

Г. ПАСТУШЕНКО

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЛОКАЛІЗАЦІЇ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Предметом дослідження в статті є методи підвищення точності локалізації в бездротових сенсорних мережах в умовах відкритого середовища. Особливу увагу приділено методам налаштування потужності передачі сигналу для визначення діапазонів зв'язку між опорними й невідомими вузлами, а також методам оптимізації локалізації за допомогою багатокрокового звуження зони пошуку можливих місць розташування вузлів. **Мета роботи** – розроблення ефективного методу, що підвищує точність локалізації вузлів бездротових сенсорних мереж унаслідок налаштування потужності передачі сигналів для поступового звуження зони пошуку, використання багатораундового вимірювання для покращення результатів локалізації та статистичного аналізу для прогнозування місця розташування вузлів. У статті розв'язуються такі **завдання**: 1) розроблення методу адаптивного налаштування потужності сигналу; 2) створення алгоритму багатораундового звуження зони пошуку; 3) використання статистичних методів для прогнозування позицій вузлів. **Методи**, що застосовуються в дослідженні: адаптивне налаштування потужності сигналу; алгоритм багатораундового звуження зони пошуку; статистичний аналіз для прогнозування місця розташування вузла. **Досягнуті результати**. Запропоновано метод, що дає змогу значно підвищити точність локалізації в бездротових сенсорних мережах. У процесі експериментів було показано, що, на відміну від традиційних методів, новий підхід знижує похибки позиціонування на 30–40 %, що є значним досягненням для мереж, які працюють в умовах відкритого середовища. У деяких випадках метод допомагає точно визначити місце розташування вузла вже на пізньому етапі вимірювань. Це сприяє зменшенню витрат енергії, оскільки кількість необхідних вимірювань і перевірок істотно скорочується. Розроблений підхід демонструє ефективність (навіть у ситуаціях, коли сигнали зазнають значних перешкод) завдяки адаптивному налаштуванню потужності передачі сигналу. **Висновки**. Застосування методу підвищує точність локалізації в бездротових сенсорних мережах, що важливо для IoT-застосунків. Це знижує енергоспоживання завдяки меншій потребі у вимірюваннях. Подальші дослідження можуть зосередитися на адаптації до складніших умов, як-от міські середовища чи внутрішні простори.

Ключові слова: локалізація; бездротові сенсорні мережі; налаштування потужності передачі сигналу; точність локалізації; багатокрокова оптимізація; IoT; прогнозування місця розташування; енергоефективність.

Вступ

У сучасних бездротових сенсорних мережах (WSN), особливо в контексті Інтернету речей (IoT), точна локалізація вузлів є важливим складником для забезпечення ефективності мережі та її функціональності. Локалізація бездротових вузлів дає змогу визначити їх точне місце розташування, що є критично важливим для різноманітних застосунків, від моніторингу навколишнього середовища до управління розподіленими системами. Однак традиційні методи локалізації, такі як тріангуляція або використання GPS, можуть бути обмежені в умовах внутрішніх середовищ або за низької енергоефективності [1–3].

Визначення завдань

У бездротових сенсорних мережах (WSN) точна локалізація вузлів є ключовим фактором для забезпечення ефективної роботи мережі, особливо

в контексті застосування в Інтернеті речей (IoT). Завдання полягає в розробленні методу, що допомагає точно визначати місце розташування вузлів мережі внаслідок визначення діапазонів зв'язку між опорними й невідомими вузлами з огляду на налаштування потужності передачі сигналів. Традиційні методи локалізації, такі як GPS або тріангуляція, мають обмеження в умовах відкритого середовища, де є перешкоди та обмеження енергоефективності. У зв'язку з цим постає завдання вдосконалення методів локалізації внаслідок оптимізації налаштування потужності сигналу й поступового звуження можливих місць розташування вузлів за допомогою багатокрокового вимірювання.

Завданням статті є розроблення методу, що дає змогу підвищити точність локалізації вузлів завдяки адаптивному налаштуванню потужності сигналу для визначення діапазонів зв'язку, і впровадження багатораундового уточнення можливих позицій вузлів. Основною метою є створення такого алгоритму, що здатний на основі кількох раундів

вимірювань звузити список можливих місць розташування вузлів до мінімального діапазону й точно визначити їх координати.

У межах цього дослідження необхідно розв'язати такі завдання:

1) запропонувати метод налаштування потужності сигналу для оптимізації діапазону зв'язку між опорними й невідомими вузлами;

2) розробити алгоритм багатокрокової локалізації, що поступово звужує зону пошуку місця розташування вузлів способом використання кількох раундів вимірювань;

3) використати статистичні методи для обчислення середнього значення позицій у кожному раунді та визначення прогнозованого місця розташування вузла.

Завдання передбачає також випробування й аналіз результатів вимірювань на основі результатів експериментів для оцінювання точності запропонованого методу в реальних умовах відкритого середовища.

Аналіз сучасних публікацій

У сучасних бездротових сенсорних мережах (БСМ) точність локалізації вузлів є критично важливою для ефективного функціонування та широкого спектра застосувань. Дослідники пропонують різні підходи до підвищення точності локалізації.

