглядається використання класифікаційних

моделей машинного навчання для виявлення помилок вузлів за шаблонами їх поведінки, що дозволяє підвищити точність і швидкість реагування. Автори [2] запропонували комбінацію метаевристичного алгоритму "кінського стада" з згортковою нейронною мережею з увагою для глибокого аналізу несправностей у великих БСМ, демонструючи високу продуктивність при роботі з реальними даними.

Подальші дослідження [3] підтвердили ефективність застосування глибоких нейронних мереж, оптимізованих за допомогою методів головних компонент (PCA) і алгоритмів глобальної оптимізації (GOA), для виявлення несправностей у сенсорних вузлах, що працюють у складних умовах. У той час як автори [4] зосередились на автоматизованому відновленні мережі після виявлення помилкових вузлів, впровадивши евристичний метод до маршрутизації з адаптивним перерозподілом ролей у кластері.

Проблема точної локалізації в умовах наявності аномальних даних або викидів досліджується у [5], де автори запропонували ітеративну стратегію з мінімізацією вибору, яка дозволяє зменшити вплив зашумлених або фальшивих вимірювань на координатне позиціонування вузлів.

Наведені публікації підтверджують актуальність та міждисциплінарний характер проблеми, яка поєднує обробку сигналів, інтелектуальний аналіз даних і оптимізацію мережевих структур. Водночас існуючі підходи не повною мірою враховують особливості розріджених RSSI-матриць, які характерні для енергозалежних БСМ, що працюють в умовах обмеженого енергоживлення та втрати зв'язку.

Метою роботи є розробка нового методу локалізації та виявлення несправностей у БСМ на основі аналізу розріджених даних про рівень сигналу (RSSI), доповненого евристичною реконструкцією координат та виявленням аномалій у топології. Запропонований метод базується на поєднанні евристичних методів, ітеративного відновлення просторової структури мережі та виявлення аномалій із подальшою перевіркою працездатності мережі в середовищі MATLAB.

Виклад основного матеріалу дослідження

Теоретичні основи локалізації у безпроводових сенсорних мережах. Безпроводові сенсорні мережі (БСМ) – це розподілені обчислювальні системи, які складаються з великої кількості автономних вузлів, здатних збирати, обробляти та передавати інформацію про параметри навколишнього середовища. Їх широке застосування у різних галузях – від моніторингу довкілля до військових і промислових задач – потребує високої точності визначення місцезнаходження вузлів, що формує підґрунтя для локалізації як ключового завдання.

Однією з головних проблем у БСМ є відсутність вбудованих GPS-модулів у більшості вузлів через їхню вартість, енергоспоживання та фізичні обмеження. Тому застосовуються програмні методи визначення координат - методи локалізації, які базуються на відстанях, кутах або топології зв'язків між вузлами. Ці методи повинні бути ефективними, стійкими до шумів, працювати з неповними або спотвореними вхідними даними.

Сучасні підходи до локалізації можна класифікувати на такі основні категорії:

Якірні методи – використовують вузли з відомими координатами (якорі) як базис для оцінки координат інших вузлів. При цьому точність сильно залежить від кількості і розташування якорів.

Методи без якорів (anchor-free) – координати всіх вузлів визначаються відносно одна одної, утворюючи локальні карти, які можуть бути трансформовані в глобальну систему координат.

Методи на основі відстаней (range-based) – використовують інформацію про фізичні відстані між вузлами, що оцінюються через час передачі (ToA), час затримки (TDoA), рівень сигналу (RSSI).

Методи на основі зв'язності (range-free) – працюють на основі наявності або відсутності з'єднання між вузлами, без явного вимірювання відстаней.

Одним із найбільш перспективних математичних підходів є метод багатовимірного шкалювання (MDS – multidimensional scaling), який дає змогу відновити координати вузлів за відомими відстанями між ними, що можуть бути повними або частково відомими. У контексті БСМ це означає, що навіть при наявності часткової або спотвореної інформації про RSSI-матрицю (матрицю оцінок відстаней за рівнем сигналу) можна наближено визначити топологію мережі у просторі.

У цій роботі особливу увагу було приділено питанням відновлення координат вузлів у випадку, коли RSSI-матриця є розрідженою – тобто містить значну кількість пропущених значень через перешкоди, затінення, енергозбереження або відмови обладнання. Це суттєво ускладнює застосування класичних варіантів MDS, які потребують повної інформації.

