



О. М. Семенюк¹, Н. П. Процах²

¹ Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

² Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПЕРЕВІРКИ РОЗТАШУВАННЯ НОДІВ У БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

Розроблено програмне забезпечення (ПЗ) для моделювання процесу визначення місця розташування нодів у бездротових сенсорних мережах (БСМ). З'ясовано, що точність позиціонування у таких мережах залежить від кількості контрольних нодів із відомими координатами, щільності мережі та обраного методу обчислення відстаней. Проаналізовано три основні методи вимірювання: індикації рівня прийнятого сигналу RSSI (англ. *Received Signal Strength Indication*), часу прибуття сигналу TOA (англ. *Time of Arrival*) та затримки на повний шлях RTT (англ. *Round Trip Time*). Застосовано експериментальний підхід, що дав змогу оцінити вплив вхідних параметрів, таких як кількість сенсорів, частка контрольних точок та площа покриття мережі, на середню та максимальну похибку позиціонування. Встановлено, що збільшення кількості контрольних нодів до 10 % від загальної кількості дає змогу істотно знизити середню похибку позиціонування до 1,38 м по осі *X* та 1,13 м по осі *Y*. Натомість зменшення частки контрольних точок до 3 % підвищує похибку до 2,95 м по осі *X* та 2,01 м по осі *Y*, проте забезпечує енергозбереження та можливість роботи у складних умовах. Виявлено, що метод RSSI демонструє найкращі результати за відсутності значних перешкод, тоді як методи TOA та RTT є точнішими за наявності синхронізації годинників на нодах. Досліджено ефективність розробленого ПЗ, який дає змогу користувачам задавати різні параметри мережі, імпортувати або автоматично генерувати дані про сенсори, а також візуалізувати процес позиціонування в режимі реального часу. Візуалізація результатів дає змогу детально проаналізувати розташування сенсорів, оцінити їхню похибку та знайти оптимальні конфігурації для реального розгортання мережі. З'ясовано, що програмне забезпечення можна використати як ефективний інструмент для планування розгортання БСМ, здійснення досліджень з вибору параметрів позиціонування, які забезпечують підвищення точності та ефективності роботи мережі.

Ключові слова: позиціонування; похибка; алгоритм; вузли; локалізація; похибка вимірювань; алгоритми трилатерації; моделювання.

Вступ / Introduction

Бездротові сенсорні мережі (БСМ) є важливим інструментом для моніторингу середовища, забезпечуючи автономне збирання даних у важкодоступних місцях. Вони привертають увагу дослідників через їх широкий спектр застосувань у різних галузях, враховуючи моніторинг навколишнього середовища, розумні міста та промисловий Інтернет речей IoT (англ. *Internet of Things*). Точне визначення розташування сенсорів у таких мережах є актуальним завданням, яке безпосередньо впливає на ефективність роботи мережі. За останні роки значного прогресу було досягнуто у методах визначення місць розташування нодів у БСМ, що дає змогу покращити точність позиціонування та оптимізувати витрати енергії. Під терміном "нод" будемо розуміти вузол мережі, який виконує функції збирання, оброблення та передавання даних.

Одним із найпоширеніших викликів є проблема точного позиціонування без застосування дорогих GPS-модулів для кожного нода. Наявні підходи, зокрема трила-

терація, спираються на вимірювання відстаней між нодами за допомогою різних методів, таких як індикація рівня прийнятого сигналу RSSI (англ. *Received Signal Strength Indication*), час прибуття сигналу TOA (англ. *Time of Arrival*) та затримка на повний шлях RTT (англ. *Round Trip Time*). Втім точність цих методів значно залежить від середовища розгортання мережі та наявності перешкод.

Наше дослідження спрямоване на розроблення та тестування ПЗ для моделювання процесу визначення місць розташування нодів у реальних умовах. Основне завдання дослідження полягає в оцінюванні впливу різних вхідних параметрів на точність позиціонування та пошуку оптимальних налаштувань, які мінімізують похибки та витрати енергії.

Об'єкт дослідження – моделювання процесу позиціонування вузлів у бездротових сенсорних мережах.

Предмет дослідження – методи і засоби визначення місця розташування вузлів, що базуються на вимірюванні відстаней між ними з урахуванням впливу вхід-

Інформація про авторів:

Семенюк Олександр Миколайович, аспірант, кафедра комп'ютерних наук. Email: olexandr.semeniuk@gmail.com;

<https://orcid.org/0009-0009-1995-1328>

Процах Наталія Петрівна, д-р фіз.-мат. наук, професор, кафедра обчислювальної математики та програмування.

