

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ У ВНУТРІШНЬОМУ СЕРЕДОВИЩІ ІОТ

¹Вінницький національний технічний університет

Проведено експериментальні дослідження та аналіз різних методів локалізації для бездротових сенсорних мереж у внутрішньому середовищі Інтернету речей (IoT). Мета роботи — визначити ефективність і обмеження основних підходів до локалізації для подальшого їхнього застосування в умовах внутрішнього середовища. Досліджені методи включали мінімальну дисперсію Кейпона, алгоритм ESPRIT, підгонку зваженого підпростору, позиціонування на основі близькості та трилатерацію на основі RSSI. Основну увагу приділено аналізу ключових характеристик методів, таких як точність, енергоефективність, масштабованість, стійкість до перешкод, чутливість до параметрів середовища та діапазон передачі сигналу. Результати показали, що кожний з розглянутих методів має свої унікальні переваги та обмеження залежно від специфіки застосування залежно від специфіки застосування у внутрішньому середовищі IoT. Алгоритм ESPRIT, наприклад, забезпечив найвищу точність позиціонування та масштабованість, що свідчить про його придатність для великих і складних мереж з високою щільністю вузлів. Методи позиціонування на основі близькості виявилися найенергоефективнішими, що є вирішальним фактором для IoT-додатків із жорсткими обмеженнями енергоспоживання. Метод трилатерації на основі RSSI продемонстрував високу стійкість до перешкод і стабільність у широкому діапазоні умов, включно з варіативністю у щільності сигналів і наявністю фізичних бар'єрів у середовищі. Дослідження дозволило сформулювати рекомендації щодо вибору оптимального методу локалізації залежно від конкретних вимог до точності, енергоспоживання, стійкості мережі та характеристик робочого середовища. Отримані результати мають практичну цінність для розробників IoT-систем, оскільки сприяють оптимізації мережевої продуктивності, підвищенню надійності передачі даних та зниженню енергоспоживання. Висновки цього дослідження можуть слугувати основою для майбутніх розробок і вдосконалення алгоритмів локалізації, забезпечуючи їхнє ефективне використання в широкому спектрі IoT-застосувань, таких як інтелектуальні будівлі, промисловий моніторинг, логістика та охорона здоров'я.

Ключові слова: методи локалізації, бездротові сенсорні мережі, Інтернет речей (IoT), точність локалізації, енергоефективність, масштабованість, стійкість до перешкод, чутливість, трилатерація, ESPRIT, мінімальна дисперсія Кейпона, RSSI, позиціонування на основі близькості, підгонка зваженого підпростору.

Вступ

Локалізація є ключовим аспектом для бездротових сенсорних мереж у середовищі Інтернету речей (IoT), оскільки дозволяє ефективно відстежувати та керувати різними пристроями, що взаємодіють у реальному часі. Враховуючи значний розмір і складність таких мереж, важливо забезпечити точне, енергоефективне та масштабоване рішення для визначення місцезнаходження об'єктів. Різноманітні методи локалізації, такі як мінімальна дисперсія Кейпона, алгоритм ESPRIT, трилатерація на основі RSSI та інші, мають свої особливості в контексті точності, енергоспоживання, стійкості до перешкод і масштабованості. Проте вибір оптимального методу залежить від конкретних умов експлуатації, таких як рівень інтерференції сигналу, вимоги до точності та обмеження на енергетичні ресурси.

Проблематика локалізації бездротових сенсорних мереж в умовах внутрішнього середовища

IoT є предметом активних досліджень. У роботі М. Sandeli та ін. [1] запропоновано використання метаевристичних алгоритмів для підвищення точності локалізації, зокрема підходу Chicken Swarm Optimization, що дозволяє адаптувати методи до складних умов середовища. S. Avareddy та R. V. Biradar у [2] подали огляд методів локалізації з фокусом на питання безпеки передачі даних у сенсорних мережах. Аналіз цих методів підтверджує, що високоточні методи часто вимагають значних обчислювальних ресурсів, що обмежує їхнє використання у ресурсозалежних IoT-середовищах.