Метою дослідження стало розроблення і обґрунтування нових алгоритмів, що дозволяють:

- підвищити точність локалізації вузлів у БСМ за неповною або зашумленою RSSI-інформацією;
- знизити обчислювальну складність і енергоспоживання;
- виявляти та виправляти аномалії в даних, що зумовлені помилками передачі або атакою на мережу;
- моделювати і тестувати запропоновані методи у середовищі MATLAB із використанням реалістичних сценаріїв.

Математична модель відновлення координат за розрідженою RSSI-матрицею. Для реалізації мети дослідження, зокрема задачі відновлення координат вузлів у безпроводовій сенсорній мережі за умов розрідженості матриці RSSI, необхідно формалізувати відповідну математичну модель. Нехай у просторі R^2 або R^3 розташовано n вузлів сенсорної мережі, координати яких задані як x_1, x_2, \dots, x_n . Для певної пари вузлів (i, j) доступне наближене значення відстані d_{ij} , обчислене за RSSI-метрикою:

$$d_{ij} \approx 10^{\frac{P_t - P_{r_{ij}}}{10n}} \quad (1)$$

де P_t – потужність передавача, $P_{r_{ij}}$ – приймана потужність сигналу на приймачі j , n – коефіцієнт загасання сигналу. Ця формула – наслідок моделі поширення сигналу у вільному просторі або у середовищі з перешкодами.

Задача відновлення координат формулюється як задача багатовимірного шкалювання (MDS) з неповною матрицею відстаней $D = [d_{ij}]$. Класичний метод MDS передбачає знаходження набору координат $x_i \in R^m$, які мінімізують функціонал невідповідності:

$$\min_{x_1, \dots, x_n} \sum_{(i,j) \in K} (\|x_i - x_j\| - d_{ij})^2 \quad (2)$$

де $K \in \{(i, j): i < j\}$ - множина пар вузлів, для яких відомі значення d_{ij} .

Однак у реальних умовах матриця D є розрідженою, і класичні MDS-алгоритми (наприклад, на основі спектрального розкладу або двокрокового центрованого скалярного добутку) не працюють належним чином. Тому у дослідженні було запропоновано модифікований метод - Sparse-MDS, який поєднує:

- попередню апроксимацію відсутніх значень на основі евклідових відстаней через суміжні вузли;
- ітеративну мінімізацію функціоналу невідповідності з регуляризатором;
- інтеграцію евристик для виявлення аномальних значень RSSI (outliers).

Основна ідея алгоритму полягає у розв'язанні оптимізаційної задачі:

$$\min_{x_1, \dots, x_n} \sum_{(i,j) \in K} (\|x_i - x_j\| - d_{ij})^2 + \lambda \sum_{i=1}^n \|x_i\|^2 \quad (3)$$

де λ – коефіцієнт регуляризації, що відповідає за стабілізацію розв'язку.

У результаті оптимізаційного процесу відновлюється геометричне розташування вузлів із допустимою похибкою, що оцінюється на основі RMSE (середньоквадратична похибка):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|x_i^{real} - x_i^{estimated}\|^2} \quad (4)$$

Запропонований метод дає змогу працювати з частково спостережуваними графами з менше ніж 40% відомих відстаней, зберігаючи прийнятну точність локалізації.

У наступній частині буде представлено адаптацію цього методу з урахуванням *жадібної евристики для покращення відновлення в умовах обмежених даних*, а також розгляд альтернативних стратегій ініціалізації.

Адаптація жадібної евристики для покращення локалізації в умовах розріджених даних. У розріджених сенсорних мережах, де значна частина пари вузлів не має прямого зв'язку (тобто значення d_{ij} відсутні), класичні методи багатовимірного шкалювання втрачають ефективність. Для підвищення точності відновлення просторової структури мережі запропоновано жадібну евристичну стратегію вибору опорних вузлів та заповнення пропущених відстаней.

Жадібна евристика (greedy heuristic) базується на ітеративному виборі таких вузлів, які дають максимальну інформативність для відновлення координат. Ідея полягає у поетапному формуванні так званої основної множини вузлів $A \in \{1, \dots, n\}$, для яких доступні або апроксимовані всі міжвузлові відстані. Далі ці вузли використовуються як якірні точки (anchors) для триангуляції або апроксимації положення решти вузлів.

Алгоритм евристики:

1. Ініціалізація множини A випадковими 3-4 вузлами з максимальною кількістю відомих з'єднань.

2. На кожному кроці додається вузол v , для якого кількість відомих або апроксимованих відстаней до елементів A максимальна.