Email: natalia.p.protsakh@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-3034-5902>

Цитування за ДСТУ: Семенюк О. М., Процах Н. П. Інструменти для моделювання та перевірки розташування нодів у бездротових сенсорних мережах. Науковий вісник НЛТУ України. 2024, т. 34, № 8. С. 136–141.

Citation APA: Semeniuk, O. M., & Protsakh, N. P. (2024). Tools for modeling and verification of node placement in wireless sensor networks. *Scientific Bulletin of UNFU*, 34(8), 136–141. <https://doi.org/10.36930/40340816>

них параметрів, що дасть змогу мінімізувати похибки позиціонування та підвищити ефективність роботи бездротових сенсорних мереж у різних умовах їх розгортання.

Мета роботи – розробити програмне забезпечення для моделювання процесу позиціонування вузлів у бездротових сенсорних мережах, що забезпечить аналіз точності визначення місць розташування вузлів, оцінювання впливу ключових параметрів мережі (щільності вузлів, кількості контрольних точок, середовища передачі) та мінімізацію похибок позиціонування в реальних умовах.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

1. Розробити ПЗ для моделювання процесу позиціонування вузлів, що дасть змогу створити універсальний інструмент для аналізу точності позиціонування в різних сценаріях.
2. Проаналізувати методи визначення місць розташування вузлів, що дасть можливість оцінити їх точність і ефективність за різних умов розгортання мережі.
3. Оцінити вплив ключових параметрів, таких як щільність мережі, кількість контрольних вузлів та метод обчислення відстаней, що забезпечить визначення оптимальних налаштувань для реальних умов експлуатації.
4. Запропонувати рекомендації щодо мінімізації похибок позиціонування, що сприятиме підвищенню ефективності роботи бездротових сенсорних мереж.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Ранні дослідження у сфері БСМ, як зазначено у роботі [5, 12], акцентували увагу на використанні методів позиціонування, таких як RSSI (англ. *Received Signal Strength Indication*). Цей метод не потребує додаткового апаратного забезпечення, що робить його економічно ефективним, однак точність значно знижується за умов впливу шумів і перешкод у середовищі.

Методи TOA (англ. *Time of Arrival*) та RTT (англ. *Round Trip Time*), проаналізовані в роботах [5, 8], забезпечують вищу точність визначення координат внаслідок точного вимірювання часу поширення сигналу. Проте ці підходи вимагають значного енергоспоживання та точного синхронізування годинників сенсорів, що обмежує їх застосування у великих мережах.

Більш сучасні дослідження [3, 8, 10] демонструють перспективність використання алгоритмів маршрутизації та машинного навчання, які дають змогу покращити точність визначення координат та оптимізувати енергоспоживання. Наприклад, у роботі [10] запропоновано алгоритми, що адаптуються до умов середовища, мінімізуючи вплив перешкод, тоді як у роботі [8] описує підходи, засновані на застосуванні гібридних методів.

Новітні дослідження зосереджені на використанні гібридних підходів, які поєднують кілька методів позиціонування для підвищення надійності результатів. Зокрема, у роботах [1, 3, 4] наголошено на важливості адаптивних алгоритмів, здатних динамічно змінювати стратегії позиціонування залежно від умов середовища. Інші підходи, наприклад, алгоритми з використанням машинного навчання [5, 10], демонструють потенціал у підвищенні точності внаслідок оброблення великих обсягів даних.

Оптимізація енергоспоживання є критично важливою темою досліджень, як зазначено у роботі [1]. У роботі наголошено на потребі розроблення алгоритмів, які забезпечують баланс між точністю позиціонування

та енергозбереженням. У цьому контексті створення інструментів для моделювання і тестування позиціонування у різних сценаріях є важливим кроком до вдосконалення роботи БСМ.

Матеріали та методи дослідження. У роботі використано експериментальний підхід, спрямований на дослідження впливу параметрів бездротових сенсорних мереж на точність позиціонування вузлів. Для цього застосовано методи індикації рівня прийнятого сигналу (RSSI), часу прибуття сигналу (TOA) та затримки на повний шлях (RTT). Моделювання процесів виконано за допомогою ПЗ, розробленого на базі мови програмування C++ із використанням середовища Qt Creator. Аналіз здійснено з урахуванням таких параметрів, як кількість вузлів, їх розташування, частка контрольних точок та площа покриття мережі.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Основними параметрами, що впливають на точність позиціонування вузлів у бездротових сенсорних мережах, були:

1. **Кількість нодів** у мережі, яка змінювалася від 100 до 1000 для дослідження впливу розміру мережі на ефективність їх позиціонування. Для основних експериментів було вибрано фіксовану кількість у 500 нодів.