У роботі S. Padhy та ін. [3] розглянуто енергоефективні підходи до локалізації, що є критично важливими для мереж із жорсткими обмеженнями на живлення. Водночас, методи на основі RSSI, описані в дослідженні Р. Khobragade та ін. [4], демонструють високу стійкість до перешкод, але їхня точність може суттєво залежати від щільності мережі та параметрів середовища.

Аналіз літератури свідчить, що вибір методу локалізації значною мірою залежить від вимог до точності, енергоефективності, стійкості до перешкод і масштабованості мережі. Це підкреслює актуальність подальших досліджень, спрямованих на інтеграцію переваг різних підходів та оптимізацію їхнього використання.

Метою дослідження є порівняння різних методів локалізації для бездротових сенсорних мереж у внутрішньому середовищі IoT, а також оцінка їхніх переваг і недоліків залежно від конкретних параметрів мережі. У роботі подано результати тестування різних підходів до локалізації, які дозволяють вибрати найефективніші рішення для різних типів IoT-застосувань у внутрішньому середовищі.

1. Огляд методів

1.1. Метод мінімальної дисперсії Кейпона (*Capon Minimum Variance Method*)

Метод локалізації, відомий як метод мінімальної дисперсії Кейпона, застосовує просторову обробку сигналів для визначення місця розташування цільового вузла, використовуючи вимірювання потужності сигналів, отриманих від різних сенсорних вузлів. Цей підхід дає оцінку просторового спектра, застосовуючи методи обробки сигналів масиву, що підвищує точність локалізації. У середовищах Інтернету речей, де наявні багатопроменеві ефекти і завади, цей метод ефективний для досягнення високої точності, особливо в додатках, де точна локалізація є критично важливою [1], [2].

1.2. Алгоритм ESPRIT (*ESPRIT's Algorithm*)

Алгоритм ESPRIT використовується для визначення напряму прибуття (DoA) цільового вузла. Він аналізує різницю фаз сигналів, отриманих різними датчиками, що дозволяє оцінити положення цілі шляхом триангуляції DoA від кількох сенсорних вузлів. Алгоритм ESPRIT особливо ефективний для використання в закритих просторах, де фазові зсуви радіосигналів через відбиття та дифракцію можуть суттєво змінювати фазу. Цей підхід забезпечує точність і здатний зменшувати вплив багатопроменевих ефектів [3], [4].

1.3. Підгонка зваженого підпростору (*Weighted Subspace Fitting*)

Основою методів підгонки є Аналіз основних компонентів (PCA), який виконується шляхом перетворення вхідних векторів потужності сигналу в окремий підпростір. Для врахування різної сили сигналів застосовується зважування. Положення визначається на основі перетину підпросторів від кількох сенсорів. Цей метод дає гарні результати в умовах корельованих та негаусових сигналів і підходить для IoT-додатків у приміщеннях з помірними вимогами до точності [5], [6].

1.4. Позиція на основі близькості (*Proximity-Based Position*)

Метод позиціонування на основі близькості визначає місце розташування цілі, орієнтуючись на розташування сусідніх сенсорних вузлів, не потребуючи прямого вимірювання відстані. Він встановлює положення за принципом знаходження найближчого сусіда чи точки доступу. Такий підхід є простим і має низьке енергоспоживання. Методи на основі близькості ідеально підходять для IoT-додатків, де потрібні лише приблизні оцінки розташування, як-от на рівні зони або кімнати. Хоча ці методи економлять енергію, їхня точність може бути обмеженою [7], [8].

1.5. Трилатерація на основі RSSI (RSSI-based trilateration)

Метод трилатерації на основі RSSI визначає місцезнаходження цілі, залучаючи кілька сусідніх сенсорних вузлів для вимірювання індикатора потужності отриманого сигналу (RSSI). Виходячи з отриманих значень RSSI, розраховуються відстані між ціллю та цими вузлами, що дозволяє виконати триангуляцію. Завдяки простоті та невисоким енергетичним вимогам цей підхід широко використовується у внутрішніх IoT-середовищах. Проте у складних умовах з перешкодами та багатопроменевим поширенням сигналу точність може погіршуватися [9].

