

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій**

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Сергій КРАВЧУК
«___» _____ 2024 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою програмою «Інженерія
інноваційних інформаційно-телекомунікаційних технологій та
систем»**

зі спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

**на тему: «Методи визначення координат сенсорів у мобільній сенсорній
мережі»**

Виконала:
студентка VI курсу, групи ТК-21мн
Буткевич Ганна Юріївна _____

Керівник:
Професор кафедри ТК НН ІТС, д.т.н., професор
Лисенко Олександр Іванович _____

Рецензент:
Завідувач кафедри ІТТ НН ІТС, професор, д.т.н., с.н.с.
Скулиш Марія Анатоліївна _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.
Студенка _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Освітньо-наукова програма «Інженерія інноваційних інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студентці
Буткевич Ганна Юріївна

1. Тема дисертації «Методи визначення координат сенсорів у мобільній сенсорній мережі», науковий керівник дисертації Лисенко Олександр Іванович, професор, д.т.н., затверджені наказом по університету від «28» березня 2024 р. № 1488-с.
2. Термін подання студентом дисертації 01.06.2024 р.
3. Об'єкт дослідження – мобільна безпроводна сенсорна мережа(МБСМ).
4. Предмет дослідження – розвиток методів визначення координат сенсорів у мобільній сенсорній мережі.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 1. Проаналізувати методи локалізації бездротових сенсорних мереж.
 2. Проаналізувати особливості та обмеження кожного методу локалізації бездротових сенсорних мереж у мобільній сенсорній мережі.
 3. Розробити та вдосконалити методи обробки та інтеграції даних з різних сенсорів для отримання більш точних координат сенсорів.

4. Виконати експериментальне дослідження та порівняти ефективність різних методів локалізації координат сенсорів у реальних умовах мобільної сенсорної мережі.
5. Розробити рекомендації щодо використання оптимального методу локалізації координат сенсорів у конкретних сценаріях застосування мобільної сенсорної мережі.
6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу:
 1. Тема, мета, актуальність, задачі дослідження.
 2. Аналіз методів локалізації бездротових сенсорних мереж.
 3. Розробка та вдосконалення методів та програмного забезпечення для автоматизованого визначення координат сенсорів.
 4. Опис методу локалізації стрибка вектора відстані для бездротових мобільних сенсорних мереж.
 5. Загальні висновки
7. Орієнтовний перелік публікацій
 1. **Сушин І.О., Буткевич Г.Ю.** Методика оцінки зв'язності вузлів бездротової сенсорної мережі при умові використання багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ // Фаховий журнал рівня Б. – Том 34 (73), № 6, 2024 р. URL: <https://tech.vernadskyjournals.in.ua/34-73-6>
 2. **Буткевич Г.Ю., Лисенко О.І.** Інноваційні підходи до визначення координат сенсорів у мобільній сенсорній мережі для оптимізації міської інфраструктури та ефективного використання ресурсів // Всеукраїнська науково-практична конференція "Практичні питання функціонування і відновлення об'єктів муніципальної інфраструктури та промисловості України в сучасних умовах". – с. 36-41. URL: <http://surl.li/nuity>
 3. **Буткевич Г.Ю.** Аналіз сенсорної системи контролю положення дронів під час шоу // Вісімнадцята міжнародна науково-технічна конференція "ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ". – с. 259-261, 15–19 квітня 2024 р. ISSN (print) 2663-502X, ISSN (online) 2664-3057. Доступ: <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/278918/273569>
8. Дата видачі завдання “ 9 ” жовтня 2022 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз завдання та літературних джерел	09.10.2022 - 28.11.2022	виконано
2	Аналіз методів локалізації бездротових сенсорних мереж	29.11.2022 - 16.02.2023	виконано

3	Розробка та вдосконалення методів та програмного забезпечення для автоматизованого визначення координат сенсорів	17.02.2023 - 19.06.2023	виконано
4	Дослідження використання локалізації для мобільних сенсорних мереж	20.06.2023 - 21.10.2023	виконано
5	Опис методу локалізації стрибка вектора відстані для бездротових мобільних сенсорних мереж	22.10.2023 - 22.02.2024	виконано
6	Аналіз результатів досліджень та розробка рекомендацій для практичного застосування отриманих методів	23.02.2024 - 11.05.2024	виконано

Студентка

Ганна БУТКЕВИЧ

Науковий керівник дисертації

Олександр ЛИСЕНКО

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація викладена на 95 с., містить 28 рис., 2 табл., 26 джерел.

В сучасному світі мобільні сенсорні мережі використовуються в різних сферах, включаючи навігацію, моніторинг довкілля та відстеження об'єктів. Визначення координат сенсорів у таких мережах є ключовим завданням для досягнення високої точності і надійності. В цьому вступі розглядається постановка проблеми визначення координат сенсорів у мобільних сенсорних мережах і його зв'язок з науковими та практичними викликами. Також наводиться огляд останніх досліджень у цій галузі, які вказують на потребу в подальшому дослідженні для покращення методів визначення координат у мобільних сенсорних мережах.

У даній роботі було досліджено методи визначення координат в мобільних сенсорних мережах.

Актуальність: В умовах сучасного світу, де мобільні технології займають центральне місце в різних сферах життя, включаючи навігацію, моніторинг довкілля та відстеження об'єктів, методи визначення координат у мобільних сенсорних мережах стають все більш важливими.

З точки зору навігації, точне визначення координат є критичним для забезпечення безпеки і комфорту користувачів. В інших сферах, таких як моніторинг довкілля та відстеження об'єктів, правильне визначення місцезнаходження може мати важливе значення для ефективного управління ресурсами та забезпечення сталого розвитку.

Незважаючи на існуючі методи визначення координат, багато з них мають свої обмеження та недоліки. Тому пошук нових методів, що дозволяють підвищити точність та надійність визначення координат у мобільних сенсорних мережах, є актуальним науковим завданням.

Дана дисертація пропонує аналіз різних методів визначення координат та розробку нових Методів, спрямованих на покращення точності та ефективності визначення місцезнаходження в мобільних сенсорних мережах.

Наукова новизна: полягає в тому, що запропоновано нові методи визначення координат сенсорів у мобільних сенсорних мережах, які підвищують точність і надійність визначення місцезнаходження. Проведено детальний аналіз існуючих методів локалізації бездротових сенсорних мереж, зокрема методів бездіапазонної локалізації, локалізації без гібридного діапазону та методів локалізації на основі повного діапазону, і виявлено їх обмеження та недоліки, що обґрунтовує необхідність розробки нових підходів. Проведені експериментальні дослідження підтвердили ефективність запропонованих методів у реальних умовах мобільної сенсорної мережі, а порівняння з існуючими методами показало значне покращення точності та ефективності визначення координат.

Її результати можуть бути корисними як для науковців у галузі безпроводних комунікацій та сенсорних технологій, так і для розробників програмного забезпечення та інженерів, що працюють у сферах, де мобільні сенсорні мережі використовуються для різних цілей.

Задачі дослідження:

1. Проаналізувати методи локалізації бездротових сенсорних мереж.
2. Проаналізувати особливості та обмеження кожного методу локалізації бездротових сенсорних мереж у мобільній сенсорній мережі.
3. Розробити та вдосконалити методи обробки та інтеграції даних з різних сенсорів для отримання більш точних координат сенсорів.
4. Виконати експериментальне дослідження та порівняти ефективність різних методів локалізації координат сенсорів у реальних умовах мобільної сенсорної мережі.
5. Розробити рекомендації щодо використання оптимального методу локалізації координат сенсорів у конкретних сценаріях застосування мобільної сенсорної мережі.

Мета роботи – дослідження методів визначення координат сенсорів в мобільних сенсорних мережах.

Об'єкт дослідження: мобільна безпроводна сенсорна мережа (МБСМ).

Предмет дослідження: методи визначення координат сенсорів у мобільних сенсорних мережах.

Методи дослідження: Теоретичний аналіз, моделювання та симуляція, експериментальне дослідження, статистичний аналіз, розробка програмного забезпечення.

Публікації:

Сушин І.О., Буткевич Г.Ю. Методика оцінки зв'язності вузлів бездротової сенсорної мережі при умові використання багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ // Фаховий журнал рівня Б. – Том 34 (73), № 6, 2024 р. URL: <https://tech.vernadskyjournals.in.ua/34-73-6>

Буткевич Г.Ю., Лисенко О.І. Інноваційні підходи до визначення координат сенсорів у мобільній сенсорній мережі для оптимізації міської інфраструктури та ефективного використання ресурсів // Всеукраїнська науково-практична конференція "Практичні питання функціонування і відновлення об'єктів муніципальної інфраструктури та промисловості України в сучасних умовах". – с. 36-41. URL: <http://surl.li/nuitv>

Буткевич Г.Ю. Аналіз сенсорної системи контролю положення дронів під час шоу // Вісімнадцята міжнародна науково-технічна конференція "ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ". – с. 259-261, 15–19 квітня 2024 р. ISSN (print) 2663-502X, ISSN (online) 2664-3057. Доступ: <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/278918/273569>

Ключові слова: методи визначення координат, сенсори, мобільні сенсорні мережі, мобільні пристрої, оптимізація міської інфраструктури, ефективне використання ресурсів, контроль положення дронів, зв'язність вузлів, телекомунікаційні аероплатформи, багаторівнева мережа.

ABSTRACT

The master's thesis is presented on 95 pages, contains 28 figures, 2 tables, and 26 references.

In the modern world, mobile sensor networks are used in various fields, including navigation, environmental monitoring, and object tracking. Determining the coordinates of sensors in such networks is a key task to achieve high accuracy and reliability. This introduction discusses the problem of sensor positioning in mobile sensor networks and its relation to scientific and practical challenges. It also provides an overview of recent research in this area, which indicates the need for further research to improve the methods for determining coordinates in mobile sensor networks.

In this paper, we investigated methods for determining coordinates in mobile sensor networks.

Relevance: In today's world, where mobile technologies are central to various areas of life, including navigation, environmental monitoring, and object tracking, location methods in mobile sensor networks are becoming increasingly important.

In terms of navigation, accurate positioning is critical to ensure the safety and comfort of users. In other areas, such as environmental monitoring and object tracking, correct location determination can be essential for efficient resource management and sustainable development.

Despite the existing methods for determining coordinates, many of them have their limitations and drawbacks. Therefore, the search for new methods to improve the accuracy and reliability of location determination in mobile sensor networks is an urgent scientific task.

This thesis proposes an analysis of various methods of coordinate determination and the development of new methods aimed at improving the accuracy and efficiency of location determination in mobile sensor networks.

Scientific novelty: new methods for determining the coordinates of sensors in mobile sensor networks are proposed, which increase the accuracy and reliability of location determination. A detailed analysis of existing methods of localization of

wireless sensor networks, in particular, methods of bandless localization, localization without hybrid range and localization methods based on full range, was carried out, and their limitations and shortcomings were identified, which justifies the need to develop new approaches. Experimental studies have confirmed the effectiveness of the proposed methods in real conditions of a mobile sensor network, and comparison with existing methods has shown a significant improvement in the accuracy and efficiency of coordinate determination.

Its results can be useful both for scientists in the field of wireless communications and sensor technologies, as well as for software developers and engineers working in areas where mobile sensor networks are used for various purposes.

Research objectives:

1. Analyze the methods of localization of wireless sensor networks.
2. Analyze the features and limitations of each method of localizing wireless sensor networks in a mobile sensor network.
3. Develop and improve methods for processing and integrating data from different sensors to obtain more accurate sensor coordinates.
4. To perform an experimental study and compare the effectiveness of different methods of localizing sensor coordinates in real conditions of a mobile sensor network.
5. Develop recommendations for using the optimal method of localizing the coordinates of sensors in specific scenarios of using a mobile sensor network.

Purpose - to study methods for determining the coordinates of sensors in mobile sensor networks.

Object of study: mobile wireless sensor network (MWSN).

Subject of research: methods for determining the coordinates of sensors in mobile sensor networks.

Research methods: Theoretical analysis, modeling and simulation, experimental study, statistical analysis, software development.

Publications:

Sushyn I.O., Butkevych H.Y. Methods for assessing the connectivity of wireless sensor network nodes when using a multi-level network of telecommunication aeroplatforms // Professional journal of level B. - Vol. 34 (73), No. 6, 2024 URL: <https://tech.vernadskyjournals.in.ua/34-73-6>

Innovative approaches to determining the coordinates of sensors in a mobile sensor network for optimizing urban infrastructure and efficient use of resources // All-Ukrainian Scientific and Practical Conference “Practical Issues of Functioning and Restoration of Municipal Infrastructure and Industry of Ukraine in Modern Conditions.” - pp. 36-41. URL: <http://surl.li/nuitv>.

Analysis of the sensor system for monitoring the position of drones during the show // Eighteenth International Scientific and Technical Conference “PROSPECTS OF TELECOMMUNICATIONS.” - pp. 259-261, April 15-19, 2024. ISSN (print) 2663-502X, ISSN (online) 2664-3057. Access: <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/278918/273569>.

Keywords: methods of coordinate determination, sensors, mobile sensor networks, mobile devices, optimization of urban infrastructure, efficient use of resources, drone position control, node connectivity, telecommunication aerial platforms, multi-level network.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1	16
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЛОКАЛІЗАЦІЇ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ.....	16
Вступ	16
1.1. Класифікація методів локалізації	18
1.1.1 Методи бездіапазонної локалізації	19
1.1.2. Метод локалізації без гібридного діапазону	23
1.1.3. Методи локалізації на основі повного діапазону	24
1.1.4. Гібридний підхід до локалізації на основі діапазону	28
1.2. Математичні моделі похибок визначення координат сенсорів у мсм... 31	
1.2.1 Загальне визначення елементів локалізації сенсорів	31
1.2.2. Точність визначення поверхонь і ліній положення..... 33	
1.2.3. Оцінка точності визначення місцеположення об'єкту	36
1.2.4 Приклад розрахунку зон локалізації із заданою точністю радіодальномірним способом	40
1.2.5 Приклад розрахунку зон локалізації із заданою точністю радіокутомірним способом	40
1.2.6 Приклад розрахунку зон локалізації із заданою точністю радіодальномірним та радіокутомірним способам..... 42	
1.2.7 Приклад розрахунку зон локалізації із заданою точністю радіодальномірним та радіокутомірним способам..... 44	
1.3. Порівняння ефективності	45
1.3.1 Далі обговоримо показники : точність, масштабованість і супровідні витрати. 45	
Висновки	48
РОЗДІЛ 2	49
ВИКОРИСТАННЯ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ	49
Вступ	49

	12
2.1. Протокол локалізації.....	53
2.1.1. Метод оцінки розташування	54
2.1.2. Фільтрування	56
2.2 Аналіз	59
2.2.1 Вибірка важливості.....	59
2.2.2 Межа роздільної здатності	61
2.2.3 Безпека.....	61
2.2.4. Оцінка.....	64
2.2.5. Точність.....	65
2.2.6 Швидкість вузла	67
2.2.7 Щільність вихідних вузлів	69
2.2.8 Щільність вузлів.....	69
2.2.9 Кількість зразків.....	70
2.2.10 Модель руху.....	72
2.2.11 Комунікаційні витрати	74
Висновки	75
РОЗДІЛ 3.	76
Метод локалізації стрибка вектора відстані для бездротових мобільних сенсорних мереж	76
Вступ	76
3.1 DVHLM	78
3.1.1. Проектування мережі.....	80
3.1.2 Процес локалізації.....	80
3.2. Результати	82
3.3 Обговорення.....	88
Висновок	90
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	91
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	92

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БСМ	Бездротова сенсорна мережа
МБСМ	Мобільна бездротова сенсорна мережа
ОС	Операційна система
ABC	Assumption Based Coordinates
AFL	Anchor Free Localization algorithm
IHLA	Ітеративний гібридний метод локалізації
SANLA	Selective ANchors Localization Algorithm
VT-APIT-3D	Volume Test Approximate Point-In-Triangulation test
AHLoS	Ad-Hoc Localization System
RODL	RObust Distributed Localization with Noisy Range Measurements

ВСТУП

В сучасному світі мобільні сенсорні мережі використовуються в різних сферах, включаючи навігацію, моніторинг довкілля та відстеження об'єктів. Визначення координат сенсорів у таких мережах є ключовим завданням для досягнення високої точності і надійності. В цьому вступі розглядається постановка проблеми визначення координат сенсорів у мобільних сенсорних мережах і його зв'язок з науковими та практичними викликами. Також наводиться огляд останніх досліджень у цій галузі, які вказують на потребу в подальшому дослідженні для покращення методів визначення координат у мобільних сенсорних мережах.