2. **Частка нодів із відомими координатами:** цей параметр змінювався від 1 до 10 %, щоб визначити, наскільки сильно він впливає на загальну точність позиціонування. Наприклад, у першому експерименті використовували 10 % контрольних точок, а в другому – тільки 3 %.

3. **Межі області розгортання мережі:** мережа розгорталася на площі з мінімальними координатами $x = 10$ м, $y = 10$ м та максимальними координатами $x = 410$ м, $y = 410$ м, що дозволяло оцінити вплив розміру області на точність позиціонування.

4. **Методи вимірювання відстаней:**

- RSSI (англ. *Received Signal Strength Indication*) – вимірювання потужності прийнятого сигналу. Було враховано коефіцієнт втрат потужності, який залежить від середовища (значення для повітря – $n = 2$);
- TOA (англ. *Time of Arrival*) – вимірювання часу прибуття сигналу для обчислення відстані. Цей метод потребував точної синхронізації годинників на всіх нодах;
- RTT (англ. *Round Trip Time*) – варіант TOA, що визначав тривалість поширення сигналу в обидва напрямки. Цей підхід не вимагав синхронізації годинників, але мав підвищене енергоспоживання.

Можливості ПЗ. У першому вікні (рис. 1) користувач може задати кількість нодів, частку нодів із відомими координатами, межі області та обрати метод вимірювання відстаней.

Параметри позиціонування містять:

- *Number of nodes* (кількість вузлів) – загальна кількість сенсорів у мережі;
- *Percent nodes with known position* (частка вузлів з відомими координатами) – частка нодів із відомими координатами;
- *Bounds* (межі) – межі площі, де розгортається мережа;
- *Distance method* (метод визначення відстані) – вибір методу для обчислення відстаней;
- *Trilateration method* (метод трилатерації) – вибір алгоритму для обчислення координат.

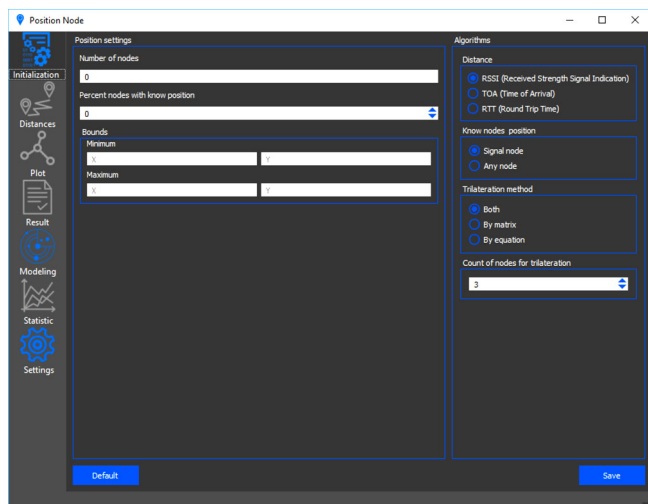


Рис. 1. Інтерфейс для задавання параметрів / Interface for setting parameters

Імпорт і генерування даних. Дані про мережу можна імпортувати з файлу, або згенерувати автоматично (рис. 2).

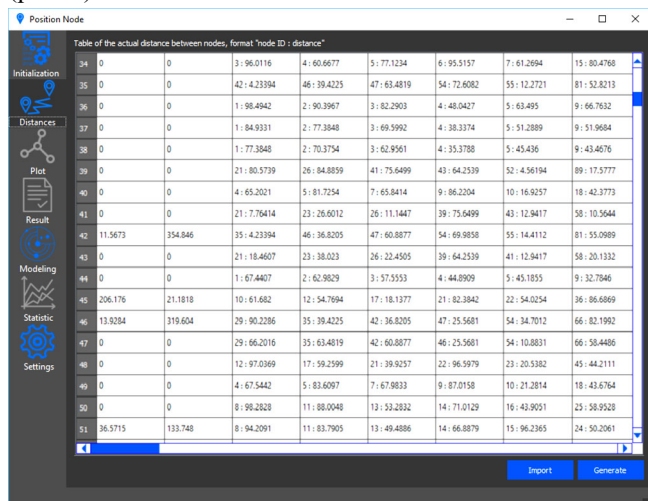


Рис. 2. Інтерфейс для введення даних про мережу / Interface for entering network data

Імпорт даних передбачав вибір файлу та шаблону зчитування даних:

- Table of the actual distance between nodes (таблиця актуальних відстаней між вузлами) – відображаються дані про мережу, координати сенсорів і відстані між ними;
- Import (імпортувати) – показує засоби для імпорту даних;
- Generate (згенерувати) – виконує генерування даних.