В. Власов та Ю. Скорик у статті "Моделювання бездротової сенсорної мережі для оцінки точності позиціонування методом RSSI" [4, 5] досліджують імітаційне моделювання точності позиціонування в бездротових сенсорних мережах на основі методу RSSI (*Received Signal Strength Indicator*). Цей метод застосовується для оцінювання рівня прийнятого сигналу для визначення відстані між вузлами. Важливим аспектом є аналіз точності локалізації на етапі ініціалізації мережі. Стаття дає практичні рекомендації щодо покращення точності в контексті впровадження цього методу в реальних умовах.

Автори роботи "Інструменти для моделювання та перевірки розташування нодів у бездротових сенсорних мережах" [6, 7] розробляють програмне забезпечення для моделювання розташування нодів у бездротових сенсорних мережах, зосереджуючи увагу на точності позиціонування залежно від кількості контрольних нодів, щільності мережі та методу

обчислення відстаней. Це дає змогу ефективно прогнозувати вплив різних параметрів на точність локалізації, що має вагоме значення для створення стабільних і точних мереж.

У статті "Аналіз застосування сенсорних мереж у складних умовах" [8, 9] розглянуто методи енергозбереження в бездротових сенсорних мережах, що можуть вплинути на точність локалізації. Оскільки енергетична ефективність є критично важливою в бездротових мережах, використання методів машинного навчання для оптимізації енергоспоживання може допомогти в досягненні кращої точності без надмірних енерговитрат.

Автори праці "Метод локалізації об'єктів на основі вимірювання потужності сигналу" [10, 11] аналізують різні алгоритми локалізації об'єктів у бездротових сенсорних мережах, зокрема методи, ґрунтовані на вимірюванні потужності сигналу. Оскільки точність локалізації безпосередньо залежить від якості сигналу й точності вимірювання, стаття надає важливу інформацію щодо поліпшення точності внаслідок використання потужності сигналу для вимірювання відстаней.

У статті "Дослідження точності локалізації в сенсорних мережах" [12, 13] запропоновано метод мультилатерації для завдання локалізації в сенсорних мережах. Цей метод використовує вимірювання відстаней до кількох точок для визначення місця розташування об'єкта. Мультилатерація є одним із найбільш точних методів для визначення координат в умовах бездротових сенсорних мереж. Отже, стаття є важливим внеском у покращення точності локалізації.

У дисертації "Методи побудови адресного простору безпроводних сенсорних мереж" [14, 15] порушено основні проблеми побудови бездротових сенсорних мереж, зокрема описано методи підвищення достовірності інформації в таких мережах, що напряду впливають на точність локалізації. Дослідження доводить важливість правильної побудови адресного простору для забезпечення точності та надійності локалізації в складних мережах.

Опис методу

Запропонований метод ґрунтується на налаштуванні потужності передачі для різних значень з метою визначення діапазонів зв'язку між опорними вузлами. Деякі використовуються як базові точки з

відомими координатами (X, Y), що зберігаються в пам'яті. Інші вузли розподіляються випадковим чином для визначення їх місця розташування за допомогою зв'язку з вузлами, що розміщуються

в межах діапазону. Для початкового налаштування необхідно вручну розташувати кілька опорних вузлів, після чого решта вузлів розподіляється випадковим чином (рис. 1).

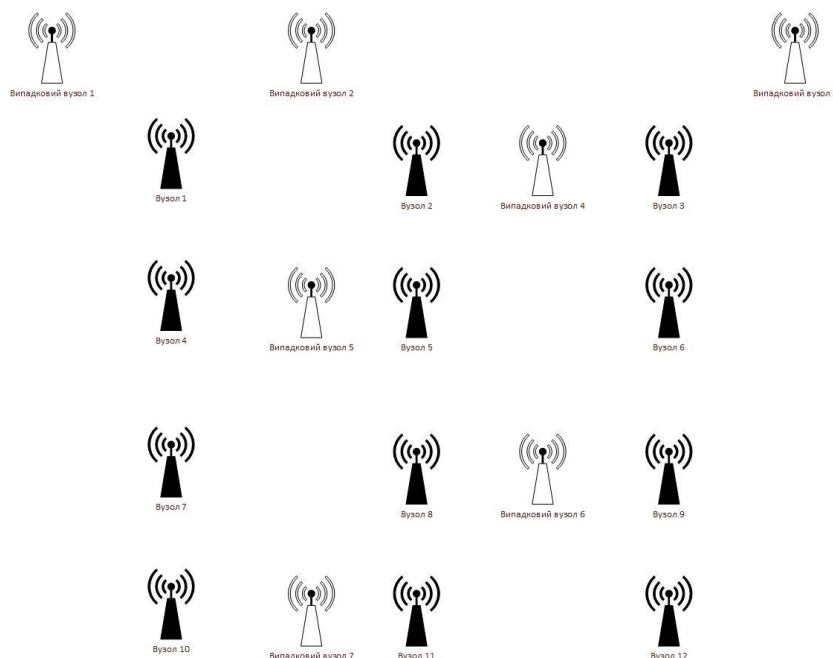


Рис. 1. Налаштування мережі. Білі вузли – це випадкові вузли, чорні вузли – опорні вузли

Вимірювання проводилися в чотирьох раундах, кожен з яких дає змогу звузити список можливих позицій невідомого вузла (рис. 2). Після цього середнє значення [16, 17] останнього списку

використовуватиметься як прогнозоване місце розташування. Коли вузол завершує цей процес, він стає опорним вузлом, щоб допомогти іншим нелокалізованим вузлам визначити свої позиції.