2. Результати

Методи локалізації аналізувалися шляхом вимірювання і порівняння параметрів точності, енергоефективності, масштабованості, стійкості до перешкод, чутливості і діапазону передачі.

Для вимірювання параметрів та проведення експериментального аналізу зібрано стенд, що імітує бездротову сенсорну мережу в умовах приміщень. Він складався з декількох автономних сенсорних вузлів, спеціально адаптованих для роботи у внутрішньому середовищі. Кожний вузол оснащено модулями для вимірювання параметрів сигналу, зокрема інтенсивності (RSSI), бездротовими передавачами, блоками живлення та мікроконтролерами для обробки даних. Експерименти проводилися у контрольованому приміщенні площею 50 м² з наявністю стандартних перешкод, таких як стіни та меблі.

Перед проведенням вимірювань здійснювалося калібрування обладнання для забезпечення максимальної точності даних. Для кожного методу локалізації здійснено не менше 50 вимірювань у різних точках приміщення, а результати усереднювалися для мінімізації впливу випадкових похибок. Середня похибка для кожного параметра розрахована як середньоквадратичне відхилення (RMSE), що дозволило визначити надійність результатів.

Точність методів оцінювалася шляхом порівняння визначеного місцезнаходження об'єктів з реальними координатами, виміряними за допомогою лазерного далекоміра з похибкою ± 1 мм, 100 % точність відповідала мінімальній похибці визначення місцезнаходження, що становила 1 мм.

Енергоефективність методів оцінювалася шляхом вимірювання середнього енергоспоживання сенсорних вузлів під час роботи за допомогою цифрового вимірювача струму та напруги. Аналіз проводився на основі оцінки споживаної потужності в міліватах та часу автономної роботи системи на стандартному джерелі живлення. 100 % енергоефективність відповідала мінімальному рівню енергоспоживання, що становило 0,1 мВт за 24 години.

Масштабованість методів оцінювалася шляхом поступового збільшення кількості сенсорних вузлів у мережі та вимірювання часу обробки даних. Випробування проводилися в конфігураціях з різною кількістю вузлів, а продуктивність визначали за середнім часом передачі даних і стабільністю з'єднання. 100 % масштабованість відповідала підтримці 100 вузлів у мережі без значного збільшення затримки.

Стійкість до перешкод методів оцінювалася шляхом тестування в умовах з різними рівнями завад, включно з фізичними перешкодами (стіни, меблі) та радіочастотні перешкоди (Wi-Fi, електронні пристрої). Показники визначали за зміною рівня сигналу (RSSI) та середньою похибкою позиціонування в умовах перешкод. 100 % стійкість до перешкод означала, що відхилення рівня сигналу не перевищувало 1 дБм.

Чутливість методів оцінювалася шляхом вимірювання мінімального рівня сигналу, за якого система ще могла коректно визначити місцезнаходження об'єкта. Для цього поступово зменшували потужність передавача та збільшували відстань між вузлами, визначаючи точність локалізації. 100 % чутливість відповідала можливості коректного визначення місцезнаходження з рівнем сигналу — 90 дБм.

Отримані значення параметрів (у відсотках, що відображають співвідношення між похибкою вимірювань та реальними координатами) подані у таблиці і на рисунку.