Отже, користувач має два варіанти введення даних – згенерувати їх або імпортувати. Після натискання кнопки "Import" відкриється інтерфейс для імпорту даних (рис. 3).

Цей інтерфейс містить:

- Path to file (шлях до файлу) – поле для вказівки файлу з даними;
- Mask for reading data of nodes (маска читання даних про вузли) – поле для визначення шаблону зчитування даних;
- Import (імпортувати) – переглядає вибраний файл і зберігає імпортовані дані;
- Cancel (скасувати) – скасовує процедуру імпорту даних;
- поле нижче відображає вміст обраного файлу.

Візуалізація процесу позиціонування. У вікні візуалізації, зображеному на рис. 4, користувач може спостерігати за процесом позиціонування в режимі реально-го часу.

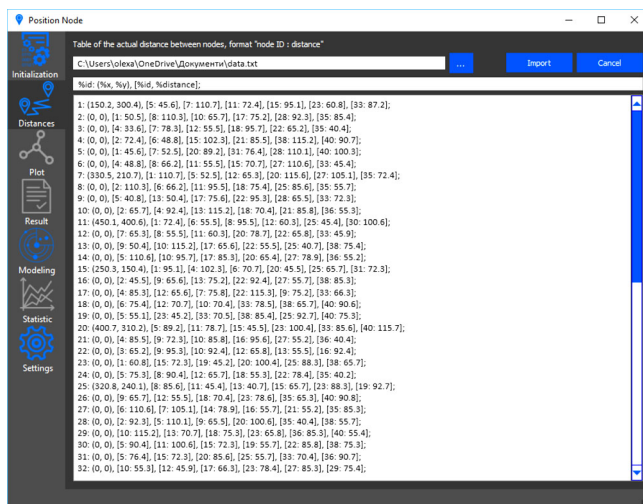


Рис. 3. Інтерфейс для імпорту даних про мережу / Interface for importing network data

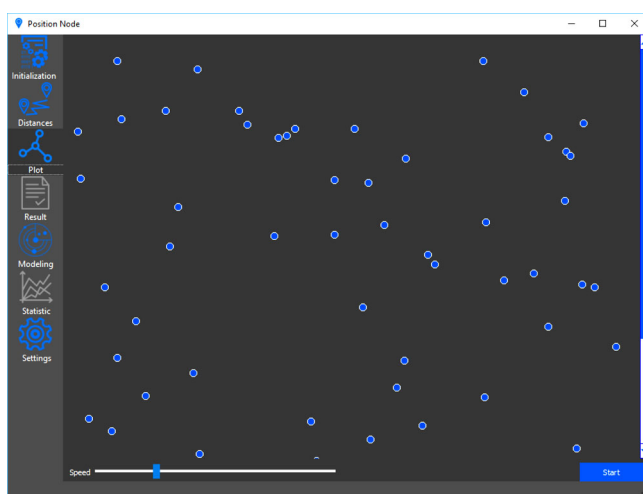


Рис. 4. Інтерфейс для відображення процесу позиціонування нодів / Interface for visualizing the positioning process of nodes

Інтерфейс демонструє розташування сенсорів і відображає, як здійснюється позиціонування. При відкритті вікна ноди з відомими координатами позначаються синім кольором. У ньому є такі елементи:

- Speed (швидкість) – дає змогу регулювати швидкість виконання позиціонування;
- Start (запуск) – запускає процес визначення місць розташування сенсорів.

На рис. 5 ілюстровано хід позиціонування.