У даній роботі було досліджено методи визначення координат в мобільних сенсорних мережах.

Актуальність: В умовах сучасного світу, де мобільні технології займають центральне місце в різних сферах життя, включаючи навігацію, моніторинг довкілля та відстеження об'єктів, методи визначення координат у мобільних сенсорних мережах стають все більш важливими.

З точки зору навігації, точне визначення координат є критичним для забезпечення безпеки і комфорту користувачів. В інших сферах, таких як моніторинг довкілля та відстеження об'єктів, правильне визначення місцезнаходження може мати важливе значення для ефективного управління ресурсами та забезпечення сталого розвитку.

Незважаючи на існуючі методи визначення координат, багато з них мають свої обмеження та недоліки. Тому пошук нових методів, що дозволяють підвищити точність та надійність визначення координат у мобільних сенсорних мережах, є актуальним науковим завданням.

Дана дисертація пропонує аналіз різних методів визначення координат та розробку нових методів, спрямованих на покращення точності та ефективності визначення місцезнаходження в мобільних сенсорних мережах. Її результати можуть бути корисними як для науковців у галузі безпроводних

комунікацій та сенсорних технологій, так і для розробників програмного забезпечення та інженерів, що працюють у сферах, де мобільні сенсорні мережі використовуються для різних цілей.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЛОКАЛІЗАЦІЇ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Бездротові сенсорні мережі (WSN) нещодавно привернули велику увагу наукової спільноти. Невеликі та недорогі пристрої з низьким споживанням енергії та обмеженими обчислювальними ресурсами все частіше застосовуються в різних сценаріях, включаючи моніторинг навколишнього середовища, відстеження цілей і біомедичний моніторинг здоров'я.

У багатьох таких програмах локалізація вузла є одним із системних параметрів. Процес локалізації необхідний, щоб повідомляти про походження подій, маршрутизацію та допомагати груповому запиту датчиків.

Загалом схеми локалізації поділяються на дві великі категорії: на основі діапазону та без діапазону.

В роботі було наведено спрощену класифікацію, де схеми на основі діапазону та схеми без діапазону поділяються на два типи: повні схеми та гібридні схеми.

Вступ

Недавні досягнення в технології МЕМС-мікросхем і бездротового зв'язку зробили можливим використання великих мереж бездротових датчиків для різних застосувань, включаючи моніторинг процесів та контроль [1]. Бездротова мережа датчиків (WSN) складається з сотень малих, дешевих пристроїв, які називаються датчиками з обмеженими обсягом пам'яті, енергією та оброблювальною потужністю [2]. Ці датчики розгортаються для вимірювання фізичних характеристик, таких як температура, світло та забруднення.

Очікується, що WSN стане рішенням для широкого спектру застосувань, таких як моніторинг, допомога при природних катастрофах, відстеження

пацієнтів, військові цілі та автоматизовані склади. У багатьох з цих застосувань обрахунок місця розташування корисний або навіть необхідний.

Зрозуміло, що без знання положення вузла датчика зібрані дані не мають цінності.

Локалізацію датчиків можна реалізувати різними способами. Простим рішенням є оснащення кожного вузла датчика GPS-приймачем, який може точно визначати їх положення. Однак додавання GPS до всіх вузлів у бездротовій мережі не є практичним через високі витрати, підвищене споживання енергії та обмеження середовища. Крім того, GPS не працює в приміщеннях, під землею або в густому лісі.

Альтернативою GPS є самолокалізація [3], де сенсорні вузли можуть визначати своє місцезнаходження за допомогою різних протоколів виявлення локалізації. Більшість цих протоколів використовують спеціальні вузли-маяки, які знають своє розташування і передають цю інформацію не-маяковим вузлам. На основі цієї інформації не-маякові вузли можуть оцінювати своє положення, використовуючи дані від кількох сусідніх вузлів-маяків.

Майже всі існуючі схеми локалізації складаються з двох етапів:

- 1) оцінка відстані/ кута;
- 2) обчислення позиції.

В оцінці відстані/кута найпоширенішими методами вимірювання дальності, які використовуються для оцінки відстані або кута між двома вузлами датчика, є TDOA (різниця в часі прибуття), TOA (час прибуття), RSSI (індикатор потужності отриманого сигналу), AOA (кут прибуття))[4] і підрахунок стрибків.

Обчислення положення невідомого вузла здійснюється на основі доступної інформації про відстань або кут і положення опорних вузлів.

У науковій літературі існує кілька оглядів, де пропонуються різні таксономії для класифікації схем локалізації у безпроводових сенсорних мережах. Розглядаються критерії, такі як залежність вимірювань діапазону (локалізація на основі діапазону чи без нього), розподілене чи централізоване

обчислення позиції, наявність інфраструктури (локалізація на основі прив'язки чи без неї).

Відповідно до залежності методів вимірювання діапазону, Методи локалізації можна класифікувати на дві основні категорії: схеми на основі діапазону та схеми без діапазону.

У зв'язку з різноманітністю методів вимірювання діапазону, Методи локалізації можна розділити на дві основні категорії: схеми, що базуються на діапазоні, та схеми, які працюють без його використання.

1.1. Класифікація методів локалізації

Залежно від того, чи використовуються методи вимірювання дальності, існуючі схеми локалізації можна розділити на дві основні категорії: схеми на основі діапазону та схеми без нього.

Схеми на основі діапазону базуються на використанні технік вимірювання діапазону для визначення місця розташування. Схеми без діапазону ігнорують використання технік вимірювання діапазону. Таким чином, ці схеми базуються на використанні інформації топології та зв'язку, тобто на тому, "хто є в межах комунікаційного діапазону від кого". Крім того, існують схеми, які комбінують різні методи на основі інформації про зв'язок та/або технік вимірювання діапазону.

Ці схеми можна поділити на дві підкатегорії: чисті схеми та гібридні схеми. Ця класифікація ґрунтується на методах, які використовуються, і має прямий вплив на оцінку невідомого розташування вузла. Наприклад, у гібридних схемах одночасно використовуються механізми як на основі діапазону, так і без нього. За вищезгаданим визначенням, якщо в схемах використовуються методи вимірювання діапазону, вони вважаються схемами на його основі, а якщо ні, то вони вважаються схемами без його використання. Отже, гібридні схеми, що комбінують механізми як на основі діапазону, так і без нього, вважаються схемами на основі діапазону.

Такі схеми можуть використовувати або не використовувати вузли прив'язки, тобто вони також поділяються на схеми: на основі прив'язки або без неї.

Схеми без прив'язки не передбачають, що всі позиції вузлів відомі відразу. У той час як схеми на основі прив'язки вимагають тільки ті вузли, які знають свої позиції, вони називаються 'прив'язаними вузлами'.

Перспективним методом є використання мобільного вузла прив'язки замість статичних вузлів прив'язки. Мобільний прив'язний вузол усвідомлює своє положення, переміщується в зоні датчика та періодично транслює свою поточну позицію, щоб створити кілька віртуальних прив'язкових вузлів. Невідомі сенсорні вузли оцінюють своє розташування, вимірюючи географічну інформацію (наприклад, відстані або кути) до віртуальних прив'язкових вузлів.[5]



Рис.1.1 Класифікація схем локалізації сенсорних мереж

1.1.1 Методи бездіапазонної локалізації

Для визначення місцезнаходження невідомого вузла схеми базуються на інформації про топологію та зв'язки між вузлами, тобто "хто знаходиться в зоні зв'язку з ким". Залежно від способу визначення розташування невідомого вузла, схеми без ареалу можуть бути поділені на два типи: повністю без ареалу та гібридні без ареалу.

Повністю вільні від діапазону методи локалізації використовують лише один метод, заснований на зв'язності та/або інформації про топологію.

А. Підходи на основі прив'язки

Зазвичай повністю вільні схеми, засновані на прив'язних вузлах, включають центроїд, DV-стрибок, АРІТ, які описано нижче:

Метод локалізації центроїда (СА). Це базова схема, що використовує прив'язані маяки з інформацією про місцезнаходження (x_i, y_i) , щоб оцінити положення вузла. Після отримання цих маяків невідомий вузол використовує наступну формулу центроїда для обчислення свого розташування:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right) \quad (1.1)$$

Де n - кількість вузлів прив'язки $A_i (x_i, y_i)$ - їх координати, а (\hat{x}, \hat{y}) - розрахункова координата сліпого вузла. Після цього невідомий вузол стає прив'язним вузлом і транслює пакети в околиці.

Цей метод локалізації є дуже простим, економічним і легким у виконанні. Проте точність його роботи залежить від щільності опорних вузлів і їх розташування. Крім того, цей метод придатний лише для двовимірних мереж, тому пропонується новий метод локалізації центроїда (NCA) для тривимірних бездротових сенсорних мереж, що базується на теоремі центроїда координатного тетраедра.

Метод DV-Нор, який ґрунтується на векторному методі визначення відстані стрибка та оцінці розташування невідомого вузла. Цей метод складається з трьох кроків:

По-перше, він використовує класичний обмін векторами відстані. Таким чином, кожен вузол у мережі отримує мінімальну кількість стрибків до кожного вузла прив'язки.

По-друге, як тільки вузол прив'язки отримує інформацію про кількість стрибків до інших вузлів прив'язки, він обчислює середню відстань одного стрибка за допомогою певної формули, яка потім передається сусіднім вузлам.

$$HopSize_i = \frac{\sum_{j \neq i} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sum_{j \neq i} h_{ij}} \quad (1.2)$$

Де (x_i, y_i) , (x_j, y_j) - це координати точок вузлів i та j , а h_{ij} - кількість стрибків між ними.

Отримавши середній розмір стрибка, невідомий вузол обчислює відстань до вузлів за наступною формулою:

$$d_i = HopSize_i \times L_i \quad (1.3)$$

Де, L_i це значення стрибка між $I_{\text{тим}}$ вузлом прив'язки та невідомим вузлом.

По-третє, коли невідомі вузли отримують більше інформації про відстані від вузлів-маяків, вони можуть використовувати тристоронній метод для оцінки своїх координат.

Схема локалізації DV-Нор[6] відзначається простотою та легкістю реалізації і не потребує точного вимірювання відстаней. Однак вона застосовується тільки в ізотропних мережах, де властивості графа однакові у всіх напрямках. Крім того, ця схема має обмежену точність локалізації. З цієї причини були розроблені вдосконалені версії методу DV-Нор, спрямовані на покращення точності.

Метод локалізації вузла SANLA (Selective ANchors Localization Algorithm)[7], де невідомий вузол вибирає три прив'язки з найкращою точністю для локалізації серед усіх отриманих прив'язок. Кожному прив'язному вузлу призначається вага, яка обчислюється як добуток ваги розміру переходу та ваги позиції.

Метод наближеної точки в триангуляції (АПТ), базується на ідеї поділу всієї мережі на трикутні області, що складаються з вершин, утворених усіма можливими наборами з'єднувальних трьох сусідніх опорних вузлів. Невідомий вузол використовує перевірку, щоб визначити, чи знаходиться він усередині чи ззовні утвореного трикутника. Ця перевірка проводиться для всіх з'єднувальних трьох вузлів-прив'язок, які бачить невідомий вузол, і розташування оцінюється як центр ваги області перекриття трикутників.

АРІТ відомий своєю низькою вимогою до апаратних ресурсів і невеликим впливом факторів навколишнього середовища. Однак точність локалізації в методі АРІТ може залежати від наявності вузла, незалежно від того, чи знаходиться він у трикутних областях чи ні. Було запропоновано схему покращення, яка зменшує ймовірність помилок входу-виходу та помилок виходу-входу порівняно з традиційною схемою АРІТ. Крім того, з огляду на те, що практичне середовище завжди є тривимірним, точність локалізації в методі АРІТ може страждати. Було запропоновано покращену схему АРІТ-3D, яка базується на тривимірному методі VT-АРІТ-3D (Volume Test Approximate Point-In-Triangulation test) [8], який враховує об'ємність простору для підвищення точності.

Метод АРІТ має свої обмеження, зокрема, він потребує більшої кількості вузлів прив'язки, ніж середня кількість вузлів, які використовуються для локалізації. Також важливо відзначити, що АРІТ не враховує кореляцію між абсолютною відстанню та потужністю радіосигналу. Отже, його можна розглядати як метод без повного діапазону.

Схема SeRLoc, є ще одним прикладом зональної локалізації без використання діапазону. Припускається, що опорні вузли мають спрямовані секторні антени, тоді як інші вузли мають всенаправлені антени. У цій схемі сенсор визначає розташування вузла як центр ваги області перекриття, отриманої від опорних вузлів. Ця схема відзначається своєю безпечною конструкцією, яка дозволяє їй ефективно впоратися з різними типами атак, включаючи атаки Sybil і червоточини.

Схема, ADAL, представляє собою ще один Метод локалізації без використання діапазону, відомий як метод азимутально визначеної зони локалізації (ADAL), який використовує мобільний вузол прив'язки(маяк) замість статичних вузлів прив'язки. У цій схемі мобільний радіомаяк з поворотною спрямованою антеною періодично передає повідомлення за визначеним азимутом, а невідомий вузол використовує центроїд області перетину кількох повідомлень радіомаяка як свою позицію. Однак

знаходження найкоротшої траєкторії для кожного мобільного маяка ускладнюється.