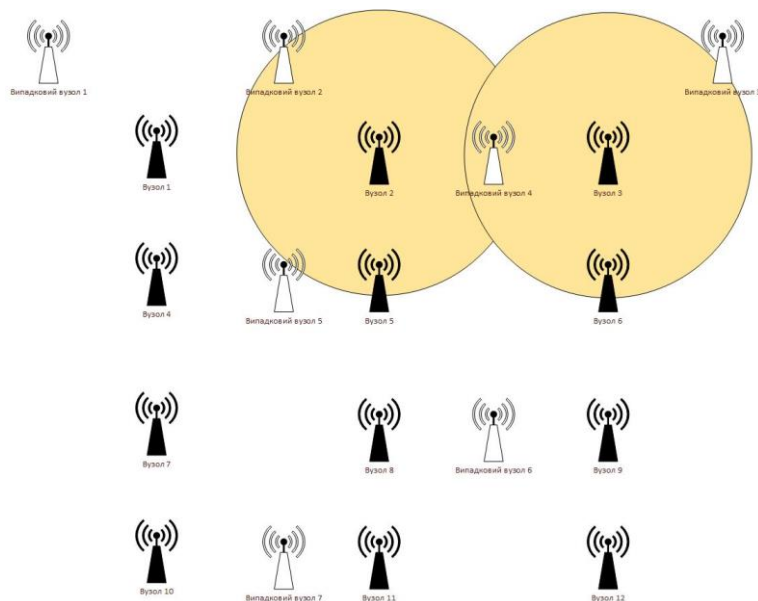


Рис. 2. Можливі розташування всередині обраного діапазону

Раунд 1

Спочатку потужність передачі була встановлена на рівні 10 дБм для всіх вузлів, що забезпечило дальність передачі та прийому сигналу до 100 м. Опорні вузли починають надсилати ширококомвні повідомлення з інформацією про своє місце розташування у вигляді координат (X, Y) [18, 19] та ідентифікатором вузла. Кожен невідомий вузол намагається отримати якомога більше повідомлень від опорних вузлів, розміщених у межах діапазону, щоб визначити всі можливі позиції через перетин сигналів з опорних вузлів. Для цього необхідно, щоб як мінімум два опорні вузли перебували в діапазоні (рис. 2). Перший раунд дає список усіх можливих позицій, а також середнє значення цих позицій, що пропонується як прогнозоване місце для цього раунду.

Раунд 2

У цьому раунді невідомі вузли налаштовують потужність передачі на 12 дБм, що дає дальність зв'язку до 130 м, і надсилають ширококомвні повідомлення опорним вузлам у межах досяжності, чекаючи на їх відповіді. Невідомі вузли надсилають повідомлення, що містять їх ID та MAC-адресу [20, 21], і всі опорні вузли, що отримують ці повідомлення, відповідають з інформацією про свої координати (X, Y) та ID. Отримавши відповіді, невідомі вузли беруть до уваги тільки ті опорні вузли, що розташовані на відстані від 100 до 130 м. Для зменшення кількості можливих розташувань, отриманих у першому раунді, використовується класичне рівняння для визначення відстані між точками [22, 23]. Розраховується відстань між кожною можливою позицією, отриманою на попередньому етапі, і всіма опорними вузлами, що відповіли в другому раунді.

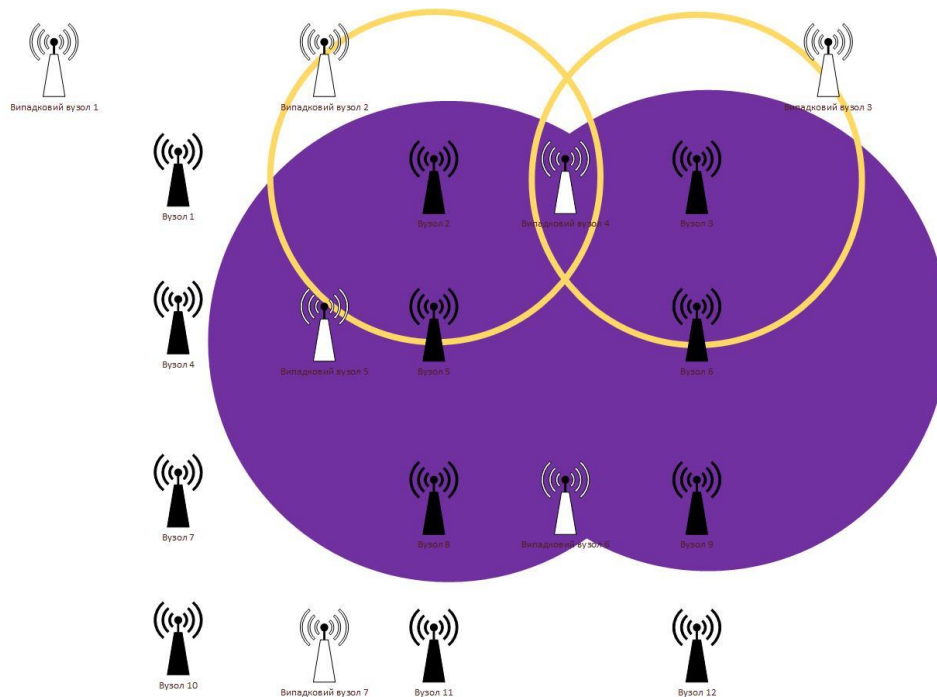


Рис. 3. Результати раунду 1 передбачають усі можливі розташування та середнє значення можливих вузлів як запропоновані місця для цього раунду