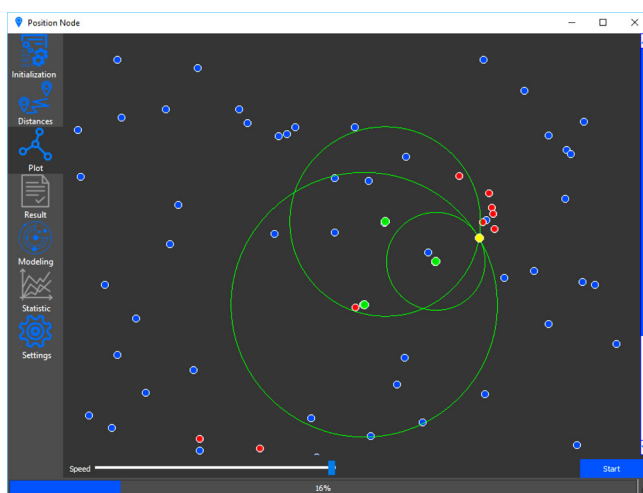


Рис. 5. Відображення процесу позиціонування нодів / Visualization of the node positioning process

Синіми точками позначено ноди з відомими координатами, зеленим кольором – ноди, які беруть участь у визначенні місця розташування, жовтим – нод, що визначається, а червоним – нод, чий координати вже обчислено. Після завершення позиціонування користувач може переглянути результати за допомогою інтерфейсу, зображеного на рис. 6.

Інтерфейс перегляду результатів позиціонування нодів надає повну статистику процесу їхнього позиціонування. Він показує похибки (у метрах) та кількість сенсорів, які вдалося знайти:

- Percent of found point (частка знайдених точок) – відображає частку знайдених сенсорів;
- Min (мінімальне) – вказує на мінімальну похибку позиціонування;
- Max (максимальне) – показує максимальну похибку позиціонування;
- Medium (середнє) – відображає середню похибку позиціонування;
- Medium deviation (середнє відхилення) – демонструє середньоквадратичне відхилення при позиціонуванні.

У таблиці, що є частиною інтерфейсу перегляду результатів (рис. 6), наведено дані для кожного ноду, враховуючи похибки позиціонування, кількість сенсорів, задіяних у визначенні координат, та інші параметри.

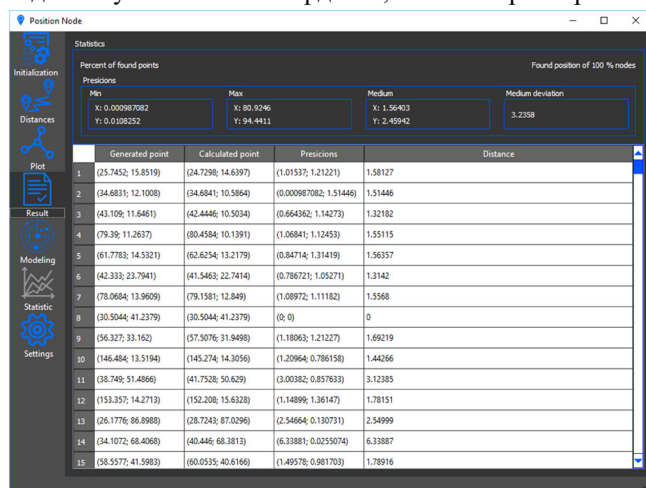


Рис. 6. Інтерфейс для перегляду результатів позиціонування нодів / Interface for viewing the results of node positioning

Під трилатерацією будемо розуміти метод визначення розташування об'єкта на підставі вимірювань відстаней до трьох або більше контрольних точок. У геодезії цей метод використовують для визначення координат пунктів геодезичних мереж у спосіб побудови на місцевості сітки трикутників і вимірювання довжин їхніх сторін. У контексті бездротових сенсорних мереж трилатерацію застосовують для обчислення розташування вузлів на підставі радіусів (відстаней) до вже відомих опорних точок.

Алгоритм трилатерації. Метод трилатерації базувався на обчисленні розташування ноду за відстанями до трьох або більше контрольних точок. Для визначення координат вузла розв'язують систему рівнянь:

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = r_1^2; \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 = r_2^2; \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 = r_3^2, \end{cases}$$

де: (x, y) – координати невідомого вузла; (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) – координати контрольних точок; r_1 , r_2 , r_3 – виміряні відстані до цих точок.

Для розширеного пояснення методів та математичного обґрунтування алгоритму трилатерації можна звернутися до роботи [6], де детально розглянуто принципи позиціонування точок за допомогою геодезичних методів, включно з трилатерацією. Алгоритм реалізовано з урахуванням можливих похибок у вимірюваннях, які виникають через перешкоди в середовищі. Похибки позиціонування обчислювалися для кожної осі окремо, а також загальне середньоквадратичне відхилення.

Статистичний аналіз процесу позиціонування.