В. Підходи без прив'язки

Запропонований централізований метод без використання діапазону, відомий як MDS-MAP. Цей метод базується на багатовимірному масштабуванні (MDS) і оцінює положення невідомого вузла на основі інформації про вузли в діапазоні зв'язку.

Схема MDS-MAP здатна формувати карти, які показують відносні позиції датчиків, коли вузли не мають прив'язок. Коли відомі положення достатньої кількості вузлів прив'язки (3 вузли прив'язки для 2D локалізації та 4 прив'язки для 3D), оцінюються абсолютні координати всіх вузлів на карті. MDS-MAP надає найточнішу інформацію про місцезнаходження серед методів без діапазону.

Однак він має наступні недоліки: висока складність у часі, потребує великої пропускну здатності та обчислювальних ресурсів для оцінки розташування при наявності великої кількості датчиків.

Так, було запропоновано вдосконалений метод (IMDS-MAP), де розподілений метод позиціонування реалізовано шляхом кластеризації.

1.1.2. Метод локалізації без гібридного діапазону

Цей тип методів поєднує різні методи на основі топології та/або зв'язку для оцінки розташування.

А. Підходи на основі прив'язки

Ітеративний гібридний метод локалізації (IHLA), який поєднує в собі схему центроїда та схему DV-Нор. У цьому методі кожен невідомий вузол спочатку обчислює свої початкові координати за допомогою схеми центроїда, а потім знову оцінює відстані між кожним невідомим вузлом та вузлами-маяками за допомогою схеми DV-Нор. Наступним кроком є застосування методу розширення рядів Тейлора (TSE) для оцінки координат кожного невідомого вузла.

Запропонований метод демонструє кращу точність локалізації порівняно зі схемою центроїда та схемою DV-Нор. Проте цей гібридний підхід є складнішим і вимагає більше обчислювального часу.

1.1.3. Методи локалізації на основі повного діапазону

Цей тип методів використовує методи вимірювання дальності для визначення точного розташування вузлів у мережі. Серед них можна виділити кілька основних підходів:

А. Підходи на основі прив'язки

Зазвичай методи на основі повного діапазону, які використовують прив'язані вузли, включають такі методи, як трилатерація, мультлатерація тощо.

В методах локалізації на основі прив'язки, які базуються на вимірюванні дальності, існують різні підходи, головними з яких є використання індикатора потужності отриманого сигналу (RSSI), кута прибуття та часу до прибуття.

Зокрема, методи, які базуються на RSSI, оцінюють відстані між сенсорними вузлами шляхом вимірювання потужності отриманого сигналу. Цей метод ґрунтується на тому, що потужність сигналу зменшується зі збільшенням відстані між вузлами, використовуючи модель поширення радіохвиль. Виміри RSSI можуть перетворюватися на відстані за допомогою емпіричних або теоретичних моделей.

RSSI є широко використовуваним та економічним методом, оскільки не вимагає додаткового обладнання. Проте він стає менш ефективним у внутрішніх середовищах через вплив шуму та перешкод. Було запропоновано систему локалізації в приміщенні, використовуючи RSSI бездротової сенсорної мережі (ILOR) на основі стандарту Zigbee, щоб зменшити обсяг зібраних даних та продовжити термін служби сенсорних мереж.

Методи, які базуються на вимірюванні кута прибуття (AOA) або напрямку прибуття (DOA).

Були представлені методи DV-Radial і DV-Bearing, які використовують пеленги кожного вузла до сусідніх вузлів відносно власної осі. У цих схемах вузли передають свої пеленги щодо вузлів-маяків, щоб оцінити орієнтацію. Окремо, було запропоновано локалізацію за кутом прибуття з використанням антенних решіток для бездротових сенсорних мереж (ALAR), де вимірювання АОО контролюються різницею фаз у приході хвильового фронту.

Хоча ці підходи мають високу точність, вони обмежені спрямованістю антени, можливим затіненням та багатопроменевими відображеннями. Щодо методів на основі вимірювання часу прибуття (TOA), то вони використовують час поширення сигналу для визначення відстані між передавачем і приймачем. Однак для їх застосування потрібна синхронізація передавача і приймача, що може бути витратним і складним для бездротових сенсорних мереж. Щоб уникнути цих обмежень, був запропонований метод локалізації вузла з підтримкою мобільності на основі вимірювань TOA (MABT) без синхронізації часу в WSN.

Крім того, метод вимірювання часу прибуття (TOA) є особливо корисним у водному середовищі та під землею, оскільки демонструє низьку швидкість розповсюдження. Наприклад, пропонують локалізацію сенсорів на основі TOA в підводних бездротових сенсорних мережах (TLUW), що знаходить застосування у відстеженні підводних цілей, сейсмічному моніторингу, контролі обладнання та виявленні витоків.

Методи, які базуються на вимірюваннях різниці в часі надходження (TDOA), використовуються для визначення місцезнаходження вузлів у бездротових ad-hoc мережах датчиків. Ці методи дозволяють визначати положення вузла шляхом вимірювання різниці в часі прийняття сигналу від кількох датчиків або вузлів у мережі. Коли сигнал від відомого джерела надходить до різних приймачів у різний час, можна використовувати цю різницю в часі для визначення відстані між вузлами та, відповідно, їхнього місцезнаходження.

Такі методи можуть використовувати різні методики для вимірювання різниці в часі прийняття сигналу, такі як момент часу прийняття першого сигналу, час прийняття останнього сигналу або час прийняття кількох послідовних сигналів. Ці методи можуть бути реалізовані за допомогою різних технологій, таких як ультразвукові, радіочастотні або інфрачервоні системи передачі даних. Усі ці техніки дозволяють вимірювати різницю в часі з точністю, що дозволяє ефективно визначати місцезнаходження вузлів у бездротових мережах датчиків.

Зазвичай, існують два способи отримання TDOA в бездротових сенсорних мережах: перший застосовується до вимірювання TOA від невідомого вузла до двох різних опорних вузлів і обчислення різниці в часі. Це призводить до створення гіперболічних кривих, які вказують на розташування невідомого вузла відносно двох маяків. Другий метод, використовує дослідження самолокалізації на основі TDOA в бездротовій сенсорній мережі (RTSA), де середнє значення різниці в часі визначається за допомогою ковзного середнього для зменшення похибки вимірювання.

Незважаючи на переваги цих методів, синхронізація часу між вузлами прив'язки та невідомими вузлами залишається потрібною.

У другому випадку доступні два середовища передачі з дуже різною швидкістю розповсюдження, наприклад, ультразвукові/акустичні та радіосигнали. Так представили новий підхід до визначення місця розташування, який називають AHLoS (Ad-Hoc Localization System) для бездротової сенсорної мережі.

Щоб оцінити відстань між відправником і одержувачем, враховуючи різницю у швидкості поширення сигналів та час затримки, одержувач використовує просту формулу для обчислення відстані між ними, як показано нижче:

$$d = s_{\text{sound}} \times (t_{\text{sound}} - t_{\text{radio}}) \quad (1.4)$$

Де S_{sound} , це швидкість звукових хвиль і t_{radio} , t_{sound} час проходження звукового та радіосигналу відповідно.

Основним недоліком цього методу є потреба в додатковому обладнанні для передачі та прийому другого сигналу (акустичного/ультразвукового). Це призводить до збільшення вартості і споживання енергії системи. Крім того, ультразвуковий сигнал може бути блокований перешкодами, що може обмежити його ефективність.

А. Підходи без прив'язки

Методи локалізації без використання прив'язаних вузлів виявляються досить поширеними в бездротових сенсорних мережах. Серед таких методів можна виділити, наприклад:

- Метод ABC (Assumption Based Coordinates), який базується на вимірюваннях RSSI для визначення відстаней між вузлами. Він вибирає чотири вузли датчика діапазону та призначає їм координати, а потім обчислює координати інших вузлів поступово, використовуючи відстані від цих чотирьох вузлів.

- Метод RObust Distributed Localization with Noisy Range Measurements (RODL), використовує вимірювання різниці в часі прибуття (TDOA), щоб визначити місцезнаходження вузлів у мережі. У цьому методі кожен вузол стає центром кластера та обчислює відносне розташування своїх сусідів, після чого застосовується техніка зшивання кластерів для отримання призначення координат для всіх вузлів у мережі.

Обидва ці підходи мають свої переваги та обмеження.

Наприклад, метод ABC досить простий у реалізації, але його точність знижується на великих відстанях, а також він чутливий до помилок вимірювань. У свою чергу, RODL може успішно локалізувати вузли у мережі навіть при наявності шумних вимірювань, але його ефективність може бути обмежена при високому рівні шуму або слабкому зв'язку між вузлами.

1.1.4. Гібридний підхід до локалізації на основі діапазону

Схеми, які базуються на гібридному вимірюванні діапазону, поєднують різні методи для оцінки відстані або кута. Ця комбінація може включати в себе поєднання методів вимірювання дальності або вимірювання діапазону з методами підключення.

А. Підходи на основі прив'язки

Було запропоновано розподілений метод позиціонування на основі часу прибуття (ТОО) з підтримкою напрямку прибуття (АОА) у мобільних бездротових сенсорних мережах (АТРА). Ця схема включає оцінку розташування у трьох етапах. На першому етапі, оскільки рух невідомого вузла призводить до змін у часах прибуття до опорних вузлів, допоміжна інформація АОА використовується для коригування вимірювань ТОО, що допомагає в оцінці розташування. На другому етапі використовується геометричне позиціонування з фільтрацією частинок для обчислення розташування невідомого вузла з використанням рівнянь стану. На третьому етапі для вирішення задачі налаштування локалізації використовується адаптивне нечітке керування. Схема АТРА забезпечує адаптивну гнучкість та надійне покращення обчислень при помірному шумі вимірювань.

Було представлено покращений гібридний Метод локалізації на основі напрямку прибуття (АОА) та різниці в часі прибуття (ТДОО) з використанням геометричних методів (ЕАТЛ). Ця схема комбінує методи пеленгу (АОА) та вимірювання різниці в часі прибуття (ТДОО). Початково кожен вузол-маяк вимірює цільовий пеленг (АОА), який включає справжній пеленг та помилку. Крім того, кожен опорний вузол вимірює час прибуття сигналу, що також включає справжній час та помилку.

Далі формулюється функція обмеження, яка використовується у процесі оптимізації з обмеженнями, щоб оцінити максимальну вірогідність помилок вимірювань, щоб кінцеве рішення відповідало заданим обмеженням, які фіксують базову геометрію. Таким чином, шляхом віднімання помилок від вимірювань отримуємо значення пеленгу та різницю відстаней, які

дозволяють узгодити оцінку розташування. Запропонований метод є більш стійким до процедур ініціалізації, ніж традиційні методи оцінки максимальної правдоподібності.

Метод Об'єднання вимірювань RSSI та TDOA в бездротовій мережі датчиків для надійної та точної локалізації в приміщенні (FRTL), який комбінує вимірювання RSSI та TDOA.

Цей метод використовує TDOA як основний метод вимірювання відстані для локалізації. Він паралельно збирає та тренує дані RSSI з відповідними відомими відстанями. У випадку наявності акустичного шуму, коли зв'язок TDOA недоступний, Метод також може використовувати навчені відстані замість усіх відсутніх вимірювань TDOA.

Продуктивність запропонованої схеми FRTL значно краща з точки зору визначення відстані та локалізації, порівняно з методами, які базуються виключно на вимірюваннях TDOA або RSSI.

Гібридний Метод локалізації TOA/RSSI (HTRL), який використовує вимірювання TOA та RSSI для визначення місцезнаходження в бездротових мережах.

Цей метод використовує лише три вимірювання діапазону TOA і не вимагає знання умов прямої видимості (LOS) або не прямої видимості (NLOS). Він базується на геометричних відносинах між вузлами маяками та колами діапазону TOA. Крім того, використовується RSSI та передбачувана модель втрат на шляху, яка добре наближає умови поширення, щоб відрізнити вимірювання діапазону LOS або NLOS. Вагові коефіцієнти використовуються для визначення достовірності вимірювань діапазону TOA, а їх значення визначається відношенням між RSSI і відстанню. Запропонований Метод показує кращі результати порівняно з іншими Методами, особливо в умовах важких NLOS, що підвищує ефективність локалізації.

Метод локалізації на основі зваженого центроїда (WCA). Ця схема використовує метрику RSSI і застосовує її у схемі центроїда. Спочатку опорні вузли передають пакети інформації своїм сусідам, які містять ідентифікатори,

місцезнаходження та потужності передачі. Потім невідомий вузол отримує пакети від різних опорних вузлів і вибирає принаймні три опорні вузли з більшими значеннями RSSI (тобто тими, які розташовані ближче). Далі невідомий вузол обчислює ваги кожного опорного вузла на основі отриманих вимірювань RSSI і використовує їх для визначення свого положення.

У запропонованій схемі використовуються вагові коефіцієнти, щоб привернути обчислене місцезнаходження до опорних вузлів. Це здійснюється в умовах, коли доступні лише грубі відстані, що покращує продуктивність методу центроїда без необхідності у додатковому обладнанні та при мінімальному споживанні енергії.

Схема локалізації зваженого центроїда (TMWC) з підтримкою трьох мобільних маяків, які зберігають спеціальну формацію під час проходження зони розгортання мережі та періодично транслюють свої позиції. Невідомі вузли оцінюють відстані до цих маяків за допомогою вимірювань RSSI та використовують схему локалізації центроїда для обчислення свого положення.

Метод локалізації DV-hop (RDV-Hop) на основі RSSI, який використовує RSSI та DV-hop для спільної реалізації локалізації.

По-перше, кожен вузол прив'язки оцінює середній розмір для одного стрибка. Потім вузли прив'язки транслюють пакети RSSI в мережу, і невідомий вузол, який знаходиться на відстані одного переходу від прив'язок, використовує метод RSSI для обчислення відстані між собою та сусідніми прив'язками. З іншого боку, той самий невідомий вузол використовує середній розмір для одного стрибка, який був відомий раніше, щоб обчислити відстань між собою та іншими прив'язними вузлами. Як тільки невідомий вузол отримує відстані від вузлів прив'язки, він може знайти своє місцезнаходження методом тріангуляції.

Цей метод покращує точність локалізації порівняно з Методом DV-hop, але його обмеження полягає в тому, що лише сусіди маяка можуть отримати відстані RSSI.

В. Підходи без прив'язки

Серед гібридних методів локалізації, які не потребують опорних вузлів, можна виділити такі:

Метод, відомий як Самоорганізована локалізація бездротових датчиків без використання GPS (SSFL), комбінує вимірювання різниці в часі прибуття (TDOA) та кута прибуття (AOA), щоб оцінити діапазони та кути між вузлами датчиків. Кожен датчик спочатку використовує локальні оцінки для побудови мережевої системи координат, яка потім коригується відносно базової системи координат. Після цього встановлюється глобальна система координат для позиціонування.