Раунд 3

Невідомі вузли налаштовують потужність передачі на 14 дБм, що дає змогу збільшити дальність до 180 м для передачі та прийому сигналу. Вони починають надсилати ширококомвні повідомлення, що містять їх ID та MAC-адресу. Усі опорні вузли, що отримують ці повідомлення, відповідають із своїми координатами (X, Y) та ID. Невідомі вузли отримують ці відповіді та використовують лише ті

опорні вузли, що розташовані на відстані від 130 до 180 м. Для зменшення кількості можливих позицій, отриманих після другого раунду, використовується рівняння для обчислення відстані між кожною потенційною позицією з другого раунду та всіма опорними вузлами, що відповіли в третьому раунді. Середнє значення цих можливих позицій буде визначено як прогнозоване місце розташування для цього етапу.

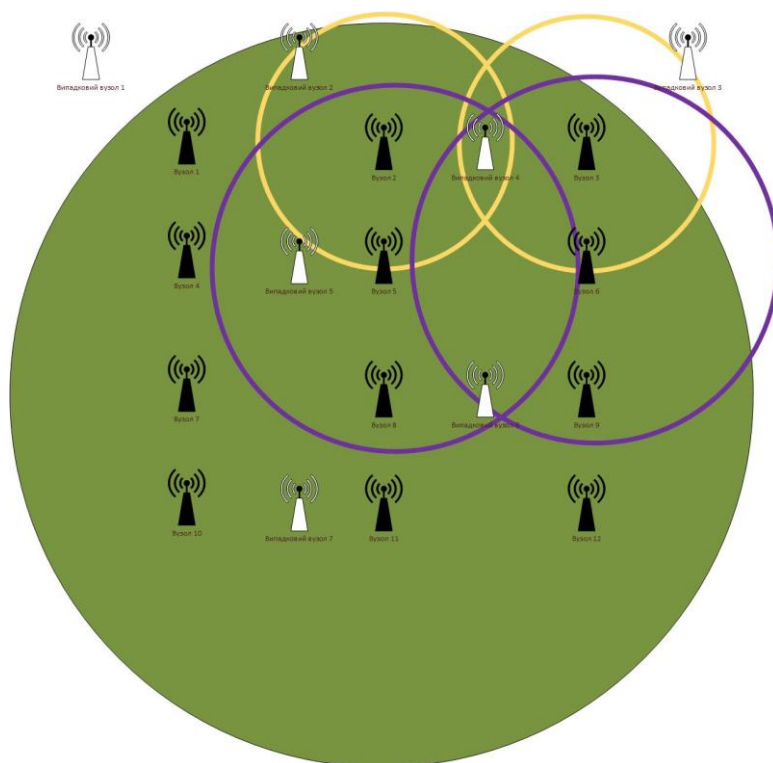


Рис. 4. Можливе розташування всередині обраних опорних вузлів діапазону перетину раунду 1, раунду 2 і раунду 3

Раунд 4

Невідомі вузли налаштовують потужність передачі на 16 дБм, що дає змогу збільшити дальність до 260 м для передачі та прийому сигналів. Вони починають надсилати широкомовні повідомлення, що містять їх ID та Mac-адресу. Всі опорні вузли, що отримують ці повідомлення, відповідають з інформацією про свої координати (X, Y) та ID. Невідомі вузли отримують відповіді та беруть до уваги лише ті опорні вузли, що розташовані на відстані від 180 до 260 м. Для зменшення кількості можливих позицій, отриманих після третього раунду, використовується рівняння [24, 25] для визначення відстані між кожною можливою позицією з цього раунду та всіма опорними вузлами, що відповіли на попередньому етапі. Середнє значення цих можливих позицій буде використовуватись для розрахунку прогнозованого місця розташування вузла.

Загальний алгоритм методу поданий на рис. 5.

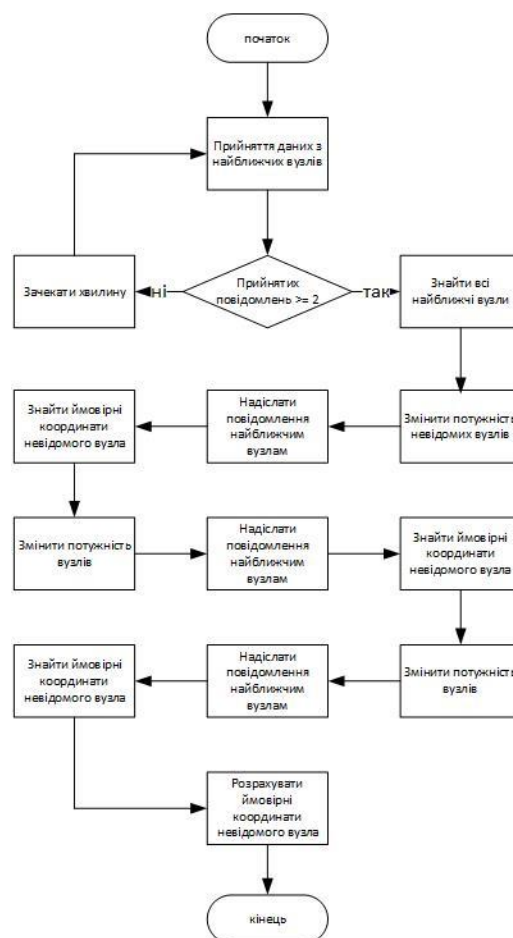


Рис. 5. Алгоритм методу

Результати

Випробування проводились у відкритому просторі, де діапазон зв'язку визначався вручну. Вузли були розміщені на ділянці площею 250×250 м, з яких дев'ять були опорними, а 11 випадковим чином розподілені (рис. 6). Результати кожного раунду наведені в табл. 1 і 2.