Було проведено один експеримент для оцінювання ефективності підходу до позиціонування вузлів у бездротових сенсорних мережах. Експеримент складався з двох серій спостережень, у яких досліджували вплив частки контрольних точок на точність позиціонування інших вузлів мережі:

1. Спостереження 1 – 500 нодів, 10 % із відомими координатами, межі розгортання 410×410 м, використано метод RSSI. Результати показали, що 98,8 % нодів були точно позиціоновані з середньою похибкою по осі X – 1,38 м та по осі Y – 1,13 м.
2. Спостереження 2 – 500 нодів, 3 % із відомими координатами, використано метод RSSI. Усі ноди було позиціоновано (100 %), однак середня похибка збільшилася майже вдвічі, що вимагає додаткових енергетичних ресурсів.

З'ясовано, що точність позиціонування покращується зі збільшенням кількості нодів з відомими координатами, але це збільшує витрати електричної енергії, зокрема через активне використання GPS-модулів, які споживають значну кількість енергії для отримання координат та їхнього передавання.

Було проведено серію експериментів для визначення ефективності запропонованих методів позиціонування у бездротових сенсорних мережах (БСМ). Описані нижче результати демонструють залежність точності позиціонування від різних вхідних параметрів.

Експеримент 1 – позиціонування із 10 % контрольних нодів:

- вхідні параметри:
 - кількість нодів – 500;
 - частка нодів із відомими координатами – 10 %;
 - межі області розгортання – 410×410 м;
 - метод вимірювання відстаней – RSSI;
- результати:
 - частка позиціонованих нодів – 98,8 %;
 - мінімальна похибка: по осі X – 0,005 м; по осі Y – 0,008 м;
 - максимальна похибка: по осі X – 45 м; по осі Y – 51 м;
 - середня похибка: по осі X – 1,38 м; по осі Y – 1,13 м;
 - середньоквадратичне відхилення – 1,94 м.

Експеримент 2 – позиціонування з 3 % контрольних нодів:

- вхідні параметри:
 - кількість нодів – 500;
 - частка нодів із відомими координатами – 3 %;
 - межі області розгортання – 410×410 м;
 - метод вимірювання відстаней – RSSI;
- результати:
 - частка позиціонованих нодів – 100 %;
 - мінімальна похибка: по осі X – 0,003 м; по осі Y – 0,013 м;
 - максимальна похибка: по осі X – 9 м; по осі Y – 8 м;
 - середня похибка: по осі X – 2,95 м; по осі Y – 2,01 м;
 - середньоквадратичне відхилення – 3,9 м.

Результати дослідження показали, що використання 10 % контрольних нодів забезпечує високу точність позиціонування, причому середня похибка була значно меншою порівняно з випадком 3 % контрольних точок.

Проте в умовах обмеженого ресурсу енергії та складного середовища може бути вигідним використання меншої кількості контрольних нодів, навіть якщо це збільшує похибки.

Метод RSSI продемонстрував прийнятну точність, однак максимальні похибки в 45-51 м у першому експерименті вказують на чутливість методу до перешкод у середовищі. У другому експерименті, незважаючи на повне покриття (100 % позиціонованих нодів), зросла середня похибка, що пояснюють зниженням кількості контрольних нодів та більшою залежністю від якості зв'язку.

Ці результати підтверджують важливість компромісу між точністю позиціонування та енергетичними витратами. У майбутніх дослідженнях доцільно розглянути можливість використання адаптивних алгоритмів, які можуть змінювати метод позиціонування залежно від поточних умов середовища, а також впровадження методів машинного навчання для покращення точності оцінок.

Отже, внаслідок виконаної роботи було розроблено ПЗ для моделювання процесу визначення місць розташування нодів у бездротових сенсорних мережах (БСМ). ПЗ розроблено мовою програмування C++ з використанням середовища Qt Creator, яке забезпечує інтуїтивний інтерфейс для налаштування параметрів моделювання та візуалізації результатів. Використання цього підходу дало змогу проаналізувати вплив ключових параметрів мережі (щільності вузлів, частки контрольних точок, середовища передачі) на точність позиціонування та запропонувати способи мінімізації похибок у реальних умовах.

Обговорення результатів дослідження. Результати нашого дослідження узгоджуються з висновками, наведеними в сучасних наукових роботах, що стосуються бездротових сенсорних мереж (БСМ). Зокрема, у роботі [2] розглянуто проблему розроблення бездротової мережі сенсорних та виконавчих вузлів у складі кіберфізичної системи, проаналізовано різні варіанти компонування вузлів та технології бездротового зв'язку для її побудови. Наше дослідження підтверджує ефективність використання технології Wi-Fi для побудови БСМ, що узгоджується з висновками авторів щодо доцільності застосування цієї технології в умовах обмежених ресурсів.