Паралельний метод, відомий як Anchor Free Localization algorithm (AFL)[9], дозволяє всім вузлам обчислювати та уточнювати свої координати одночасно. AFL починається з початкового призначення координат на основі зв'язку між вузлами та одночасно супроводжується оптимізацією пружини маси для виправлення помилок локалізації, заснованої на точній відстані між вузлами, вимірюваної за допомогою TDOA. AFL працює ефективно навіть для мереж з невеликим зв'язком і має невелике поширення помилок. Однак, якщо вимірювання спотворені шумом, Метод може призвести до неправильних переміщень вузлів.

1.2. Математичні моделі похибок визначення координат сенсорів у МСМ

Місцеположення об'єктів визначається за допомогою ліній положення, отриманих з даних радіонавігаційних систем.

1.2.1 Загальне визначення елементів локалізації сенсорів

Основні методи визначення місцеположення об'єкта на площині включають: кутомірний метод (місцеположення визначається перетином двох прямих), далекомірний метод (місцеположення визначається перетином двох кіл), різницево-далекомірний метод (місцеположення визначається перетином

двох гіпербол) та кутомірно-далекомірний метод (місцеположення визначається перетином прямої з колом). [23]

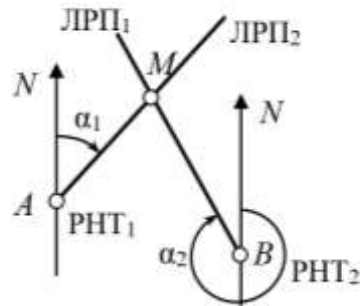


Рис. 1.2 кутомірний метод

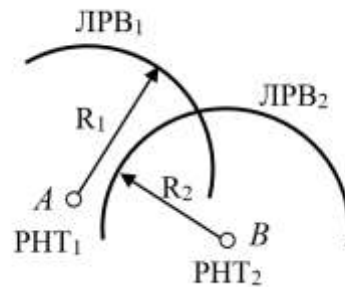


Рис. 1.3 далекомірний метод

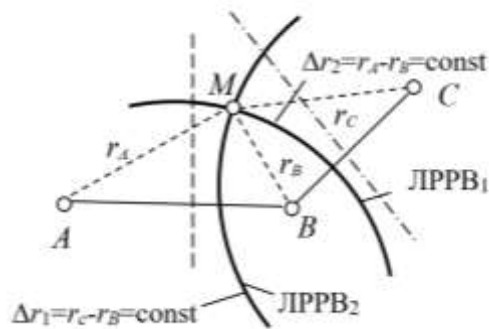


Рис. 1.4 різницево-далекомірний

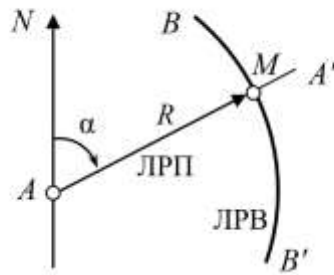


Рис. 1.5 кутомірно-далекомірний

1.2.2. Точність визначення поверхонь і ліній положення

Множина точок у просторі, де скалярна величина має однакове значення, формує еквіпотенційну поверхню рівня скалярного поля. Оскільки у робочих зонах навігаційних систем вимірювані параметри є безперервними функціями координат і мають безперервні перші похідні, зміни в полі навігаційного параметра можуть бути описані його градієнтом. Градієнт являє собою векторну величину, що вказує напрямок найшвидшого зростання скалярної функції, при цьому його модуль визначає швидкість зміни цієї функції. Якщо позначити нормаль до поверхні положення через n , спрямовану в напрямку зростання (рис. 1.6), то градієнт навігаційного параметра [23]

$$\text{grad } a = \bar{g} = \frac{\partial a}{\partial n} \bar{n} \quad (1.5)$$

де чисельне значення (модуль) градієнта виражається похідною $\frac{\partial a}{\partial n} = |\text{grad } a|$

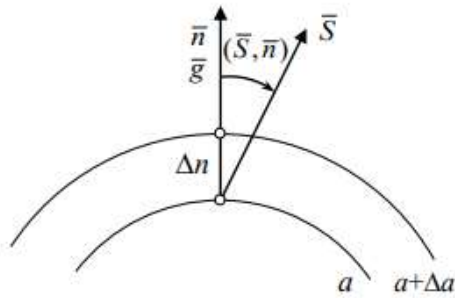


Рис. 1.6 Градієнт лінії положення

Застосовуючи градієнт, можна знайти значення похідної параметра a в будь-якому напрямку. Якщо відомий градієнт і кут між нормаллю \bar{n} до поверхні положення і напрямом \bar{S} , то похідну в цьому напрямку можна виразити наступним чином:

$$\frac{\partial a}{\partial s} = |\text{grad } a| \cos(\bar{s}, \bar{n}) \cdot \quad (1.6)$$

Поняття градієнта зручно використовувати при аналізі характеристик точності і радіонавігаційних систем (РНС), оскільки воно дозволяє пов'язати похибку вимірюваного параметра Δa з похибкою визначення поверхонь і ліній положення Δn . Переходячи до кінцевих приростів Δa і $\Phi \Delta n$, можна визначити зміщення поверхонь і ліній положення.

$$\Delta n = \frac{\Delta a}{|\text{grad } a|} \quad (1.7)$$

Таким чином, для зменшення похибки визначення поверхонь і ліній положення, а також місцеположення, необхідно прагнути до збільшення градієнта поля навігаційного параметра та підвищення точності його вимірювання. Градієнти можуть бути визначені, якщо відомі рівняння ліній і поверхонь положення, тобто функціональна залежність навігаційного параметра в обраній системі координат.

Наприклад, якщо функція для a_j задана аналітично в прямокутній m -мірній системі координат $a = a(x_1, \dots, x_m)$ то модуль градієнта

$$|grad a| = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial a}{\partial x_j}\right)^2} \quad (1.8)$$

Для плоских поверхонь при $a = a(x, y)$

$$|grad a| = \sqrt{\left(\frac{da}{dx}\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial y}\right)^2} \quad (1.9)$$

При далекомірних методах вимірюється відстань до РНТ $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

Модуль градієнта $|grad r| = 1$, а похибка вимірювання відстані Δr призведе до зміщення лінії положення (лінії рівних відстаней) на величину $\Delta n = \Delta r$ або на відповідне середньоквадратичне відхилення $\sigma_n = \sigma$ (рис. 1.7).

Для кутомірних методів вимірювана величина $\alpha = \arctg$, модуль градієнта $|grad a| = 1/r$, а похибка вимірювання кута $\Delta \alpha$ спричинить зміщення лінії положення на величину $\Delta n = \Delta \alpha r$

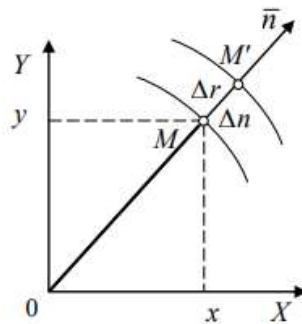


Рис. 1.7 Похибка виміру відстані у далекомірних методах

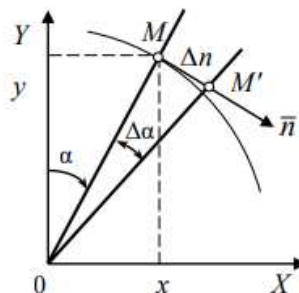


Рис. 1.8 Похибка виміру відстані у кутомірних методах

У радіанах середньоквадратичне відхилення лінії положення (ЛП) в градусному вимірі може бути виражене як $\sigma_n = 0,017\sigma_a r$, де σ_a є середньоквадратичною похибкою вимірювання пеленгу.[23]

1.2.3. Оцінка точності визначення місцеположення об'єкту

Розглянемо випадок, коли місцеположення об'єкта визначається за допомогою двох радіонавігаційних систем (РНС), які вимірюють лінії положення ЛП1 і ЛП2 (рис. 1.9) [23]

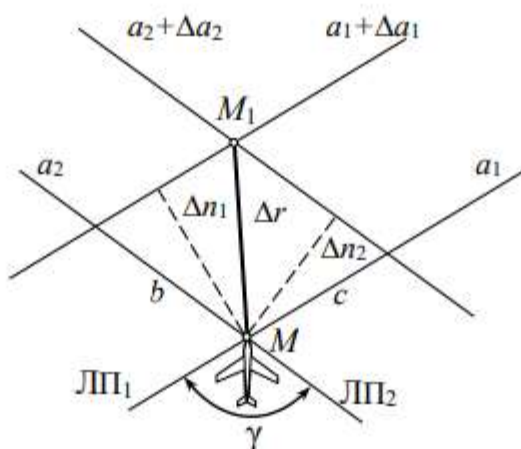


Рис. 1.9 Визначення положення за двома лініями положення

Через похибки вимірювань навігаційних параметрів Δa_1 і Δa_2 лінії положення визначаються з похибками Δn_1 і Δn_2 . Тоді розташуванню об'єкта за результатами вимірювання буде відповідати точка M_1 , яка визначається з відхиленням (похибкою) Δr відносно точки M фактичного місцеположення. Оскільки в загальному випадку лінії положення можуть перетинатися під довільним кутом γ , то з розгляду паралелограма похибок.

$$\Delta r^2 = c^2 + b^2 + bc \cos \gamma \quad (1.10)$$

$$\text{Де } b = \frac{\Delta n_1}{\sin \gamma} \quad ; \quad c = \frac{\Delta n_2}{\sin \gamma}$$

можна записати

$$\Delta r^2 = \frac{1}{\sin^2 \gamma} (\Delta n_1^2 + \Delta n_2^2 + \Delta n_1 \Delta n_2 \cos \gamma) \quad (1.11)$$

Таким чином, при детермінованому способі завдання похибок положення точність визначення місцеположення об'єкта залежить від точності визначення ліній положення (ЛП) і особливостей "геометрії" системи, тобто кута γ , розміру бази системи, відстані від центру бази до об'єкта і напрямку на нього відносно перпендикуляра до центру бази.

Для забезпечення високої точності визначення місця об'єкта за допомогою конкретних РНС і отримання картини розподілу похибок в межах робочої зони РНС використовують ймовірнісні характеристики оцінки місцеположення, зокрема поняття еліпса (еліпсоїда) похибок (еліпса розсіювання) (рис. 1.10).

Якщо ймовірності результуючої похибки визначення місця об'єкта є незалежними, а похибки ліній положення n_1, n_2, n_3 задані дисперсіями їх нормальних розподілів $\sigma_{n1}, \sigma_{n2}, \sigma_{n3}$, то можна записати співвідношення для тривимірної щільності ймовірності спільної появи цих похибок:

$$w(n_1 n_2 n_3) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_{n1} \sigma_{n2} \sigma_{n3}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{n_1^2}{\sigma_{n1}^2} + \frac{n_2^2}{\sigma_{n2}^2} + \frac{n_3^2}{\sigma_{n3}^2} \right) \right] \quad (1.12)$$

Прирівнюючи показник ступеня деякої постійної λ , отримаємо рівняння поверхні, на якій щільність розподілу похибок однакова, тобто

$$\frac{n_1^2}{\sigma_{n1}^2} + \frac{n_2^2}{\sigma_{n2}^2} + \frac{n_3^2}{\sigma_{n3}^2} = 2\lambda^2 \quad (1.13)$$

Це є рівняння еліпсоїда похибок у косокутній системі координат $0, n_1, n_2, n_3$, осі якої збігаються з нормаллями до поверхні положення. Еліпсоїд похибок обмежує область простору, в яку з заданою ймовірністю потрапляють точки місцеположення об'єкта.

У разі оцінки ймовірності похибки місцеположення об'єкта на площині співвідношення для двовимірної щільності розподілу похибок визначається

$$\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left(\frac{n_1^2}{\sigma_{n_1}^2} - \frac{2\rho n_1 n_2}{\sigma_{n_1} \sigma_{n_2}} + \frac{n_2^2}{\sigma_{n_2}^2} \right) = \lambda^2 \quad (1.14)$$

ρ - коефіцієнт кореляції, що характеризує ступінь взаємозв'язку похибок

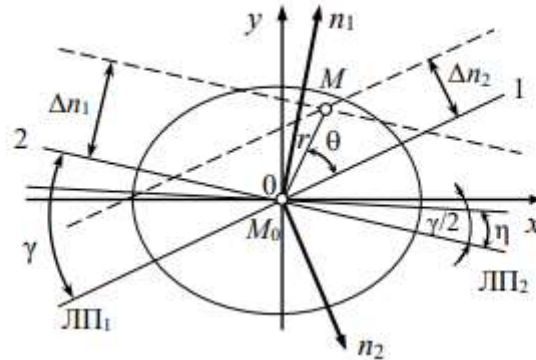


Рис. 1.10 Еліпсоїд похибок

Для оцінки точності місцеположення об'єкта з використанням еліпса похибок доцільно перейти до прямокутної системи координат, де вісь Ox збігається з напрямком великої осі еліпса, а центр знаходиться в точці M , що відповідає істинному положенню об'єкта. В цьому випадку параметри n_1 та n_2 виявляються незалежними, і спільна щільність ймовірності їх похибок

$$w(n_1 n_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_{n_1}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{n_1^2}{\sigma_{n_1}^2} + \frac{n_2^2}{\sigma_{n_2}^2} \right) \right] \quad (1.15)$$

Використовуючи канонічну форму запису рівняння еліпса

$$\frac{x^2}{c^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (1.16)$$

співвідношення (1.14) перетвориться до виду

$$K_1 x^2 + k_2 y^2 = 4\lambda^2 \sigma_{n_2}^2 \sigma_{n_1}^2 / (\sigma_{n_1}^2 + \sigma_{n_2}^2) \quad (1.17)$$

$$\text{Де } k_{1,2} = 1 \pm \left(1 - \frac{4\sigma_{n_1}^2 \sigma_{n_2}^2}{\sigma_{n_1}^2 + \sigma_{n_2}^2} \sin^2 \lambda \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (1.18)$$

Використовуючи (1.16), (1.17) визначаються пів осі еліпса:

$$b^2 = -4 \ln(1 - p) \sigma_{n_1}^2 \sigma_{n_2}^2 / k_1 (\sigma_{n_1}^2 + \sigma_{n_2}^2); \quad (1.19)$$

$$c^2 = -4 \ln(1 - p) \sigma_{n_1}^2 \sigma_{n_2}^2 / k_2 (\sigma_{n_1}^2 + \sigma_{n_2}^2); \quad (1.20)$$

Кут повороту великий осі еліпса щодо бісектриси кута між лініями положення (тобто орієнтація еліпса) визначається співвідношенням

$$\operatorname{tg} 2\eta = \operatorname{tg} \gamma \frac{\sigma_{n_1}^2 - \sigma_{n_2}^2}{\sigma_{n_1}^2 + \sigma_{n_2}^2} \quad (1.21)$$

Формули (1.12) - (1.17) дозволяють визначити розміри і орієнтацію еліпса похибок і здійснити його побудову.