Із добутих результатів видно, що похибки в раундах 1 і 2 коливалися від 10 до 51 м, у раунді 3 – від 7 до 26 м, а в раунді 4 – від 0 до 22 м. Варто зауважити, що деякі вузли змогли точно визначити своє місце розташування з нульовою похибкою.

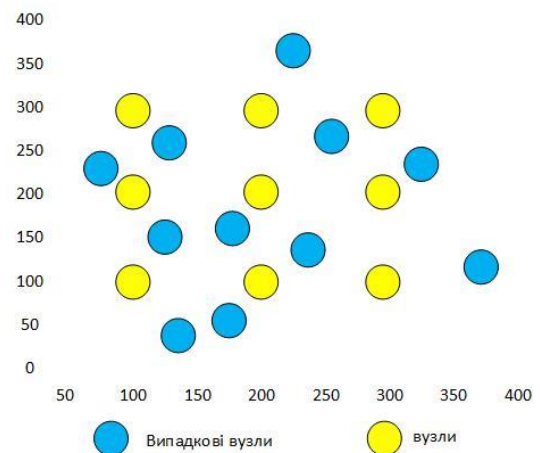


Рис. 6. Розподіл вузлів

Таблиця 1. Фактичні вузли та виміряні місця в чотирьох раундах

Тип вузла	ID вузла	Дійсний X	Дійсний Y	Раунд 1			Раунд 2			Раунд 3			Раунд 4		
				X	Y	Можлива локація	X	Y	Можлива локація	X	Y	Можлива локація	X	Y	Можлива локація
Визначений	1	100	100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Визначений	2	200	100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Визначений	3	300	100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Визначений	4	100	200	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Визначений	5	200	200	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Визначений	6	300	200	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Визначений	7	100	300	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Визначений	8	200	300	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Визначений	9	300	300	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Випадковий	10	130	140	150	150	37	*	*	*	153	153	20	130	140	1
Випадковий	11	190	150	200	150	127	200	150	9	195	155	2	190	150	1
Випадковий	12	260	140	250	150	37	*	*	*	246	153	18	246	153	18
Випадковий	13	120	270	142	257	48	120	280	10	113	266	3	113	286	3
Випадковий	14	270	270	250	250	37	*	*	*	247	247	23	270	270	1
Випадковий	15	334	147	300	150	127	*	*	*	346	152	21	340	150	15
Випадковий	16	315	239	300	250	127	298	252	30	316	233	3	*	*	*
Випадковий	17	145	62	150	100	127	*	*	*	152	53	21	150	60	15
Випадковий	18	194	74	150	100	127	182	91	7	186	88	5	186	88	5
Випадковий	19	229	347	250	300	127	*	*	*	247	346	21	250	340	15
Випадковий	20	267	238	252	257	48	280	280	10	286	266	3	286	266	3

Таблиця 2. Середня похибка в метрах у кожному раунді

	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
раунд 1	22,36	10	14,14	25,55	28,28	34,13	18,6	38,32	51,1	51,47	35,12
раунд 2	22,36	10	14,14	10	28,28	34,13	21,4	38,32	20,8	51,47	7
раунд 3	26,41	7,07	19,1	8,06	32,52	13	6,08	11,4	16,12	18,02	6,08
раунд 4	0	0	19,1	8,06	0	6,7	6,08	5,38	16,12	22,13	6,08

Висновки

Розроблений метод локалізації бездротових сенсорних мереж, оснований на поступовому збільшенні потужності передачі сигналу, продемонстрував ефективність у визначенні місця

розташування вузлів у відкритому середовищі. Проведене випробування в чотирьох раундах дало змогу значно зменшити похибки в процесі локалізації, поступово звужити можливі варіанти позицій завдяки покращенню точності на кожному етапі. Як наслідок, в останньому раунді вдалося досягти помітного

зменшення похибок, зокрема деякі вузли змогли визначити своє місце розташування з нульовою похибкою. Розміщення опорних вузлів на початковому етапі, а також коректне налаштування потужності передачі на кожному з раундів дало змогу успішно локалізувати вузли навіть у випадковому їх розподілі. Метод, що використовує зменшення кількості можливих позицій на кожному етапі, забезпечує більш точне визначення місця розташування та підвищує надійність процесу локалізації в мережах IoT.

Подальші дослідження можна присвятити оптимізації енергоспоживання методу для підвищення автономності мереж, інтеграції з іншими технологіями, такими як GPS або LoRa, для покращення точності, а також адаптації до динамічних середовищ.

Важливими напрямками є використання алгоритмів машинного навчання для автоматичної корекції помилок, тестування методу у великих масштабованих мережах і оцінювання його ефективності в реальних умовах. Дослідження стійкості до кіберзагроз і аналіз роботи в різних середовищах, наприклад у густих лісах або підземних тунелях, також сприятимуть удосконаленню запропонованого підходу.