Дослідження [13] вивчає методи позиціонування у БСМ із використанням алгоритмів машинного навчання для оброблення даних у реальному часі. Автори вказують на важливість адаптивних методів, які зменшують вплив перешкод. Наше дослідження узгоджується з цими висновками, демонструючи, що комбінування методів TOA і RSSI забезпечує кращу точність навіть за наявності шуму в середовищі.

У роботі [9] розглянуто вплив щільності розташування вузлів та радіуса їхнього зв'язку на якість маршрутизації в БСМ. Автор визначив критичні параметри для забезпечення високої ймовірності зв'язності мережі. Наші результати доповнюють висновки Шостака, демонструючи, що збільшення контрольних вузлів у мережі до 10 % дає змогу істотно знизити похибки у позиціонуванні.

Дослідження [11] пропонує ймовірнісну модель оцінювання відстаней для тривимірної локалізації у бездротових сенсорних мережах. Запропоновані алгоритми дають змогу покращити точність позиціонування навіть

у складних умовах розподілу вузлів. Це узгоджується з нашими висновками про потребу адаптації параметрів мережі для зменшення похибок.

Додатково, дослідження [14] зосереджуються на енергозберігаючих рішеннях для маршрутизації в БСМ, зокрема на алгоритмах, що враховують динамічність розташування вузлів у мережі. У нашій роботі також підтверджено, що такі підходи сприяють оптимізації енергоспоживання і покращенню стабільності роботи мережі.

Отже, результати нашого дослідження підтверджують висновки, зроблені в сучасних українських і закордонних публікаціях, демонструючи практичну ефективність запропонованих підходів до вибору топології та алгоритмів позиціонування у бездротових сенсорних мережах.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – удосконалено методику моделювання процесу позиціонування вузлів у бездротових сенсорних мережах, яка, на відміну від наявних, враховує вплив таких параметрів, як щільність вузлів, кількість контрольних точок та площу покриття на точність визначення їх місць розташування.

Практична значущість результатів дослідження – результати дослідження можна застосувати для розроблення ПЗ, призначеного для проєктування бездротових сенсорних мереж у реальних умовах, налаштування їхніх параметрів для зменшення похибок позиціонування та енергоспоживання, а також для дослідження нових алгоритмів маршрутизації та локалізації з урахуванням динамічних умов середовища, забезпечуючи підвищення надійності та ефективності роботи таких мереж.

Висновки / Conclusions

Розроблено програмне забезпечення для моделювання процесу позиціонування вузлів у бездротових сенсорних мережах, що забезпечує аналіз точності визначення місць розташування вузлів та мінімізацію похибок позиціонування в реальних умовах. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Систематизовано методи позиціонування вузлів у бездротових сенсорних мережах, зокрема RSSI, TOA та RTT, з акцентом на їхню точність та енергоспоживання, що дало змогу визначити відповідні умови використання кожного методу залежно від параметрів мережі та середовища передачі даних, а також розробити рекомендації для мінімізації похибок позиціонування та зниження енергозатрат.
2. Проаналізовано вплив ключових параметрів мережі, таких як щільність вузлів, частка контрольних точок та межі розгортання, на середню та максимальну похибку позиціонування, що дало можливість визначити відповідні параметри конфігурації бездротових сенсорних мереж для мінімізації похибок позиціонування та підвищення точності роботи системи в різних умовах розгортання.
3. Розроблено ПЗ мовою програмування C++ з використанням середовища Qt Creator, яке дає змогу виконувати моделювання процесу позиціонування вузлів у бездротових сенсорних мережах, його візуалізацію та аналіз.
4. Встановлено, що збільшення частки контрольних вузлів до 10 % істотно знижує середню похибку до 1,38 м

по осі X та 1,13 м по осі Y , порівняно зі зменшенням цього показника до 3 %.

5. Запропоновано рекомендації для налаштувань параметрів бездротових сенсорних мереж, які забезпечують мінімізацію похибок при позиціонуванні та зменшення енергоспоживання.