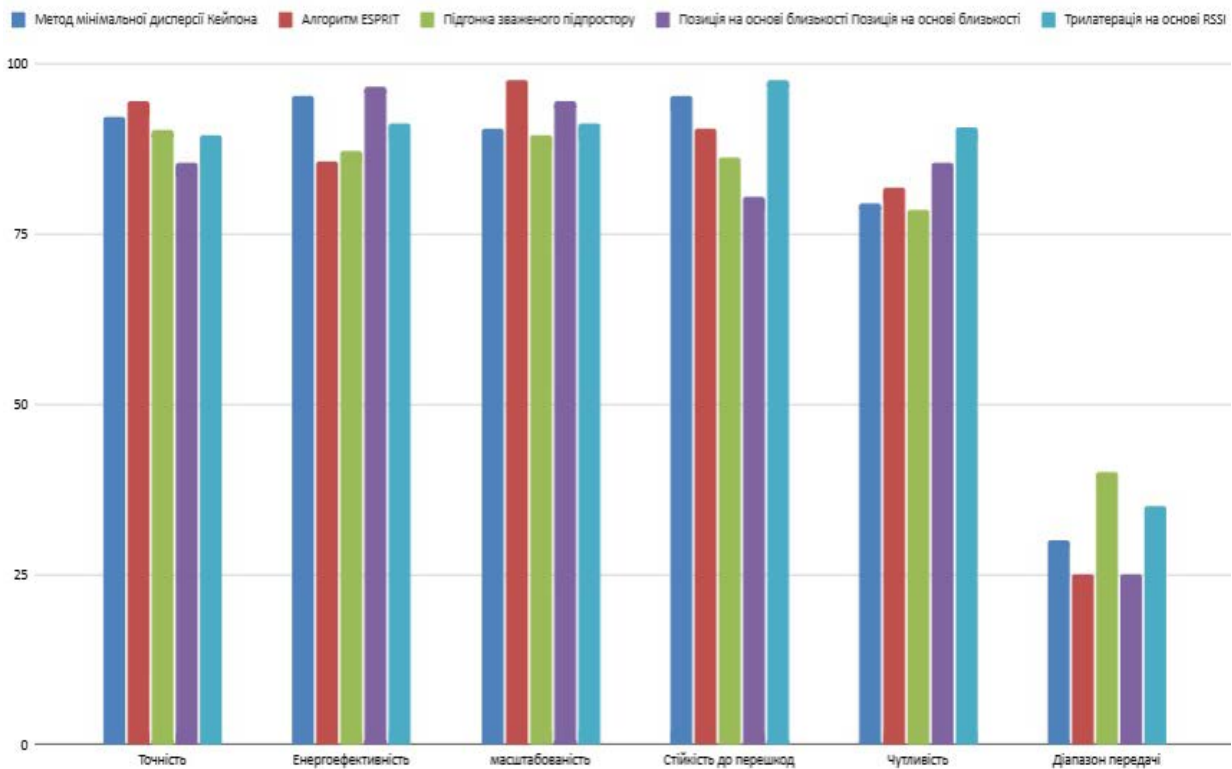
Результати тестування показали, що методи мають свої переваги та недоліки.

Метод мінімальної дисперсії Кейпона демонструє високу точність на рівні 92,12 % і відмінну енергоефективність у 95,23 %. Також він відзначився стійкістю до перешкод на рівні 95,24 %, через що він придатний для застосувань, де критично важлива точність навіть за наявності інтерференцій. Проте чутливість цього методу становить лише 79,51 %, що може обмежувати його здатність виявляти слабкі сигнали на межах діапазону, який становить 30 метрів.

Цей метод — надійний варіант для середовищ, де сигнали не дуже ослаблені.

Оцінка ефективності методів

Метод	Точність, %	Енергоефективність, %	Масштабованість, %	Стійкість до перешкод, %	Чутливість, %	Діапазон передачі, м
Capon Minimum Variance	92,12	95,23	90,37	95,24	79,51	30
ESPRIT Algorithm	94,55	85,66	97,51	90,51	81,74	25
Weighted Subspace Fitting	90,23	87,12	89,53	86,29	78,53	40
Proximity-Based Positioning	85,41	96,52	94,52	80,36	85,41	25
RSSI-based Trilateration	89,56	91,20	91,24	97,63	90,74	35



Представлення параметра оцінки ефективності

Алгоритм ESPRIT досягає найвищої точності серед усіх протестованих методів — 94,55 %. Він також показав відмінну масштабованість (97,51 %), що дає можливість ефективно працювати в мережах з великою кількістю сенсорів. Попри це, енергоефективність алгоритму є нижчою, ніж у інших методів — 85,66 %, оскільки він вимагає більше обчислювальних ресурсів. Також ESPRIT має дещо знижений рівень стійкості до перешкод (90,51 %) і чутливості (81,74 %) у порівнянні з іншими методами, що в певних умовах може вплинути на якість локалізації, особливо за значних інтерференцій та ослабленні сигналу. Діапазон передачі алгоритму складає 25 метрів, через що він придатний для компактних приміщень.