Описана методика є ефективним підходом для покращення точності локалізації в бездротових сенсорних мережах, особливо в умовах відкритого простору, і може бути використана для впровадження в IoT-застосунки, що потребують точного визначення місця розташування вузлів.

Список літератури

1. Власова В.О., Скорик Ю.В. Моделювання бездротової сенсорної мережі для оцінки точності позиціонування методом RSSI. *Міжнародна науково-практична конференція High-Technologies in infocommunications*. 2019. С. 104–105 с. URL: <http://openarchive.nure.ua/handle/document/10848>
2. Семенюк О. М., Процах Н. П. Інструменти для моделювання та перевірки розташування нодів у бездротових сенсорних мережах. *Scientific Bulletin of UNFU*, № 34(8). 2024. С. 136–141. URL: <https://doi.org/10.36930/40340816>
3. Делембовський М., Корнійчук Б. Аналіз застосування сенсорних мереж у складних умовах. *Grail of Science*, № (39). 2024. С. 353–359. URL: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.10.05.2024.053>
4. Melnyk V., Bahniuk N., Zdolbitska N., Yakimchuk T. Methods for constructing the address space for wireless sensor networks. *Computer-integrated technologies: education, science, production*, № (43). 2021. P. 206–211. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2021-43-34>
5. Khlaponin Y., Selyukov O. Underwater radio device. Underwater radio device. *International scientific journal. Underwater technologies: industrial and civil engineering*. № (10). 2020. С. 39–49. DOI: <https://doi.org/10.32347/uwt2020.09.1501>
6. Dyachenko D., Kaida V., Levchenko A., Mikhal O., Methods of iot devices operation using machine learning, Control, Navigation and Communication Systems. *Collection of Scientific Papers*. Volume 2 № 76. 2024. С. 78–81. DOI: 10.26906/SUNZ.2024.2.078
7. Khan R., Pathan A. The state-of-the-art wireless body area sensor networks: A survey. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2018. 14 p. DOI: 10.1177/1550147718768994
8. Guerrero-Ibáñez J., Zeadally S., Contreras-Castillo J. Sensor technologies for intelligent transportation systems. *Sensors* 18(4). 2018. 1212 p. DOI: 10.3390/s18041212
9. Hilmani A., Maizate A., Hassouni L. Designing and managing a smart parking system using. *Wireless Sensor Networks. Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2018. 24 p. DOI: 10.3390/jsan7020024
10. Alkhatib A., Hnaif A., Kanan T. Proposed simple system for Road Traffic Counting. *International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control*. № 9(2). 2019. P. 269–277. DOI: 10.2174/2210327908666181107110441
11. Nguyen L. N., Vy T. D., Shin Y. An efficient hybrid RSS-AoA localization for 3D wireless. *Sensor Networks. Sensors*. № 19(9). 2019. P. 2121. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19092121>
12. Pita R., Utrilla R., Rodriguez-Zurrunero R., Araujo A. Experimental evaluation of an RSSI-Based localization algorithm on IoT End-Devices. *Sensors*. № 19(18). 2019. 3931 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19183931>
13. Tomic S., Beko M., Dinis R., Bernardo L. On target localization using combined RSS and AoA measurements. *Sensors*. № 18. 2018. 1266 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18041266>
14. Alkhatib A., Alia M., Hnaif A., Yousef S. A novel method for localising a randomly distributed wireless sensor network. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, Springer № 9(2). 2018. P. 354–361. DOI: 10.1007/s13198-017-0670-0

15. Xiaoyang L., Chao L. Wireless sensor network dynamic mathematics modeling and node localization. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2018. 141 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/1082398>
16. Cama-Pinto A., Piñeres-Espitia G., Caicedo-Ortiz J., Ramírez-Cerpa E., Betancur-Agudelo L., Gómez-Mula F. Received strength signal intensity performance analysis in wireless sensor network using Arduino platform and XBee wireless modules. *International Journal of Distributed*. 2018. P. 1–9. DOI: 10.1177/1550147717722691
17. Sandeli M., Bouanaka M. A., Kitouni I. An efficient localization approach in wireless sensor networks using chicken swarm optimization. 2021 *International Conference on Information Systems and Advanced Technologies (ICISA)*. 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICISAT54145.2021.9678446
18. Avareddy S., Biradar R. V. Comparative analysis of localization techniques and security mechanisms in WSN. 2021 *IEEE International Conference on Mobile Networks and Wireless Communications (ICMNWC)*. 2021. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICMNWC52512.2021.9688549
19. Padhy S., Dash S., Malla P. P., Routray S., Qi Y. An energy efficient node localization algorithm for wireless sensor network. *IEEE 2nd International Conference on Applied Electromagnetics, Signal Processing, & Communication (AESPC)*. 2021. P. 1–5. DOI: 10.1109/AESPC52704.2021.9708459
20. Khobragade P., Ghutke P., Kalbande V. P., Purohit N. Advancement in Internet of things (iot) based solar collector for thermal energy storage system devices: a review. *nd International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy an its Control (PARC)*. 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/PARC52418.2022.9726651
21. Lachouri A., Ardjouni A. Aeroelastic stability of combined plunge-pitch mode shapes in a linear compressor cascade. *Advances in the Theory of Nonlinear Analysis and Its Applications*. № 6 (1). 2022. P. 101–117. DOI: 10.3390/ijtp7010007
22. Panwar A., Morwal R., Kumar S. Fixed points of ρ -nonexpansive mappings using MP iterative process. *Advances in the Theory of Nonlinear Analysis and Its Applications*. № 6 (2). 2022. P. 229–245. DOI: 10.31197/atnaa.980093
23. Bhattacharya S., Pandey M. Deploying an energy efficient, secure and high-speed sidechain-based TinyML model for soil quality monitoring and management in agriculture. *Expert Systems with Applications*, Volume 242. 2024. 122735 p. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.122735
24. Shivadekar S., Kataria B., Limkar S., S. Wagh K., Lavate S., Mulla R. A. Design of an efficient multimodal engine for preemption and post-treatment recommendations for skin diseases via a deep learning-based hybrid bioinspired process. *Soft Computing*. 2023. P. 1–19. DOI: 10.1007/s00500-023-08709-5
25. Boutebba H., Lakhal H., Slimani K., Belhadi T. The nontrivial solutions for nonlinear fractional Schrödinger-Poisson system involving new fractional operator. *Advances in the Theory of Nonlinear Analysis and Its Applications*. № 7(1). 2023. P. 121–132. DOI: 10.31197/atnaa.1141136