3. Обчислюється координата x_v на основі евклідової мінімізації:

$$x_v = \underset{x}{\operatorname{argmin}} \sum_{u \in A} (\|x - x_u\| - d_{uv})^2 \quad (5)$$

4. Вузол v додається до множини A , і процес повторюється до тих пір, поки не буде відновлено всі координати.

Локалізована реконструкція: завдяки поступовому нарощуванню структури, зменшується похибка, що накопичується при глобальній апроксимації.

Стійкість до шумів у даних: якщо деякі d_{ij} є зашумленими або аномальними, вони не використовуються на початкових кроках, що мінімізує вплив на розв'язок.

Сумісність з аномалієстійкими методами: жадібна стратегія дозволяє виключати підозрілі значення при кожній ітерації.

У рамках дослідження було реалізовано в MATLAB функціональну бібліотеку для виконання жадібною евристики. Були застосовані функції:

- pdist і mdscale для первинного відновлення структури;
- lsqnonlin для розв'язання нелінійних задач оптимізації положення вузлів;
- graphshortestpath для апроксимації пропущених відстаней через графову метрику (за аналогією з алгоритмом Dijkstra).

У результаті моделювання на даних із 100 вузлів та лише 25% відомих відстаней, застосування жадібною евристики знизило середню похибку локалізації на 37% у порівнянні з класичним MDS.

Методи виявлення аномалій у матриці RSSI та їх вплив на точність локалізації.

Однією з критичних проблем у задачах локалізації в безпроводових сенсорних мережах є наявність аномальних або хибних RSSI-вимірювань. Такі значення можуть бути спричинені перешкодами, мультипутевістю, збоєм у роботі сенсорів або зовнішнім втручанням. У розріджених матрицях відстаней навіть кілька аномалій можуть суттєво спотворити результат MDS або евристичних відновлювачів.

У дослідженні ідентифіковано такі основні типи аномалій:

- Вибухові відхилення – поодинокі вимірювання, значення яких суттєво перевищують типовий діапазон.
- Систематичні зміщення – регулярне заниження або завищення значень RSSI від одного з вузлів.

- Пропуски або нулі – відсутність зв'язку між вузлами, які фізично розміщені поруч.
- Динамічні стрибки – нестабільні значення між парами вузлів при серії вимірювань.

Запропоновано метод виявлення аномальних значень у матриці RSSI на основі:

Z-нормалізації та відсікання значень, які перевищують три стандартні відхилення від середнього: $z_{ij} = \frac{r_{ij} - \mu_i}{\sigma_i}$, аномальне, якщо $|z_{ij}| > 3$.

Локально-адаптивної щільності: порівняння значення r_{ij} із середнім серед найближчих сусідів (LOF-алгоритм).

Субграфового порівняння: якщо вузол має нетипову кількість сильно або слабо зв'язаних сусідів, його значення перевіряються як потенційно хибні.

Симетричного тесту: якщо $r_{ij} \neq r_{ji}$, значення фіксується як підозріле і додатково аналізується.

Було проведено серію експериментів на синтетичних та реальних даних, які підтверджують, що видалення 5-10% найаномальніших значень з матриці RSSI може:

- знизити похибку локалізації на 20-40%;
- запобігти топологічному спотворенню мережі;
- забезпечити стабільність результату при повторних запусках MDS.

Ці методи були реалізовані в MATLAB з використанням:

- `isoutlier`, `fillmissing`, `knnsearch` для аналізу даних;
- створення вагових масок, що визначають довіру до кожного r_{ij} .

У результаті було сформовано антианомальну матрицю відстаней, яка далі передавалась до блоку локалізації.

Локалізація за обмеженої кількості якорів: стратегії, вплив, порівняння. У безпроводових сенсорних мережах повна наявність координат усіх вузлів (або навіть їхньої більшості) заздалегідь є рідкісною. Тому використовується метод з обмеженим числом якорних вузлів (англ. anchors) - сенсорів із відомими координатами. У цій частині досліджено вплив кількості та розташування якорів на якість локалізації, а також запропоновано ефективні стратегії вибору їх розміщення.

Моделювання у MATLAB показало, що:

- При кількості якорів менше ніж 5% від загального числа вузлів відновлення координат погіршується експоненційно, особливо на периферії мережі.
- Оптимальний компроміс досягається при 10-15% якорів – забезпечується збереження топологічної структури та прийнятна похибка (менше 5% від розміру області).
- Надмірна кількість якорів (понад 30%) не призводить до суттєвого покращення точності, але збільшує витрати на апаратне забезпечення (GPS, оптичні мітки тощо).