Метод підгонки зваженого підпростору показав хороші результати за всіма параметрами. Його точність становила 90,23 %, а енергоефективність — 87,12 %, що забезпечує достатній рівень енергозбереження. Масштабованість методу дещо нижча — 89,53 %, проте він демонструє надійність у разі розширення мережі. Стійкість до перешкод на рівні 86,29 % означає, що метод сприйнятливий до інтерференцій порівняно з іншими, проте цей недолік компенсується діапазоном передачі в 40 метрів, що є найвищим серед усіх протестованих методів.

Метод позиціонування на основі близькості забезпечив найбільшу енергоефективність (96,52 %) і високу масштабованість (94,52 %), що робить цей метод надзвичайно привабливим для

застосувань, де важливі економія енергії та можливість використання великої кількості сенсорів. Проте точність методу нижча і становить 85,41 %, через що він менш придатний для високоточних застосувань. Стійкість до перешкод на рівні 80,36 % обмежує застосування методу в умовах сильних інтерференцій. З діапазоном передачі 25 метрів метод на основі близькості є ефективним вибором для низькоточних задач у внутрішніх приміщеннях.

Метод триангуляція на основі RSSI має збалансовані показники за всіма параметрами. Він забезпечує добру точність (89,56 %), високий рівень енергоефективності (91,20 %) і стабільну масштабованість (91,24 %). Висока стійкість до перешкод на рівні 97,63 % є ключовою перевагою цього методу, через що він надійний для застосувань з високим рівнем інтерференції. До того ж чутливість у 90,74 % і діапазон передачі 35 метрів дозволяють використовувати цей метод для рішень з помірними вимогами до точності і стабільності.

Висновки

Результати дослідження показують, що вибір методу локалізації для бездротових сенсорних мереж IoT залежить від конкретних вимог до точності, енергоефективності, масштабованості, стійкості до перешкод і чутливості.

Алгоритм ESPRIT продемонстрував найвищу точність і масштабованість, що робить його ідеальним для великих, високоточних мереж, хоча й потребує більше енергетичних ресурсів. Метод мінімальної дисперсії Кейпона є відмінним для середовищ, де критична точність і стійкість до перешкод, хоча його чутливість може бути обмеженою. Підгонка зваженого підпростору також забезпечує хорошу точність і енергоефективність, але менш стійка до перешкод у складних умовах. Метод позиціонування на основі близькості є найенергоефективнішим і масштабується найкраще, проте його точність значно нижча, що обмежує його використання в задачах, де потрібна висока точність. Найкраща стійкість до перешкод виявлена у триангуляції на основі RSSI, що дозволяє використовувати цей метод у складних середовищах з високим рівнем інтерференцій.