References

1. Vlasova, V.O., Skoryk, Y.V. (2019), "Modeling of a wireless sensor network for assessing positioning accuracy using the RSSI method", *International Scientific and Practical Conference High-Technologies in infocommunications*, P. 104–105. available at: <http://openarchive.nure.ua/handle/document/10848>
2. Semenyuk, O. M., Protsakh, N. P. (2024), "Tools for modeling and checking the location of nodes in wireless sensor networks", *Scientific Bulletin of UNFU*. № 34 (8), P. 136–141. DOI: 10.36930/40340816
3. Delembovsky, M., Korniyshuk, B. (2024), "Analysis of the application of sensor networks in complex conditions". *Grail of Science*. № (39), P. 353–359. DOI: 10.36074/grail-of-science.10.05.2024.053
4. Melnyk, V., Bahniuk, N., Zdobitska, N., Yakimchuk, T. (2021), "Methods for constructing the address space for wireless sensor networks", *Computer-integrated technologies: education, science, production*. № (43), P. 206–211. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2021-43-34
5. Khlaponin, Y., Selyukov, O. (2020), "Underwater radio device". *International scientific journal Underwater technologies: industrial and civil engineering*. № (10), P. 39–49. DOI: <https://doi.org/10.32347/uwt2020.09.1501>
6. Dyachenko D., Kaida V., Levchenko A., Mikhal O. (2024), "Methods of iot devices operation using machine learning". *Control, Navigation and Communication Systems. Collection of Scientific. Papers: Volume 2 No*, P. 76. 78–81. DOI: 10.26906/SUNZ.2024.2.078
7. Khan, R., Pathan, A. (2018), "The state-of-the-art wireless body area sensor networks: A survey". *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 14 p. DOI: 10.1177/1550147718768994