Якщо потрібно знайти ймовірність P_{mc} попадання розрахункового місцеположення об'єкта всередину області $Q(\lambda)$, обмеженої еліпсом заданих розмірів, то використовуються співвідношення

$$P_{mc} = \iint_{Q(\lambda)} w(n_1, n_2) dn_1 dn_2, \quad (1.22)$$

І виконавши інтегрування з урахуванням(1.16), маємо

$$P_{mc} = 1 - \exp(-\lambda^2), \quad (1.23)$$

Де $\lambda = \sqrt{1 - \ln(1 - P_{mc})}$

Вираз визначає розміри еліпса, ймовірність попадання в який фіксована.

За прикладом, при $\lambda=1, 1.73, 2.15$, згідно з формулою (1.22), знаходимо ймовірності розташування об'єкта в межах відповідних еліпсів розсіювання: $P_{mc1}=0.63$; $P_{mc2}=0.95$; $P_{mc3}=0.99$.

Зазвичай в практиці навігаційних розрахунків використовується наближена методика оцінки місцеположення об'єкта на основі середнього квадрата відхилення об'єкта від його дійсного стану в просторі і на площині (а не відносний розподіл похибок по координатним осям). Тоді для оцінки точності місця розташування об'єкта достатньо застосувати співвідношення (1.13) та теорему про дисперсії випадкових величин.

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{\sin^2 \gamma} (\sigma_{n1}^2 + \sigma_{n2}^2 + 2p\sigma_{n1}\sigma_{n2} \cos \gamma) \quad (1.24)$$

Переходячи від похибок визначення ліній положення до похибок вимірювання навігаційних параметрів, співвідношення (1.24) переписується в остаточному вигляді, що враховує величини модулів градієнтів параметрів

$$\sigma_r = \frac{1}{\sin \gamma} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{a1}}{|g_1|}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{a2}}{|g_2|}\right)^2 + 2p \frac{\sigma_{a1}\sigma_{a2}}{|g_1||g_2|} \cos \gamma} \quad (1.25)$$

$$|g_1| = |\text{grad } a_1|; |g_2| = |\text{grad } a_2|$$

Наведена методика оцінки точності місця розташування об'єкта доцільна для цілком конкретної розстановки наземних станцій РНС.[23]

1.2.4 Приклад розрахунку зон локалізації із заданою точністю радіодальномірним способом

Для повної оцінки навігаційних можливостей радіонавігаційних систем (РНС), їх порівняння та оптимального розміщення наземних станцій проводиться побудова кривих рівної точності визначення місцеположення об'єктів. Ці криві показують області, де точність визначення залишається сталою ($\sigma_r = \text{const}$), а також визначають робочу зону системи.[23]

1.2.5 Приклад розрахунку зон локалізації із заданою точністю радіокутомірним способом

Радіодалекоміри розташовані в точках А і В. При незалежності вимірюваних відстаней D_1 і D_2 ($\rho = 0$) з урахуванням набуде вигляду:

$$\sigma_r = \frac{1}{\sin \gamma} \sqrt{\sigma_{D_1}^2 + \sigma_{D_2}^2} \quad (1.26)$$

Якщо точність вимірювання дальності радіодалекомірів однакова $\sigma D_1 = \sigma D_2 = \sigma D$, то

$$\sigma_r = \frac{\sigma_D \sqrt{2}}{\sin \gamma} \leq \sigma_{r\text{доп}}, \quad (1.27)$$

$\sigma_{r\text{доп}}$ – допустиме значення похибки.

Постійної точності σ_r відповідають криві, в кожній точці яких кут між напрямками на радіодалекоміри в точках А і В є величина постійна:

$$\sin \gamma = \frac{\sigma_D}{\sigma_{r\text{доп}}} \sqrt{2} = \text{const} \quad (1.28)$$

Такими лініями буде сімейство кіл, що спираються на базу d , як на хорду (рис.1.11).

Мінімальне значення σ_r досягається на окружності 1, для якої база d є діаметром і $\sin \gamma = 1$. При видаленні об'єкта від бази кут γ зменшується і похибка оцінки місцеположення збільшується.

На окружності 2 похибка досягає допустимого значення $\sigma_{r\text{доп}}$, а при подальшому видаленні від бази перевершує це значення.

При наближенні об'єкту до бази величина $\sin \gamma$ зменшується, що призводить до зростання похибки. При досягненні окружності 3 умова $\sigma_r = \sigma_{r\text{доп}}$ знову виконується, а при подальшому зменшенні відстані до бази похибка буде перевершувати допустиму.

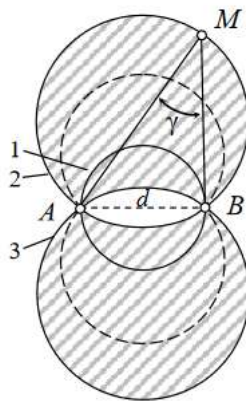


Рис. 1.11. Робоча зона для двох далекомірів

Таким чином, робочою зоною далекомірної РНС буде частина площини (заштрихована) по обидві сторони від бази, яка знаходиться між колами 2 і 3 .

Зауважимо, що область простору, обмежена лініями максимальної дальності дії радіодалекомірів, зазвичай більше робочої зони РНС. Однак необхідна точність оцінки місця розташування об'єкта за допомогою РНС гарантується лише в межах робочої зони [23]

1.2.6 Приклад розрахунку зон локалізації із заданою точністю радіодальномірним та радіокутомірним способам

При незалежності вимірюваних пеленгів радіопеленгаторами, розташованими в точках А і В, зі співвідношення (1.25) з урахуванням рівності $\sigma_{\Pi} = 0,017\sigma_a r$ погрішність місцеположення об'єкта визначається як

$$\sigma_r = \frac{0,017}{\sin \gamma} \sqrt{D_1^2 \sigma_{a1}^2 + D_2^2 \sigma_{a2}^2}, \quad (1.29)$$

D_1 D_2 - відстані від об'єкта до радіонавігаційних точок А і В ; середньоквадратичні похибки радіопеленгів РНТ.

В окремому випадку, коли $\sigma_{a1} = \sigma_{a2} = \sigma_a$

$$\sigma_r = \frac{0,017}{\sin \gamma} \sqrt{D_1^2 + D_2^2} \quad (1.30)$$

Для визначення меж робочої зони необхідно побудувати криву рівній точності, в будь-якій точці якої $\sigma_r = \sigma_{r\text{доп}}$ (рис. 1.12).

Перетворимо (1.29) з урахуванням, що $\gamma = 180^\circ - (\alpha_1 + \alpha_2)$

$$D_1 = \frac{d \sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}; \quad D_2 = \frac{d \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)};$$

Підставивши D_1 і D_2 в (1.30), отримаємо

$$\sigma_r = k d \sigma_a, \quad k = 0,0017 \frac{\sqrt{\sin^2 \alpha_1 + \sin^2 \alpha_2}}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1.31)$$

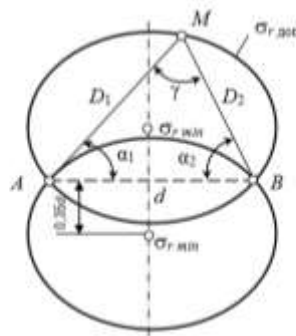


Рис. 1.12. Робоча зона для двох кутомірів

Побудова робочих зон РНС проводиться зазвичай виходячи із заданих значень d , σ_a і σ_r , згідно з якими з (1.31) $\sigma_r = k d \sigma_a$, знаходять коефіцієнт k , а потім за таблицями - відповідні йому значення α_1 і α_2 . Перетин допоміжних ліній, проведених під кутами α_1 і α_2 , дає точки $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$, що належать кривій заданої точності.

Для визначення мінімального значення похибки оцінки місця розташування в межах розглянутої робочої зони покладемо в співвідношенні (1.30)

$$\sigma_r = \frac{0,017\sigma_\alpha}{\sin \gamma} \sqrt{D_1^2 + D_2^2}$$

$D_1 = D_2 = D$, а замість D запишемо його значення у вигляді $D = d/2 \sin 0,5\gamma$ тоді отримаємо

$$\sigma_r = \frac{0,017\sigma_\alpha}{\sin \gamma \sin \gamma/2} (d/2)$$

Для отримання мінімального значення σ_r прирівняємо нулю його похідну за кутом γ , тобто

$$1/\sin \gamma \sin(\gamma/2) = -0,5 \cos(\gamma/2) \sin \gamma - \cos \gamma \sin(\gamma/2) = 0$$

$$\text{Звідси } \operatorname{tg} \gamma = 2 \operatorname{tg}(\gamma / 2) \text{ і } \gamma = 109^\circ 28'$$

Знайденому значенню кута γ відповідають дві точки в робочій області кутомірної РНС, розташовані симетрично на перпендикулярі, проведеному через середину бази і на відстані $0,35 d$ від неї.[23]

1.2.7 Приклад розрахунку зон локалізації із заданою точністю радіодальномірним та радіокутомірним способам

Для кутомірно-далекомірного способу оцінки місцеположення об'єкту вираз (1.24), що описує похибку ліній положення, відповідно до формул $i\sigma_n = \sigma_r$ і $\sigma_n = 0,017\sigma_\alpha r$, запишеться:

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_D^2 + D^2 \sigma_\alpha^2} \quad (1.32)$$

(1.32) σ_D і σ_α - середньоквадратичні похибки визначення ліній положення (ЛРР і ЛРП).

З (1.32) видно, що точність визначення місцеположення за допомогою КДС залежить лише від точності визначення ліній положення, так як кут γ їх перетину завжди дорівнює 90° . Для побудови кривих заданої точності, що обмежують робочу зону КДС, з виразу (1.32) маємо (рис. 1.13)

$$\sigma_{\text{доп}} = \sqrt{\sigma_{r_{\text{доп}}}^2 - \sigma_D^2/2} = \text{const}$$

рівняння кола радіуса $D_{\text{доп}}$, описане навколо місцеположення радіомаяка РМ.

Зовнішня межа робочої зони визначається максимальною дальністю дії D_{max} радіозасобів.[23]

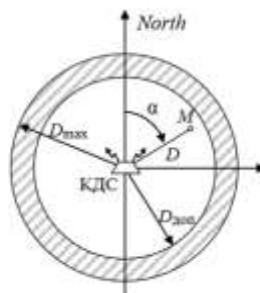


Рис. 1.13. Робоча зона для кутомірно-далекомірної системи

1.3. Порівняння ефективності

1.3.1 Далі обговоримо показники : точність, масштабованість і супровідні витрати.

А. Точність

Оцінка точності визначення місцезнаходження є ключовою для оцінки різних схем локалізації. Зазвичай вона вимірюється як очікувана відстань між оціненою та фактичною позицією сенсорного вузла. Схеми на основі діапазону, як правило, мають кращу точність, оскільки вони використовують вимірювання для розрахунку відстані між вузлами. У бездіапазонних схемах оцінка відстані може ґрунтуватися на інших методах, таких як триангуляція, що може бути менш точним, особливо в умовах з багатьма перешкодами.

Гібридні схеми локалізації, незалежно від того, чи базуються вони на діапазоні, чи ні, зазвичай забезпечують кращу точність, оскільки вони можуть поєднувати різні типи вимірювань, що надходять з різних джерел. Ця комбінація дозволяє отримувати більш точні результати.

Наприклад, деякі гібридні схеми без діапазону, такі як IHLA[10], можуть надавати кращу точність порівняно з схемами, які повністю базуються на діапазоні, як SA. Те ж саме стосується і гібридних схем на основі діапазону, які можуть бути більш точними, ніж схеми без діапазону.

Загальна точність більшості схем може знизитися в умовах з перешкодами, оскільки вони можуть перешкоджати лініям видимості між сенсорними вузлами. Також важливо враховувати фізичні джерела помилок, такі як шуми вимірювань та втрати сигналу, які можуть впливати на точність схем локалізації в різних умовах довкілля.

Більшість схем досягають високої точності у рівномірно розподілених мережах порівняно з випадковими. Також плановане розгортання вузлів може значно покращити точність і охоплення методу.

У схемах на основі прив'язки, розташування та щільності вузлів прив'язки впливають на точність локалізації. Дослідження показали, що розташування прив'язок у формі опуклої оболонки навколо мережі може підвищити точність локалізації. Додаткові прив'язки у центрі мережі також можуть бути корисними.

Деякі схеми працюють краще в мережах з високою щільністю прив'язок, тоді як іншим досить лише кількох. Наприклад, схема APIT працює ефективно у мережах з багатьма прив'язками, маючи при цьому низькі витрати. З іншого боку, схеми з мобільними пристроями, такі як ADAL та MABT, використовують мобільні пристрої замість статичних прив'язок і можуть забезпечувати кращу точність, особливо в умовах з перешкодами.

Багато схем чутливі до щільності вузлів. Наприклад, методи, як CDV-Нор, часто вимагають високої щільності вузлів для точних вимірювань. Також

важливо враховувати, що деякі методи вимірювання дальності не ефективні у низькоспроможних мережах через збої підключення.

Централізовані схеми зазвичай забезпечують більш точні оцінки позицій, ніж розподілені, оскільки останні можуть призвести до втрати інформації через неповність мапи мережі та паралельні обчислення.

В. Супровідні витрати

Витрати, пов'язані з локалізаційною схемою, включають кілька аспектів, таких як витрати на обчислення та зв'язок, кількість вузлів прив'язки, час обробки, споживання енергії та потрібне апаратне забезпечення для кожного вузла.

Було розглянуто ключові критерії для порівняння схем локалізації, зокрема вартість зв'язку, вартість обчислень та вартість обладнання.

Вартість зв'язку включає енергоефективність, оскільки споживання енергії під час передачі даних є критичним для бездротових сенсорних мереж. Розподілені схеми можуть потребувати значних витрат на зв'язок через необхідність співпраці між сусідніми вузлами. Для мінімізації цих витрат можна використовувати ефективніший діапазон зв'язку.

Вартість обчислень також важлива, оскільки процесор є джерелом виснажливого терміну служби батареї. Централізовані схеми можуть вимагати значних обчислювальних витрат, особливо у вимірах в 3D-просторі.

Вартість обладнання, яка включає в себе щільність вузлів та прив'язок, також важлива. Високоякісне обладнання може забезпечувати точніші вимірювання, але вимагає більш великих витрат. Схеми на основі діапазону зазвичай вимагають більше обладнання, ніж схеми без діапазону.

Розглядаючи ці аспекти, можна визначити ефективність та вартість кожної локалізаційної схеми.

С. Масштабованість

Масштабованість - це ключовий аспект для оцінки схем локалізації, оскільки вона визначає, наскільки добре схема працює у великих мережах або областях розгортання.