Порівнювались дві моделі:

- Випадкове розташування якорів у полі покриття.
- Стратегічне розташування – по краях, у кутах і центрі області для забезпечення геометричної рівноваги.

Результати моделювання показали, що стратегічне розташування дозволяє знизити середню помилку локалізації на 30-50% у порівнянні з випадковим.

Запропоновано двоетапну процедуру:

Фіксація якорних вузлів у просторі та запуск алгоритму MDS для всіх вузлів (використовується `cmdscale`).

Післяобертання та масштабування (Procrustes analysis) для приведення координат до глобальної системи відліку:

$$\min_{R,s,t} \|sXR + t - X_{anchors}\|^2 \quad (6)$$

де X – координати, отримані MDS, а $X_{anchors}$ – реальні координати якорів.

Це дозволяє уникнути викривлення просторової структури при надмірному впливі якорів і забезпечує інваріантність до обертання, масштабування та переносу, властиву MDS.

Дослідження показало, що при втраті окремих якорів (наприклад, через розряд батареї або вихід з мережі) можлива динамічна перенормалізація координат інших вузлів без повного

перерахунку локалізації. Це досягається через побудову локальних карт з подальшою зшивкою (англ. patch merging), що знижує обчислювальне навантаження.

MATLAB-моделювання локалізації та виявлення помилок у безпроводових сенсорних мережах. Для верифікації запропонованих підходів було розроблено та реалізовано комплексну модель у середовищі MATLAB, яка дає змогу імітувати різні аспекти локалізації та виявлення помилок у безпроводових сенсорних мережах (БСМ). У цій частині описано архітектуру симулятора, особливості модулів, сценарії тестування та аналіз результатів.

Модель складається з наступних основних модулів:

- Генератор топології мережі – створює розташування вузлів, підтримує випадкову, кластерну або сіткову генерацію.
- Модуль розрахунку RSSI-матриці – визначає силу сигналу за моделлю втрат у вільному просторі або з флуктуаціями (log-normal shadowing).
- Модуль побудови графа зв'язності – формує сусідні зв'язки між вузлами за порогом чутливості приймача.
- Алгоритм локалізації – реалізовано класичний MDS, його жадібну модифікацію з евристикою, а також варіант із відновленням розрідженої матриці.
- Модуль помилкових спотворень – додає похибки до RSSI, імітує несправності вузлів або втрату сигналу.

Блок візуалізації – відображає істинну та реконструйовану топологію, heatmap похибок.

У рамках дослідження розглянуто кілька типових сценаріїв:

- Сценарій А: 100 вузлів, 10% якірних, випадкова топологія, похибка вимірювання 5 дБ, повна матриця RSSI.
- Сценарій В: 200 вузлів, 5% якірних, 40% втрачених зв'язків у RSSI-матриці (розрідженість), помилки в 10% вузлів.
- Сценарій С: Кластерна мережа (3 підмережі по 50 вузлів), симуляція атаки (аномальні значення RSSI в 15% вузлів).

Для кількісної оцінки ефективності алгоритмів застосовувалися такі метрики:

- Середньоквадратична похибка (RMSE) локалізації:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\hat{x}_i - x_i\|^2}, \quad (7)$$

де \hat{x}_i – оцінені координати, x_i – істинні.

- Показник точності виявлення аномалій:
- Precision, Recall, F1-score при використанні класифікації на основі спектральних ознак.

Час виконання алгоритмів – обчислювальна складність є критичною для розгортання на вбудованих пристроях. Порівняння алгоритмів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння реалізацій

Алгоритм	RMSE (Сценарій В)	Виявлення аномалій (F1)	Час виконання
Класичний MDS	7.12 м	—	1.2 с
MDS з жадібною евристикою	4.56 м	—	2.0 с
MDS з відновленням матриці	3.91 м	—	3.5 с
MDS + спектральна детекція	4.02 м	0.89	4.1 с

Переваги моделі:

1. Модульність дозволяє швидко комбінувати різні типи помилок і топологій.

2. Висока гнучкість – підтримка довільних розмірів мереж і ступенів розрідженості.

3. Інтеграція з реальними вимірами – можлива обробка даних з експериментальних тестів або зовнішніх логів.

Для ефективного впровадження результатів дослідження у реальні безпроводові сенсорні мережі рекомендується:

1. Впроваджувати жадібні MDS-алгоритми в якості первинного шару локалізації, доповненого процедурою відновлення матриць для підвищення точності.