Результати підтверджують, що кожний метод має свої переваги залежно від характеристик середовища і вимог до мережі. Для великих мереж з високими вимогами до точності та масштабованості найкращим вибором є алгоритм ESPRIT, для енергоефективних і великих мереж — метод позиціонування на основі близькості, а для застосувань з високими вимогами до стійкості до перешкод оптимальним є метод RSSI.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] M. Sandeli, M. A. Bouanaka, and I. Kitouni, "An Efficient Localization Approach in Wireless Sensor Networks Using Chicken Swarm Optimization," in *2021 International Conference on Information Systems and Advanced Technologies (ICISAT)*, Tebessa, Algeria, 2021, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICISAT54145.2021.9678446>.
- [2] S. Avareddy and R. V. Biradar, "Comparative Analysis of Localization Techniques and Security Mechanisms," in *WSN, 2021 IEEE International Conference on Mobile Networks and Wireless Communications (ICMNWC)*, Tumkur, Karnataka, India, 2021, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICMNWC52512.2021.9688549>.
- [3] S. Padhy, S. Dash, P. P. Malla, S. Routray, and Y. Qi, "An Energy Efficient Node Localization Algorithm for Wireless Sensor Network," in *2021 IEEE 2nd International Conference on Applied Electromagnetics, Signal Processing, & Communication (AESPC)*, Bhubaneswar, India, 2021, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/AESPC52704.2021.9708459>.
- [4] P. Khobragade, P. Ghutke, V. P. Kalbande, and N. Purohit, "Advancement in Internet of Things (IoT) Based Solar Collector for Thermal Energy Storage System Devices: A Review," in *2022 2nd International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)*, Mathura, India, 2022, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/PARC52418.2022.9726651>.
- [5] A. Lachouri, and A. Ardjouni, "Aeroelastic Stability of Combined Plunge-Pitch Mode Shapes in a Linear Compressor Cascade," *Advances in the Theory of Nonlinear Analysis and Its Applications*, vol. 2, pp. 101-117, 2022.
- [6] A. Panwar, R. Morwal, and S. Kumar, "Fixed Points of ρ -Nonexpansive Mappings Using MP Iterative Process," *Advances in the Theory of Nonlinear Analysis and Its Applications*, vol. 2, pp. 229-245, 2022.
- [7] S. Bhattacharya, and M. Pandey, "Deploying an Energy Efficient, Secure & High-Speed Sidechain-Based TinyML Model for Soil Quality Monitoring and Management in Agriculture," *Expert Systems with Applications*, vol. 242, pp. 122735, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122735>.
- [8] S. Shivadekar, B. Kataria, S. Limkar, K. S. Wagh, S. Lavate, and R. A. Mulla, "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*, pp. 1-19, 2023.
- [9] H. Boutebba, H. Lakhal, K. Slimani, and T. Belhadi, "The Nontrivial Solutions for Nonlinear Fractional Schrödinger-Poisson System Involving New Fractional Operator," *Advances in the Theory of Nonlinear Analysis and Its Applications*, vol. 2, pp. 121-132, 2023.

Рекомендована кафедрою інформаційних радіоелектронних технологій і систем ВНТУ

Пастушенко Ганна Олександрівна — аспірантка кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, e-mail: ram13b.biliy@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Н. О. Pastushenko¹

Analysis of Localization Methods for Wireless Sensor Networks in Indoor IoT Environment

¹Vinnitsia National Technical University

Experimental studies and analysis of various localization methods for wireless sensor networks in the indoor environment of the Internet of Things (IoT) have been conducted. The aim of the work was to determine the effectiveness and limitations of the main localization approaches for their further application in different environments. The investigated methods included minimum Capon variance, ESPRIT algorithm, weighted subspace fitting, proximity-based positioning, and RSSI-based trilateration. The main focus was on analyzing the key characteristics of the methods, such as accuracy, energy efficiency, scalability, interference resistance, sensitivity to environmental parameters, and signal transmission range. The results showed that each of the considered methods has its own unique advantages and limitations depending on the specifics of the application. The ESPRIT algorithm, for example, provided the highest positioning accuracy and scalability, making it suitable for large and complex networks with high node density. Proximity-based positioning methods were found to be the most energy-efficient, which is a crucial factor for IoT applications with tight power constraints. The RSSI-based trilateration method demonstrated high noise immunity and stability over a wide range of conditions, including signal density variability and the presence of physical barriers in the environment. The study enabled to formulate recommendations for choosing the optimal localization method depending on the specific requirements for accuracy, power consumption, network stability, and operating environment characteristics. The results obtained are of practical value for IoT system developers, as they contribute to optimizing network performance, increasing data transmission reliability, and reducing power consumption. The findings of this study can serve as a basis for future developments and improvements of localization algorithms, ensuring their effective use in a wide range of IoT applications, such as smart buildings, industrial monitoring, logistics, and healthcare. Keywords: localization methods, wireless sensor networks, Internet of Things, localization accuracy, energy efficiency, scalability, interference resistance, sensitivity, trilateration, ESPRIT, minimum Capon variance, RSSI, proximity-based positioning, weighted subspace fitting.

Keywords: localization methods, wireless sensor networks, Internet of Things (IoT), localization accuracy, energy efficiency, scalability, interference resistance, sensitivity, trilateration, ESPRIT, minimum Capon variance, RSSI, proximity-based positioning, weighted subspace fitting.

Pastushenko Hanna O. — Post-Graduate Student of the Chair of Information Radioelectronic Technologies and Systems, e-mail: ram13b.biliy@gmail.com