У схемах, що базуються на вимірюванні дальності, ефективність локалізації може зменшуватися зі збільшенням відстані між відправником і одержувачем. В щільних мережах можуть виникати проблеми з перевантаженням каналів бездротового зв'язку, що може вимагати більш складної комунікаційної інфраструктури.

Централізовані схеми зазвичай надають більш точні оцінки позиції, оскільки всі дані агрегуються на базовій станції для обробки. Проте вони мають єдину точку відмови і вимагають великих витрат на зв'язок. Крім того, сенсорні вузли, розташовані близько до базової станції, можуть витратити енергію швидше через ефект воронки, що погіршує масштабованість централізованих підходів.

Висновки

Локалізація в бездротових сенсорних мережах привертає значну увагу дослідників, які розробляють та досліджують різні схеми для її вдосконалення. Ці схеми можна розділити на дві основні категорії: засновані на вимірюванні діапазону та ті, що не базуються на ньому. Однак гібридні схеми, які поєднують різні методи, ускладнюють класифікацію.

Хоча бездротові сенсорні мережі є активною областю досліджень, вже існують різноманітні схеми локалізації, кожна з яких має свої особливості та наголос на конкретних сценаріях.

Загальний висновок з порівняльного аналізу полягає в тому, що кожна схема має свої переваги та обмеження. Схеми на основі діапазону можуть бути витратними або чутливими до шумів, в той час як інші, можуть бути менш точними та вразливими до щільності вузлів. Гібридні схеми, хоча й забезпечують кращу точність, вимагають більше часу на обчислення.

РОЗДІЛ 2

ВИКОРИСТАННЯ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Багато додатків сенсорної мережі вимагають визначення місця розташування, але часто включати GPS-приймач у вузол сенсорної мережі занадто дорого. Таким чином, схеми локалізації для сенсорних мереж зазвичай використовують невелику кількість вихідних вузлів, які знають своє розташування та протоколи, за допомогою яких інші вузли оцінюють своє місцезнаходження на основі повідомлень, які вони отримують. Було запропоновано декілька таких методик локалізації, але жодна з них не розглядає мобільні вузли та вихідні вузлів. Хоча мобільність, здається, ускладнює локалізацію, в роботі представлено послідовний метод локалізації Монте-Карло[11] та стверджується, що він може використовувати мобільність для підвищення точності та точності локалізації. Цей підхід не вимагає додаткового обладнання на вузлах і працює навіть тоді, коли рух вихідні вузли та вузлів неконтрольований.

Вступ

Визначення місцезнаходження є важливим аспектом бездротових сенсорних мереж, оскільки багато застосувань, таких як моніторинг навколишнього середовища, відстеження транспортних засобів і картографування, потребують знання розташування сенсорних вузлів. Протоколи маршрутизації на основі розташування можуть зменшити споживану енергію та покращити поведінку кешування, що є важливим для багатьох додатків. Однак у багатьох випадках встановлення GPS-приймачів у кожному вузлі є надто витратним.

Різноманітні методи локалізації були запропоновані, але вони часто вимагають спеціального обладнання або розподілу вузлів за певними топологіями мережі. Наприклад, методи, які використовують вимірювання

діапазону сигналу, потребують дорогого обладнання, або велику кількість вихідні вузли для вузлів, що рідко можливо.

Запропоновано новий метод локалізації, який використовує мобільність для підвищення точності та зменшення витрат. Цей підхід не потребує додаткового обладнання та працює в різних умовах, що робить його привабливим для застосування в різноманітних сценаріях бездротових сенсорних мереж.

Досліджено три типи сценаріїв у мережі, що складається з вузлів із невідомим розташуванням та вихідні вузли, яке знає своє місцезнаходження:

a) Статичні вузли, рухливі вихідні вузли: Вузли залишаються на місці, але вихідні вузли рухаються. Наприклад, сценарій військового застосування, де вузли розміщені на землі, а передавачі на транспортних засобах. Поступово точність оцінки розташування вузла зростає з часом, коли він отримує інформацію від більшої кількості вихідних вузлів.

b) Рухливі вузли, статичні вихідні вузли: Вузли рухаються, але вихідні вузли залишаються нерухомими. Наприклад, вузли, що плавають у річці, знаходяться поруч з фіксованими вихідними вузлами на березі. Цей сценарій може бути використаний у проекті NASA Mars Tumbleweed[12], де марсоходи рухаються без контролю над їхнім рухом, але потребують орієнтирів для навігації.

c) Рухливі вузли та вихідні вузли: Це найзагальніший сценарій, де і вузли, і вихідні вузли рухаються. Це може включати будь-яку програму, де вузли та вихідні вузли розгортаються спеціальним чином і рухаються через середовище або мають приводи для руху.

Методи централізованої локалізації передбачають обчислення в центральному розташуванні, використовуючи дані від вузлів датчиків.

Методи розподіленої локалізації не потребують централізованих обчислень і ґрунтуються на тому, що кожен вузол визначає своє розташування з обмеженим зв'язком із сусідніми вузлами. Ці методи можна класифікувати як на основі діапазону та без діапазону. Методи, засновані на діапазоні,

використовують оцінки відстані або оцінки кутів у розрахунках розташування, тоді як рішення без діапазону залежить лише від вмісту отриманих повідомлень.

Підходи на основі діапазону використовують час прибуття, потужність отриманого сигналу, різницю в часі прибуття двох різних сигналів (TDOA) і кут прибуття (AOA)[13]. Хоча вони можуть досягти високої роздільної здатності, обладнання може бути дорогим або результати залежать від нереалістичних припущень щодо поширення сигналу.

Через апаратні обмеження сенсорних пристроїв методи локалізації без діапазону є економічно ефективною альтернативою більш дорогим підходам на основі діапазону. Існує два основних типи методів локалізації без діапазону, які були запропоновані для сенсорних мереж: локальні методи, які покладаються на високу щільність початкових значень, щоб кожен вузол міг почути кілька початкових значень, і методи підрахунку стрибків, які покладаються на затоплення мережі.

Місцеві техніки: У методі Centroid кожен вузол оцінює своє розташування шляхом обчислення центру розташування всіх вихідних вузлів, які він чує. Метод APIT ізолює середовище на трикутні області між маяковими вузлами та використовує метод сітки для обчислення максимальної площі, в якій, ймовірно, буде знаходитися вузол.

Техніка підрахунку кроків: DV-HOP використовує метод, заснований на векторній маршрутизації відстані. Метод аморфної локалізації використовує подібний підхід, де координати вихідних вузлів передаються по всій мережі, щоб кожен вузол міг підтримувати кількість переходів до цього вихідного вузла і обчислювати свою позицію.

Жодна з цих схем не націлена на випадок, коли вузли або вихідні вузли можуть рухатися. Їх можна адаптувати для мобільних мереж шляхом частого оновлення оцінок розташування, але вони не розроблені з урахуванням того, як можна використовувати мобільність для досягнення локалізації.

З іншого боку, проблема мобільної локалізації широко досліджується в робототехніці. Робота з локалізацією робототехніки зазвичай передбачає попередню або раніше вивчену карту та намагається визначити положення робота на основі його руху та даних датчиків. Методи, як класичний фільтр Калмана, і Марківської локалізація на основі сітки, були запропоновані для роботи з мультимодальними та негаусовими густинами. Однак представлення сітки можуть накладати значне навантаження на пам'ять і обчислення, особливо якщо хтось зацікавлений у високій роздільній здатності.

Ladd та інші використовували робототехнічний підхід до локалізації для досягнення точної локалізації для бездротових мереж, використовуючи вивчені варіації потужності радіочастотного сигналу, отриманого за допомогою стандартних карт Ethernet. Їхній підхід добре працює для локалізації всередині приміщень у фіксованих середовищах, але припускає фіксоване початкове розташування та потребує фази навчання, тому не підходить для додатків мобільних сенсорних мереж.

Було адаптовано метод локалізації Монте-Карло (MCL) для використання в мобільних сенсорних мережах. MCL — це фільтр часток, який поєднується з імовірнісними моделями сприйняття та руху роботів. Ключова ідея MCL полягає в тому, щоб представляти апостеріорний розподіл можливих місць за допомогою набору зважених вибірок. Кожен крок поділяється на фазу прогнозування та фазу оновлення. У фазі передбачення робот робить рух і невизначеність його положення зростає. На етапі оновлення нові вимірювання включаються для фільтрації та оновлення даних. Цей процес повторюється, і робот постійно оновлює своє передбачене місцезнаходження.

Метод MCL застосовує метод послідовного Монте-Карло для досягнення локалізації. Однак існують суттєві відмінності між локалізацією робота та локалізацією вузла для сенсорних мереж. У той час як локалізація робота визначає місцезнаходження робота на попередньо визначеній карті, локалізація в сенсорних мережах працює у вільному просторі або на ненанесеній на карту місцевості. По-друге, робот має відносно хороший

контроль і ймовірнісне знання свого руху на заздалегідь визначеній карті. Сенсорний вузол зазвичай практично не контролює свою рухливість і не знає своєї швидкості та напрямку. По-третє, робот може отримати точну інформацію про дальність від орієнтирів, але сенсорний вузол може дізнатися лише про те, що він знаходиться в радіусі дії. Нарешті, при локалізації робота окремі вимірювання інтегруються мультиплікативно, припускаючи умовну незалежність між ними, а ваги зразків потрібно нормалізувати після оновлення. У цьому методі через обмеження обчислювальної потужності та потужності пам'яті застосовано підхід фільтрації, за якого кожне вимірювання можна розглядати незалежно, а вага кожного зразка дорівнює 0 або 1.

2.1. Протокол локалізації

Обмеження в сенсорних вузлах і точність визначення дальності роблять локалізацію мобільних сенсорних вузлів складнішою проблемою, ніж локалізація роботів. З іншого боку, масштаб можна використовувати на нашу користь. Багато вузлів у сенсорній мережі можуть співпрацювати для обміну інформацією про місцезнаходження. Припущено, що час розділено на дискретні одиниці часу. Оскільки вузол може відійти від свого попереднього розташування, його необхідно повторно локалізувати в кожній одиниці часу.

Коли вузол рухається в мережі, попередня інформація про місцезнаходження ставатиме все більш неточною. З іншого боку, є нові спостереження з початкових вузлів, які здатні фільтрувати неможливі місця. Задній розподіл можливого розташування вузла після переміщення та спостереження визначити нелегко. За винятком кількох особливих випадків, включаючи лінійні моделі простору станів Гаусса (фільтр Калмана) [14], неможливо оцінити розподіл аналітично. Метод послідовного Монте-Карло (SMC) забезпечує рішення на основі моделювання для оцінки апостеріорного розподілу нелінійних дискретних часових динамічних моделей. Ключова ідея SMC полягає в представленні апостеріорного розподілу.

Ініціалізація: Спочатку вузол не знає свого розташування. N є константою, яка вказує на кількість зразків, які необхідно підтримувати

$$L_0 = \{ \text{set of } N \text{ random locations in the deployment area} \} \quad (2.1)$$

Крок: Обчислимо новий можливий набір місць розташування L_t на основі L_{t-1} , можливе розташування, встановлене на попередньому часовому етапі, і нові спостереження, O_t .

$$L_t = \{ \}$$

while(size(L_t) < N)*do*

$$R = \{ l_t^i | l_t^i \text{ is selected from } p(l_t^i | l_{t-1}^i), l_{t-1}^i \in L_{t-1} \text{ for all } 1 \leq i \leq N \}$$

$$R_{\text{filtered}} = \{ l_t^i | l_t^i \text{ where } l_t^i \in R \text{ and } p(o_t | l_t^i) > 0 \} \quad \text{Prediction} \quad (2.2)$$

$$\text{Filtering} \quad (2.3)$$

$$L_t = \text{choose}(L_t = \text{choose}(L_t \cup R_{\text{filtered}}) N) \quad (2.4)$$

Метод послідовного Монте-Карло (SMC) використовує набір зважених вибірок, які рекурсивно оновлюються в часі за допомогою методу вибірки важливості. Цей метод дозволяє ефективно моделювати апостеріорний розподіл можливих місць розташування вузла в мережі. Оскільки безумовна дисперсія ваги важливості може збільшитися, методи повторної вибірки використовуються для усунення траєкторій з малими нормалізованими вагами важливості. SMC успішно застосовувався у різних областях, таких як супровід цілей, локалізація роботів та комп'ютерний зір. Для детального огляду та обговорення властивостей методу SMC можна звернутися до відповідних джерел.

2.1.1. Метод оцінки розташування

Проблему мобільної локалізації можна представити у формі простору станів, де t - окремий час, L_t позначає розподіл положення вузла в часі t , а O_t -

спостереження від вихідних вузлів, отримані між часом $t-1$ і часом t . Рівняння переходу $p(l_t|l_{t-1})$ описує передбачення поточного положення вузла на основі попереднього положення, а рівняння спостереження $p(l_t|o_t)$ описує ймовірність того, що вузол знаходиться в цьому місці l_t з урахуванням спостережень. Нас цікавить рекурсивна оцінка розподілу фільтрації в часі $p(l_t|o_0, o_1, \dots, o_t)$. Набір N зразків l_t використовується для представлення розподілу l_t , і наш метод рекурсивно обчислює набір зразків на кожному кроці часу. Оскільки l_{t-1} відображає всі попередні спостереження, ми можемо обчислити t використовуючи тільки l_{t-1} і o_t .

Формули 2.2-2.4 показують огляд методу. Спочатку ми припускаємо, що вузол не знає про свою позицію, тому початкові зразки вибираються випадковим чином з усіх можливих місць. На кожному кроці часу набір місць оновлюється на основі можливих переміщень і нових спостережень. Ми оцінюємо розташування вузла, обчислюючи середнє розташування всіх можливих місць у l_t . Припускаємо, що розташування (x, y) позицій у двовимірному декартовому просторі, але цю техніку можна використовувати еквівалентно для тривимірного або іншого представлення розташування.

На етапі передбачення, вузол використовує розподіл переходів $p(l_t|l_{t-1})$, щоб передбачити його можливі місця розташування на основі попередніх зразків і його руху. На етапі фільтрації, вузол використовує нову отриману інформацію для видалення прогнозованих місць, які не відповідають спостереженням. Повторна вибірка використовується для збереження кількості вибірок місця розташування.