References

1. Albuquerque, K. R. de A., Medeiros, R. P. de, Duarte, R. M., Villanueva, J. M. M., & Macêdo, E. C. T. de. (2023). Routing Algorithm for Energy Efficiency Optimizing of Wireless Sensor Networks based on Genetic Algorithms. *Wireless Personal Communications*, 133(4), 1829–1856. <https://doi.org/10.1007/s11277-023-10849-8>
2. Bochkaryova, T. M., Mykhailiuk, A. P., & Kolodyi, L. I. (2017). Wireless network of sensors and actuators as part of a cyber-physical system. *Scientific Journal of Lviv Polytechnic National University*, 881, 15–24. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/oct/14644/2017n881botchkaryova-wirelessensoractuator15-24.pdf>
3. Dakova, L. V., Dakov, S. Yu., Blazhenyi, N. V., & Voloshyn, V. O. (2024). Energy-efficient routing protocol in wireless sensor networks. *Connection*, 2, 10–15. <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2024.020913>
4. Dovzhenko, N. M. (2017). Features of building sensor networks. *Scientific Notes of the State University of Telecommunications*, 2. URL: <http://journals.dut.edu.ua/index.php/sciencenotes/article/view/1567>
5. Gezici, S. (2008). A survey on wireless position estimation. *Wireless Personal Communications*, 44(3), 263–282. <https://doi.org/10.1007/s11277-007-9375-z>
6. Ivanov, A. V., & Petrov, B. N. (2019). Basics of geodesy: Methods of point positioning. *Zaporizhzhya National University*. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi77/0057449.pdf>
7. Molisch, A. F. (2005). Wireless communications. In: *IEEE Press/Wiley*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/book/5635423>
8. Paul, A. K., & Sato, T. (2017). Localization in wireless sensor networks: A survey on algorithms, measurement techniques, applications, and challenges. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 6(4), article ID 24. <https://doi.org/10.3390/jsan6040024>
9. Shostak, A. V. (2015). Connectivity of heterogeneous wireless sensor networks. *System Research and Information Technologies*, 3, 20–26. URL: <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/692/614>
10. Swain, S. K., & Nayak, J. (2020). Swarm-intelligence-centric routing algorithm for wireless sensor networks. *Sensors*, 20(18). <https://doi.org/10.3390/s20185164>
11. Wang, P., Wang, H., Li, W., Fan, X., & Zhao, D. (2024). Probability-based distance estimation model for 3D DV-Hop localization in WSNs. URL: <https://arxiv.org/abs/2401.05709>
12. Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52(12), 2292–2330. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2008.04.002>
13. Zhang, L., et al. (2023). Machine learning-based integrated wireless sensing and positioning for cellular networks. URL: https://leizhanggg.github.io/files/1_Machine_Learning-Based_Integrated_Wireless_Sensing_and_Positioning_for_Cellular_Network%281%29.pdf
14. Zhao, X., Wang, L., & Li, M. (2021). Energy-efficient routing protocol design for wireless sensor networks. *Electronics*, 10(13), article ID 1539. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/13/1539>

O. M. Semeniuk¹, N. P. Protsakh²

¹ Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine

² Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

TOOLS FOR MODELING AND VERIFICATION OF NODE PLACEMENT IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

The study presents and develops a software product for simulating the localization process of nodes in wireless sensor networks (WSNs). It was clarified that positioning accuracy in such networks depends on the number of reference nodes with known coordinates, network density, and the selected distance measurement method. The analysis covered three primary measurement methods: Received Signal Strength Indication (RSSI), Time of Arrival (TOA), and Round Trip Time (RTT). An experimental approach was applied to evaluate the influence of input parameters, such as the number of sensors, percentage of reference points, and network coverage area, on the average and maximum positioning errors. It was established that increasing the proportion of reference nodes to 10 % of the total number significantly reduces the average positioning error to 1.38 m on the X -axis and 1.13 m on the Y -axis. Conversely, reducing the percentage of reference points to 3 % increases the error to 2.95 m on the X -axis and 2.01 m on the Y -axis, while preserving energy and enabling operation in challenging conditions. The RSSI method demonstrated the best results under minimal interference, whereas TOA and RTT were more accurate with synchronized node clocks. The study also evaluated the efficiency of the developed software product, which allows users to set various network parameters, import or generate sensor data automatically, and visualize the positioning process in real time. Visualization enables detailed analysis of sensor placement, error evaluation, and the identification of optimal configurations for real-world deployment. It was concluded that the software product could be employed as an effective tool for planning WSN deployment, conducting research on positioning accuracy optimization, and enhancing energy efficiency.

Keywords: localization; error; algorithm; nodes; localization; measurement error; trilateration algorithms; modeling.