8. Guerrero-Ibáñez, J., Zeadally, S., Contreras-Castillo, J. (2018), "Sensor technologies for intelligent transportation systems", *Sensors*. № 18 (4), 1212 p. DOI: 10.3390/s18041212
9. Hilmani, A., Maizate, A., Hassouni, L. (2018), "Designing and Managing a Smart Parking System Using Wireless Sensor Networks", *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 24 p. DOI: 10.3390/jsan7020024
10. Alkhatib, A., Hnaif, A., Kanan, T. (2019), "Proposed simple system for Road Traffic Counting". *International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control*. № 9(2), P. 269–277. DOI: 10.2174/2210327908666181107110441
11. Nguyen, L. N., Vy, T., D., Shin, Y. (2019), "An efficient hybrid RSS-AoA localization for 3D wireless sensor networks", *Sensors*. № 19 (9), 2121 p. DOI: 10.3390/s19092121
12. Pita, R., Utrilla, R., Rodriguez-Zurrunero, R., Araujo, A. (2019), "Experimental evaluation of an RSSI-Based localization algorithm on IoT end-devices", *Sensors*. № 19(18), 3931 p. DOI: 10.3390/s19183931
13. Tomic, S.; Beko, M.; Dinis, R.; Bernardo, L. (2018), "On target localization using combined RSS and AoA measurements", *Sensors*. №18, 1266 p. DOI: 10.3390/s18041266
14. Alkhatib, A., Alia, M., Hnaif, A., Yousef, S. (2018), "A novel method for localizing a randomly distributed wireless sensor network". *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. Springer № 9 (2), P. 354–361. DOI: 10.1007/s13198-017-0670-0
15. Xiaoyang, L. and Chao, L. (2018), "Wireless sensor network dynamic mathematical modeling and node localization", *Wireless Communications and Mobile Computing*. 141 p. DOI: 10.1155/2018/1082398
16. Cama-Pinto, A., Piñeres-Espitia, G., Caicedo-Ortiz, J., Ramírez-Cerpa, E., Betancur-Agudelo, L., Gómez-Mula, F. (2018), "Received strength signal intensity performance analysis in wireless sensor network using Arduino platform and XBee wireless modules", *International Journal of Distributed*, P. 1–9. DOI: 10.1177/1550147717722691
17. Sandeli, M., Kitouni, I. (2021), "An Efficient Localization Approach in Wireless Sensor Networks Using Chicken Swarm Optimization". *International Conference on Information Systems and Advanced Technologies (ICISA)*, P. 1–6. DOI: 10.1109/ICISAT54145.2021.9678446
18. Avareddy, S., Biradar, R. V. (2021), "Comparative Analysis of Localization Techniques and Security Mechanisms in WSN". *IEEE International Conference on Mobile Networks and Wireless Communications (ICMNWC)*, P. 1–4. DOI: 10.1109/ICMNWC52512.2021.9688549
19. Padhy, S., Dash, S., Malla, P. P., Routray, S., Qi, Y. (2021), "An energy efficient node localization algorithm for wireless sensor network", *IEEE 2nd International Conference on Applied Electromagnetics, Signal Processing, & Communication (AESPC)*, P. 1–5. DOI: 10.1109/AESPC52704.2021.9708459
20. Khobragade, P., Ghutke, P., Kalbande, V. P., Purohit, N. (2022), "Advancement in internet of things (IoT) based solar collector for thermal energy storage system devices: a review", *2nd International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)*, P. 1–5. DOI: 10.1109/PARC52418.2022.9726651
21. Lachouri, A., Ardjouni, A. (2022), "Aeroelastic stability of combined plunge-pitch mode shapes in a linear compressor cascade". *Advances in the Theory of Nonlinear Analysis and Its Applications*. № 6 (1), P. 101–117. DOI: 10.3390/ijtp7010007
22. Panwar, A., Morwal, R., Kumar, S. (2022), "Fixed points of ρ -nonexpansive mappings using MP iterative process". *Advances in the Theory of Nonlinear Analysis and Its Applications*. № 6 (2), P. 229–245. DOI: 10.31197/atnaa.980093
23. Bhattacharya, S., Pandey, M. (2024), "Deploying an energy efficient, secure and high-speed sidechain-based TinyML model for soil quality monitoring and management in agriculture". *Expert Systems with Applications*, Volume 242. 122735 p. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.122735
24. Shivadekar, S., Kataria, B., Limkar, S., S. Wagh, K., Lavate, S., Mulla, R. A. (2023), "Design of an efficient multimodal engine for preemption and post-treatment recommendations for skin diseases via a deep learning-based hybrid bioinspired process". *Soft Computing*, P. 1–19. DOI: 10.1007/s00500-023-08709-5
25. Boutebba, H., Lakhal, H., Slimani, K., Belhadi, T. (2023), "The nontrivial solutions for nonlinear fractional Schrödinger-Poisson system involving new fractional operator". *Advances in the Theory of Nonlinear Analysis and Its Applications*. № 7 (1), P. 121–132. DOI: 10.31197/atnaa.1141136

Відомості про авторів / About the Authors

Пастушенко Ганна Олександрівна – Вінницький національний технічний університет, аспірантка кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, факультет інформаційних електронних систем, Вінниця, Україна; e-mail: Anya.past16@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-1736-0981>

Pastushenko Hanna – Vinnytsia National Technical University, Graduate Student at the Department of Information Radio Electronic Technologies and Systems, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia, Ukraine.

DEVELOPMENT OF THE METHOD FOR INCREASING THE ACCURACY OF LOCALIZATION OF WIRELESS SENSOR NETWORKS

The subject of the study in the article is methods for increasing the localization accuracy in wireless sensor networks in open environments. Particular attention is paid to methods for adjusting the signal transmission power to determine the communication ranges between reference and unknown nodes, as well as methods for optimizing localization through multi-step narrowing of the search area of possible node locations. **The purpose** of the work is to develop an effective method that increases the localization accuracy of wireless sensor network nodes by adjusting the signal transmission power to gradually narrow the search area, using multi-round measurement to improve localization results, and statistical analysis to predict the location of nodes. **The following tasks** are solved in the article: 1) development of a method for adaptively adjusting the signal power; 2) development of an algorithm for multi-round narrowing the search area; 3) use of statistical methods for predicting node positions. **Methods** used in the study: adaptive signal power adjustment method; algorithm for multi-round narrowing the search area; statistical analysis for predicting the location of a node. **Results.** A method is proposed that allows to significantly increase the localization accuracy in wireless sensor networks. **As a result** of experiments, it was shown that, compared to traditional methods, the new approach reduces positioning errors by 30–40%, which is a significant achievement for networks operating in open environments. In some cases, the method allows to accurately determine the location of a node already at a late stage of measurements. This allows to reduce energy consumption, since the number of necessary measurements and checks is significantly reduced. The developed approach demonstrates its effectiveness even in cases where signals are subject to significant interference, thanks to adaptive adjustment of the signal transmission power. **Conclusions.** The use of the method increases the localization accuracy in wireless sensor networks, which is important for IoT applications. This reduces energy consumption due to the lower need for measurements. Further research may focus on adaptation to more complex conditions, such as urban environments or indoor spaces.

Keywords: localization, wireless sensor networks; signal power tuning; localization accuracy; multi-step optimization; IoT; location prediction; energy efficiency.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Пастушенко Г. О. Розроблення методу підвищення точності локалізації бездротових сенсорних мереж. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2025. № 1 (31). С. 180–189. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.1.180>

Pastushenko, H. (2025), "Development of the method for increasing the accuracy of localization of wireless sensor networks", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (31), P. 180–189. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.1.180>