На кроці прогнозування вузол починає з набору можливих місць, обчислених на попередньому кроці, L_{t-1} , і застосовує модель мобільності до кожного зразка, щоб отримати набір нових зразків, L_t . Ми припускаємо, що вузол не знає про свою швидкість і напрямок руху, окрім того, що знає, що його швидкість менша ніж v_{max} . Отже, якщо на попередньому кроці l_i є однією з можливих позицій $t-1$ вузла, можливі поточні позиції містяться в круговій області з початком l_i і радіусом $t- v_{max}$. Ми використовуємо $d(l_1, l_2)$ для

позначення евклідової відстані між двома точками l_1 і l_2 . Якщо швидкості розподілені рівномірно на інтервалі $[0, v_{max}]$, ймовірність поточного місцезнаходження на основі попередньої оцінки місцезнаходження визначається рівномірним розподілом.

$$p(l_t | l_{t-1}) = \frac{1}{\pi v_{max}^2} \text{ if } d(l_t, l_{t-1}) < v_{max}$$

$$0 \text{ if } d(l_t, l_{t-1}) \geq v_{max} \quad (2.5)$$

Отже, набір L_t , розрахований на етапі передбачення, містить одне розташування, вибране випадковим чином із кола радіуса v_{max} навколо кожної точки в L_{t-1} . Це відображає підвищену невизначеність щодо розташування вузла через невідомий рух. У випадках, коли щось відомо про рух вузла (наприклад, що він рухається з певною швидкістю або що він, швидше за все, рухається в певному напрямку), розподіл ймовірностей можна відповідно відкоригувати, щоб зробити кращі прогнози.

2.1.2. Фільтрування

На цьому кроці вузол фільтрує неможливі місця на основі нових спостережень. Для спрощення представлення та аналізу припускаємо, що час дискретний і всі повідомлення надходять миттєво. Отже, в момент часу t , кожен вузол у радіусі дії почує оголошення про місцезнаходження від цього вузла. У реалістичному розгортанні необхідно мати справу з мережевими колізіями та враховувати пропущені повідомлення.

На рисунку 2.1 показаний приклад ситуації. Існує чотири типи повідомлень, які слід враховувати:

1. **Аутсайтери** – повідомлення, які не були почуті ні в поточному, ні в попередньому проміжку часу.
2. **Прибулі** – повідомлення, які були почуті в поточному проміжку часу, але не в попередньому.

3. **Вибулі** – повідомлення, які були почуті в попередньому проміжку часу, але не в цьому.

4. **Інсайдери** – повідомлення, які були почуті в обох проміжках часу.

Прибулі та вибулі надають найбільш корисну інформацію, оскільки вузол знає, що він був на відстані r_1 від місцезнаходження в час t_0 , але не на відстані r_2 від місцезнаходження в час t_1 . Проте, якщо ми покладаємося лише на пряму інформацію з повідомлень, вузол не знає попереднього місцезнаходження прибулого або поточного місцезнаходження вибулого. Є два можливі способи збору цієї інформації:

1. Вихідний вузол (С) передає як своє поточне місцезнаходження, так і своє місцезнаходження на попередньому часовому етапі в кожному оголошенні:

$$S \rightarrow \text{Region HELLO} | ID_s | loc_t | loc_{t-1}$$

2. Сусідні вузли можуть передавати інформацію про початкові локації (набір усіх початкових елементів і їх розташування, почуті на попередньому кроці часу):

$$S \rightarrow \text{Region HELLO} | ID_s | loc_t$$

$$N \rightarrow \text{Region HELLO} | ID_n | \{(ID_s, loc_{s_1})\}$$

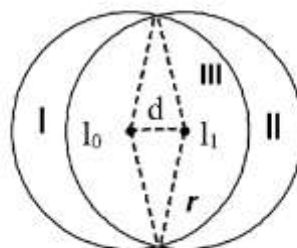


Рис. 2.1

Рух вихідних вузлів. Вихідний вузол переміщується з позиції l_0 в момент часу 0 до позиції l_1 в момент часу 1. Вихідний вузол є внутрішнім для вузлів в області III, надходженцем для вузлів в області II, виходцем для вузлів в області I та стороннім для всіх інших вузлів, що поєднуються з виявленням сусідів у застосуваннях, які потребують інформації про сусідство з інших цілей. Перевага другого підходу полягає в тому, що він також дозволяє вузлам отримувати інформацію про сторонні вихідні вузли без необхідності відслідковувати надходженців та виходців. Вузол знає, що він не знаходиться на відстані r від будь-якого стороннього вихідного вузла, але повинен знаходитися на відстані $2r$ від будь-якого вихідного вузла, яке було почуте одним з його сусідів. У поєднанні з виявленням сусідів у програмах, які потребують інформації про сусідство для інших цілей. Перевага другого підходу полягає в тому, що він також дозволяє вузлам виявляти інформацію про аутсайдерські вихідні вузли без відстеження прибулих і вибулих. Вузол знає, що він не на відстані r від будь-якого стороннього вихідні вузли, але має бути на відстані $2r$ від будь-якого вихідного вузла, почутого одним із його сусідів.

На рисунку 2.3 показано умову фільтра для інсайдерів і аутсайдерів. Що позначає множину всіх почутих вихідних вузлів, N_i позначають набір усіх вузлів, які чують його сусіди, але не N .

Умова фільтра розташування L

$$filter(l) = \forall s \in S, d(l, s) \leq r \wedge \forall s \in T, r < d(l, s) \leq 2r \quad (2.6)$$

Розподіл ймовірностей $p(x|t)$ дорівнює нулю, якщо умова фільтра є хибною, і рівномірно розподілений в іншому випадку. Таким чином, ми виключаємо з набору можливих місць розташування ті, які не відповідають спостереженням. Після фільтрації їх може бути менше ніж N можливих місць розташування. Процеси передбачення та фільтрації повторюються, об'єднуючи знайдені можливі точки, принаймні до тих пір, поки N можливі місця розташування не будуть придбані.

2.2 Аналіз

2.2.1 Вибірка важливості

Нас цікавить оцінка заднього розподілу розташування вузла $p(l_t | o_0, o_1, \dots, o_t)$. Оскільки, як правило, неможливо отримати вибірку безпосередньо з апостеріорного розподілу, наш метод використовує підхід до вибірки важливості. Припустимо, вибірки відбираються незалежно від нормалізованої функції важливості π . Потім ми можемо виміряти вагу кожного зразка та використати ці ваги для оцінки.

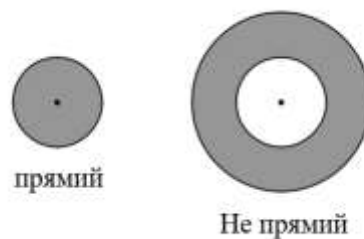


Рис. 2.2 Стан фільтра.

Вузол знаходиться на відстані r якщо вихідні вузли воно чує безпосередньо, і на відстані $(r, 2r]$ якщо вихідні вузли не чують, але чує один із його сусідів.

З формул 2.2-2-4, ми приймаємо наступну рекурсивну функцію важливості з:

$$\pi(l_t | o_0, o_1, \dots, o_t) = p(l_0) \prod_{k=1}^t p(l_k | l_{k-1}) \quad (2.7)$$

$$\tilde{w}_t^i = \tilde{w}_{t-1}^i p(o_t | l_t^i) \quad (2.8)$$

$$w_t^i = \frac{\tilde{w}_t^i}{\sum_{k=1}^N \tilde{w}_t^k} \quad (2.9)$$

Рівняння (2.7) є фазою передбачення, на якій вузол прогнозує свої поточні можливі місця розташування на основі попередніх можливих місць розташування. Рівняння (2.8) є фазою оновлення, на якій вузол оновлює ваги

нових вибірок на основі отриманих спостережень. Потім ми нормалізуємо ваги \tilde{w}_t^i до w_t^i в (2.8) і використовуємо зважений набір (l_t^i, w_t^i) до t для імітації заднього розподілу.

Ми вибираємо цю функцію важливості, оскільки вона дає рекурсивне обчислення $p(l_k|l_{k-1})$ і $p(l_t|o_t)$ у рівняннях (2.8) і (2.9), а розподіли двох ймовірностей неважко обчислити.

За слабких припущень вибірка важливості збігається до апостеріорного розподілу.

Виродження вибірки важливості неминуче, оскільки безумовна дисперсія ваг важливості збільшиться. Основна ідея повторної вибірки полягає в тому, щоб усунути траєкторії, які мають малі нормалізовані ваги важливості, і зосередитися на траєкторіях з великими вагами.

Відповідною мірою виродженості методу є ефективний розмір вибірки N_{eff} . Оцінка N_{eff} надається:

$$N_{eff} \approx \frac{1}{\sum_{i=1}^N (w_t^i)^2} \quad (2.10)$$

Коли N_{eff} нижче фіксованого порогу $N_{поріг}$, потрібно використовувати метод повторної вибірки.

У нашому методі, оскільки $p(o_t|l_t)$ дорівнює 1 або 0, вага завжди дорівнює 0 або 1. Припустимо, що є k у ненормалізованих N зразках, то нормалізовані ваги складатимуться з k значень $1/k$ і $N-k$ значень 0. З рівняння (2.10) ми можемо обчислити

$$N_{eff} \approx \frac{1}{\sum_{i=1}^N (w_t^i)^2} = k \quad (2.11)$$

У методі, ми маємо враховувати саме кількість дійсних зразків. Нам потрібно лише зберегти достатню кількість дійсних зразків (зразки з вагою 1), щоб зробити кількість ефективних зразків (N_{eff}) дорівнює або вище порогу N_{eff} . У методі ми встановили поріг $N_{eff} = N$, і ми неодноразово беремо зразки, поки

не отримаємо точне значення N_{eff} . У експериментах моделювання, було виявлено, що це $N=50$ достатньо.

2.2.2 Межа роздільної здатності

У методі розглядається як один стрибок, так і два стрибки, тому різниця в позиції буде помітна, якщо вона впливає на з'єднання з одним або двома стрибками. Якщо припускаємо, що щільність вузлів висока, але щільність вихідних вузлів низька, тоді зміна положення на відстань d буде помітною, якщо в зоні двох стрибків є якісь вихідні вузли, доступні з цієї позиції, але не з іншої позиції. Площа цього регіону становить приблизно $4\pi d + 4(2r)\pi d = 12\pi d$. Це передбачає наявність високої щільності вузлів, тому вузол має високу ймовірність мати сусіда, який може почути нові вихідні вузли. Отже, межа роздільної здатності (максимальна відстань, на яку датчик може переміститися без зміни підключення) дорівнює $\pi/12\pi d$, де πd – щільність вихідні вузли. Для $\pi d=1$, межа роздільної здатності становить $0,26r$.

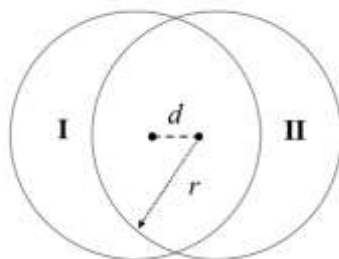


Рис. 2.3. Межа роздільної здатності.

Області I і II — це області, які можуть впливати на зв'язок вузла, коли він рухається d відстань.

2.2.3 Безпека

Безпечна локалізація є складною проблемою, яка ще не вивчена.

Попередні методи локалізації вразливі до кількох видів атак, і злоумисник може порушити цілісність або доступність усіх відомих методів

локалізації. Без автентифікації зловмисник може ввести фальшиві початкові коди в мережу та оголосити неправдиві місцезнаходження. Такі методи, як Centroid, які оцінюють місцезнаходження шляхом усереднення розташування всіх почутих вихідні вузли, сприйнятливі до цієї атаки.

Цифрові підписи можуть запобігти впровадженню фіктивних початкових повідомлень про місцезнаходження шляхом автентифікації передачі початкових даних до вузлів. Це можна зробити шляхом розповсюдження відкритих ключів, що відповідають приватним ключам початкових елементів, кожному вузлу перед розгортанням. Однак операції шифрування з відкритим ключем часто занадто дорогі з точки зору обчислень для сенсорних вузлів, а довгі повідомлення потребують витрат енергії. Іншим підходом було б використання протоколу μ Tesla шляхом попереднього завантаження кожного вузла з початковим значенням хеш-ланцюга та кожного початкового числа з початковим секретом. Це заощадить витрати на операції з відкритим ключем, але затримає локалізацію (або принаймні перевірку місцеположень) до моменту, коли буде звільнено наступний ключ у ланцюжку хешування. Це також вимагатиме слабкої синхронізації між вихідними вузлами.

Альтернативні механізми встановлення ключів, такі як попередній розподіл випадкового ключа, можуть встановлювати ключі за допомогою симетричної криптографії. Ці методи вимагають двонаправлених повідомлень, однак, і не підходять для методів локалізації, де вихідні вузли передають далі, ніж просто вузли. Крім того, вони вимагатимуть, щоб вихідні вузли передавали своє місцезнаходження безпосередньо кожному сусідньому вузлу, замість того, щоб просто використовувати одну передачу, яку можуть почути та декодувати всі вузли.

Зауважте, що методи, засновані на підрахунку переходів, вимагають, щоб підрахунок переходів підтримувався точно по всій мережі та дають можливість одному шахрайському вузлу порушувати розташування багатьох вузлів, рекламуючи помилковий підрахунок переходів. Якщо автентифікація

використовується для пом'якшення цієї загрози, вона вимагає встановлення ключів зв'язку між усіма вузлами зв'язку. Якщо один вузол скомпрометовано, розташування по всій мережі буде порушено.

Протоколи локалізації особливо вразливі до атак відтворення. Під час атаки через червоточину зломисник отримує два приймачі в мережі, з'єднані високоякісним позасмуговим каналом зв'язку, і відтворює повідомлення, почуті в одному місці, в іншому. Атака через червоточину може легко порушити існуючі методи локалізації (включаючи MCL)[15], навіть якщо всі оголошення про місцезнаходження були успішно зашифровані. Відомі засоби захисту від атак через червоточину покладаються або на те, що вузли вже знають своє розташування, або вимагають спеціального обладнання, такого як тісно синхронізовані годинники або спрямовані антени.

MCL пропонує кілька бажаних властивостей для адаптації безпеки. Оскільки це не залежить від вихідних вузлів з потужними передавачами, можлива двонаправлена перевірка та встановлення ключа. Коли вузли та вихідні вузли рухаються, зломисник зможе завдати лише обмеженої шкоди. Підхід до фільтрації MCL менш сприйнятливий до фальшивих початкових значень, ніж інші підходи. Поки є дійсна інформація, отримана від деяких легітимних вихідних вузлів, передбачувані місцезнаходження будуть обмежені фільтрацією всієї дійсної інформації. У гіршому випадку зломисник може перешкодити вузлу отримати будь-які дійсні зразки, а отже, визначити щось про його місцезнаходження. Це ефективна атака на відмову в обслуговуванні, але вона не порушує цілісність результатів розташування. Крім того, оскільки MCL постійно оновлює оцінки розташування, атака буде успішною лише до тих пір, поки вона продовжує передавати фіктивні повідомлення.

2.2.4. Оцінка

Ключовим показником для оцінки методу локалізації є точність оцінки розташування в порівнянні з витратами на зв'язок і розгортання. Збільшення щільності початкових значень або частоти сповіщень про місцезнаходження має підвищити точність, але компроміси необхідно розуміти, щоб визначити відповідні параметри розгортання.

Експерименти з моделюванням проводилися з використанням спеціально створеного симулятора, доступного за адресою <http://www.cs.virginia.edu/mcl>. Експериментальні результати в середньому 10 виконань з різними початковими числами генератора псевдовипадкових чисел.