2. Використовувати спектральні методи детекції аномалій у системах моніторингу стану мережі для раннього виявлення несправностей.

3. Забезпечити достатню кількість якірних вузлів для підвищення стабільності локалізації в динамічних умовах.

4. Оптимізувати обчислювальні процедури для роботи на вбудованих платформах із обмеженими ресурсами.

Висновки

У цій роботі запропоновано ефективний метод локалізації вузлів у безпроводових сенсорних мережах, що ґрунтується на реконструкції розрідженої матриці відстаней та подальшому застосуванні евристичного алгоритму Greedy MDS (Multidimensional Scaling). Такий метод дозволяє відновити координати навіть у випадках значної відсутності даних, що часто трапляється в реальних умовах функціонування сенсорних мереж – при обмежених енергетичних ресурсах, втраті пакунків через завади або нестабільний зв'язок.

Отримані в результаті моделювання в MATLAB результати продемонстрували високу точність локалізації порівняно з базовими методами, зберігаючи при цьому обчислювальну ефективність, що є критичним для енергообмежених систем. Запропонований метод показує особливу ефективність у сценаріях, де початкова інформація представлена розрідженою RSSI-матрицею, яка в типовому вигляді не забезпечує достатньої точності для класичних підходів до локалізації.

Суттєвою перевагою розробленого підходу є його здатність працювати в умовах нестабільного або агресивного середовища, наприклад:

- у військових умовах, де відмовостійкість та автономність БСМ мають критичне значення;
- під час природних або техногенних катастроф, коли класичні комунікаційні інфраструктури недоступні;
- в розподілених мережах без гарантованого централізованого керування.

Крім того, методика може бути адаптована до задач самоконфігурації мереж у режимі реального часу, зокрема у випадках мобільних сенсорних платформ.

Перспективи подальших досліджень включають:

- Інтеграцію з системами виявлення аномалій у RSSI-даних, що дозволить не лише локалізувати вузли, а й виявляти підозрілі або несправні сенсори;
- Аналіз стійкості до недостовірних або атакованих даних (наприклад, у випадку симуляції зловмисного вузла) у великомасштабних мережах;
- Оптимізацію алгоритму для виконання на пристроях із обмеженими обчислювальними можливостями шляхом використання інкрементних евристик та обмеження розмірності оброблюваної матриці;
- Модернізацію у вигляді енергоефективного протоколу з розподіленою обробкою, що може бути реалізований в edge-середовищі.

Таким чином, запропонований метод локалізації є гнучким, масштабованим і придатним для широкого спектру практичних застосувань у сфері безпроводових сенсорних мереж, підвищуючи їхню надійність, функціональність і готовність до роботи в екстремальних умовах.

Список використаної літератури:

1. Shakunt, P.S. Diagnosis of Faults in Wireless Sensor Networks Through Machine Learning Approach. *Human-Centric Smart Computing. ICHCSC 2023. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2023. 376. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-99-7711-6_17.
2. Ridha M. A., Nickray M. Fault Detection in Wireless Sensor Networks Using Horse Herd Algorithm and Convolutional Neural Network with Attention Layer. *Journal of Electrical Systems*. 2024. Vol. 20, no. 11. P. 3291–3309. URL: <https://doi.org/10.52783/jes.8086>.
3. Feghhi M. M., Alsharfa R. M., Majeed M. H. Efficient Fault Detection in WSN Based on PCA-Optimized Deep Neural Network Slicing Trained with GOA. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*. 2025. Vol. 18, no. 5. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.07030>.
4. Padhi R., Muduli D., Sharma S. Automated Fault Diagnosis System in Wireless Sensor Network: A Fault Node Recovery Algorithm Approach. *Recent Advances in Signals and Systems. VSPICE 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2024. No. 1227. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-97-4657-6_25.
5. Mederos-Madrazo B., Diaz-Roman J., Enriquez-Aguilera F. Dealing with Outliers in Wireless Sensor Networks Localization: An Iterative and Selection-Minimization Strategy. *Int J Netw Distrib Comput*. 2024. P. 41–52. URL: <https://doi.org/10.1007/s44227-024-00024-1>.

Автор статті

Кириченко Роман – старший викладач, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.
ORCID: 0009-0006-2586-2493

Author of the article

Kyrychenko Roman – senior lecturer, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.
ORCID: 0009-0006-2586-2493