У експериментах варіюються параметри як сенсорної мережі та сенсорних вузлів, так і Методу MCL.

Для всіх експериментів вузли датчиків випадковим чином розподілені в прямокутній області розміром 500 x 500 метрів. Припускаємо фіксований діапазон передачі, r , 50 м як для вузлів, так і для вихідних вузлів. Параметри мережі та вузла, які змінюються:

- Швидкість ($v_{\text{макс}}, v_{\text{хв}}, c_{\text{макс}}, c_{\text{хв}}$). Представимо швидкість як відстань переміщення на одиниця часу. Швидкість вузла вибирається випадковим чином із $[v_{\text{хв}}, v_{\text{макс}}]$; Швидкість вихідних вузлів вибирається випадковим чином з $[c_{\text{хв}}, c_{\text{макс}}]$. Розглядаємо вплив швидкостей як на точність, так і на час конвергенції.
- Щільність вузлів (pd), середня кількість вузлів в одному діапазоні передачі.
- Щільність вихідні вузли (cd), середня кількість насінин в одному діапазоні передачі кроків

Приймаємо модель мобільності випадкової маршрутної точки як для вузлів, так і для вихідних вузлів. Це одна з найбільш часто використовуваних моделей мобільності для мобільних тимчасових мереж. У моделі випадкової маршрутної точки вузол випадковим чином вибирає місце призначення,

швидкість руху та час паузи після прибуття в пункт призначення. Припускаємо, що вузли не знають своєї швидкості та напрямку, але мають відому максимальну швидкість $v_{\text{макс}}$. Модель випадкової маршрутної точки страждає від спаду середньої швидкості, і це забезпечить ненадійну основу для моделювання. Використовували модифіковану модель випадкової маршрутної точки для підтримки середньої швидкості. Замість вибору певної швидкості для кожного пункту призначення вузли випадковим чином змінюють свою швидкість під час кожного руху. Час паузи встановлено на 0, тому середня швидкість є точною $v_{\text{макс}}/2$, коли швидкість вибирається випадковим чином між 0 і $v_{\text{макс}}$.

Припускаємо, що вузол може визначити, чи знаходиться він у радіусі дії r іншого вузла чи ні, але він не може отримати більш точну інформацію про відстань (наприклад, виміряти відстань за допомогою потужності отриманого радіосигналу). Для більшості експериментів моделюємо радіус дії як ідеальне коло.

Параметри Методу MCL, які ми змінюємо:

- Час між повідомленнями про місцезнаходження (t_u). У більшості експериментів припускаємо фіксоване значення t_u і вимірюємо швидкості в термінах одиниць відстані за t_u .
- Кількість збережених зразків (N). Зберігання більшої кількості зразків підвищує точність, але вимагає більше пам'яті та обчислень. Результати показують, що кількості зразків достатньо для високої точності. Для всіх інших експериментів використовуємо $N=50$.

2.2.5. Точність

Точність MCL залежить від швидкостей вузлів. З плином часу вузли отримуватимуть більше повідомлень про початкове розташування та покращуватимуть свої оцінки розташування.

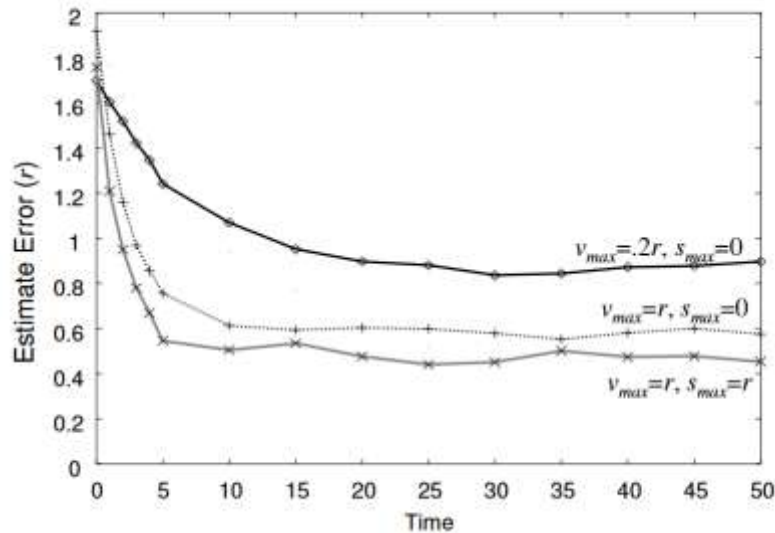


Рис. 2.4 Конвергенція розташування. $p_d=10, c_d=1$

На рисунку 2.4 показана помилка в оцінці розташування, виміряна як кратне відстані передачі вузла r , для трьох різних сценаріїв: нерухомі вихідні вузли ($s_{max}=0$) з рухомими вузлами $v_{max}=0.2r$ і як вузли, так і вихідні вузли рухаються разом $v_{max}=s_{max}=r$. Процес локалізації можна розділити на фазу ініціалізації та стабільну фазу. На етапі ініціалізації помилка оцінки різко зменшується в міру включення нових спостережень. Локалізація покращується як поточним спостереженням, так і попередніми спостереженнями. У стабільній фазі вплив спостережень (фільтр) і рухливість вузла (невизначеність) досягають деякого балансу, а помилка оцінки коливається навколо мінімального значення. Чим вище швидкість вузлів, тим швидше досягається стабільна фаза. Точність після конвергенції також краща для вузлів, що рухаються швидше, оскільки, рухаючись швидко, вони стикаються з більшою кількістю вихідного вузла і швидше фільтрують неточні зразки.

На відміну від техніки MCL, методи локалізації Centroid і Amorphous не використовують минулу інформацію, тому вони не вдосконалюються з часом. На рисунку 2.5 порівнюється помилка локалізації різних методів локалізації з часом. Точність MCL швидко підвищується. Після 5 кроків вона перевищує

точність техніки Amorphous.

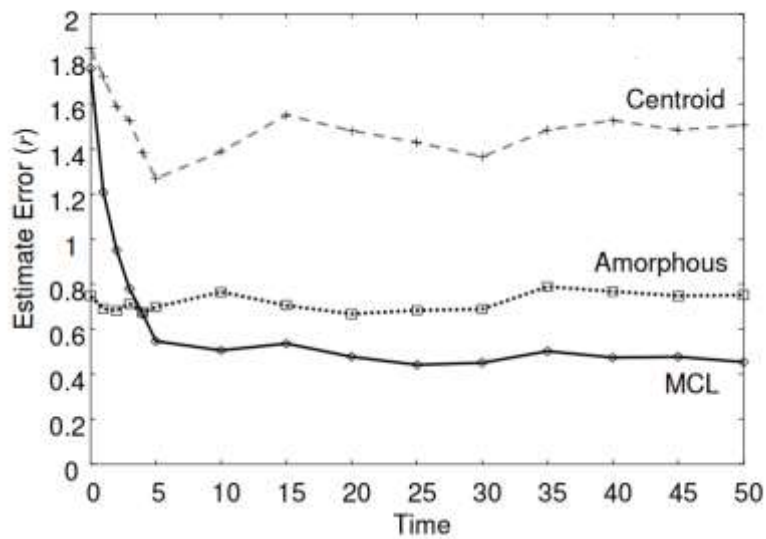


Рис. 2.5 Порівняння точності $n_d = 10$, $S_d = 1$, $V_{\max} = S_{\max} = r$.

2.2.6 Швидкість вузла

Зміна швидкості вузла подібна до зміни часу між повідомленнями про місцезнаходження. Якщо оголошення з'являються частіше, локалізація є точнішою, але витрати на зв'язок збільшуються. Ми вимірюємо максимальну швидкість вузла як v_{\max} розподяючи фактичні швидкості вузла між 0 і v_{\max} , використовуючи модифіковану модель мобільності випадкової маршрутної точки. На рисунку 2.6 показано вплив швидкості вузла на конвергентну помилку локалізації, коли відстань, пройдена за одиницю часу оголошення, збільшується з $0,1r$ до $2r$ для кількох різних щільності вихідних вузлів. Швидкість вузла впливає на процес локалізації двома способами. Збільшена швидкість робить прогнозовані місця менш точними, оскільки наступні можливі місця потрапляють у більший регіон. З іншого боку, швидший рух призводить до більшої кількості нових спостережень на кожному часовому етапі, і, отже, можна відфільтрувати більше неможливих місць. Помилки оцінки швидко падають, коли швидкість вузла зростає з $0,1r$ до $0,3r$ коли вихідний вузол також рухаються з однаковою швидкістю, а потім похибка поступово зростає, оскільки збільшується невизначеність, що є результатом

більш швидкого руху. Вихідні вузли із фіксованою швидкістю ($c_{хв}=c_{макс}=r$), помилка найменша, коли вузли найповільніші, і поступово зростає зі збільшенням швидкості вузла.

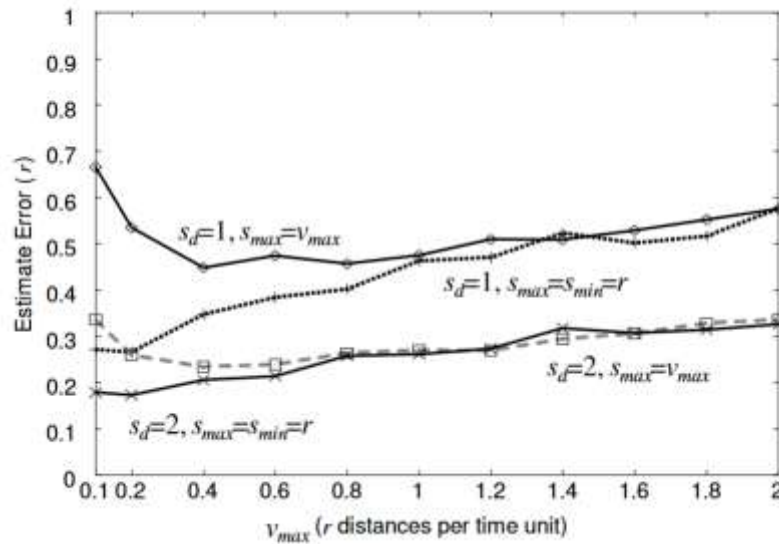


Рис. 2.6 Вплив швидкості вузла

Рисунок 2.6 ілюструє, що тривалість одиниці часу може бути збільшена без збільшення похибки оцінки, якщо нове розташування вузла знаходиться в межах відстані r від свого попереднього місця розташування. MCL працює найкраще, коли максимальна відстань між вузлами та вихідні вузли, які проходять від попереднього місця за одиницю часу, становить $0,4r$ до r відстані. Отже, у мережі з вузлами, що повільно рухаються, одиниця часу може бути досить довгою, а витрати на зв'язок низькими.

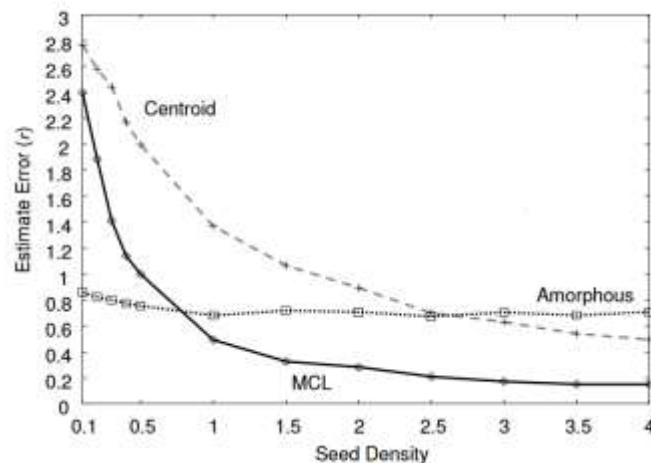


Рис. 2.7 Вплив густоти вузлів. $n_d = 10$, $V_{\max} = S_{\max} = 2r$.

2.2.7 Щільність вихідних вузлів

Збільшення щільності початкових значень полегшує локалізацію, але збільшує витрати на мережу та розгортання. На рисунку 2.7 показано середню помилку оцінки різних Методів локалізації, коли щільність початкового вмісту змінюється. Точність як MCL, так і Centroid покращується зі збільшенням щільності початкового вмісту, оскільки вузли отримуватимуть більше оголошень про місцезнаходження. Для аморфного методу, оскільки кожен вузол отримує розповсюджені повідомлення від усіх вихідного вузла у мережі, помилка оцінки не значно покращується після того, як є достатня кількість вихідного вузла (32 у цьому експерименті). MCL працює адекватно навіть при низькій щільності вихідних вузлів та перевершує інші методи, коли щільність вихідних вузлів становить 1 або вище. Оскільки набір можливого розташування враховує попередню інформацію про розташування вузла, MCL є набагато точнішим, ніж Centroid, коли щільність початкового матеріалу низька.

2.2.8 Щільність вузлів

На рисунку 2.8 показано вплив щільності вузлів на помилку оцінки в різних Методах локалізації. На MCL і Centroid щільність вузлів мало впливає. MCL вимагає порогової щільності вузлів, щоб вузли отримували інформацію про два переходи від достатньої кількості сусідів. Аморфна техніка залежить від вищої щільності мережі. Він працює погано, коли щільність мережі нижче 6, але найкраще працює, коли щільність мережі перевищує 15. Це тому, що щільність мережі має великий вплив на точність підрахунку переходів. Пропонують підходи до вдосконалення методів підрахунку стрибків, коли щільність вузлів низька, шляхом збільшення кількості насінневих вузлів.

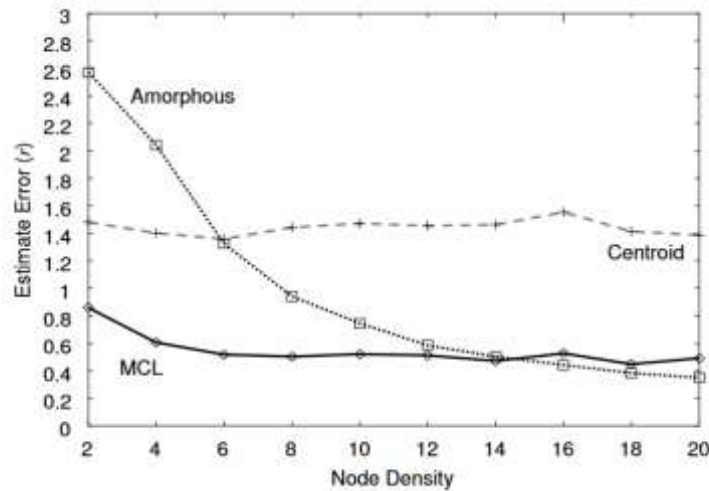


Рис. 2.8. Щільність вузлів впливу $S_{d=1}$, $V_{\max} = S_{\max} = 2r$.

2.2.9 Кількість зразків

Підтримка більшої кількості зразків для Методу MCL може підвищити точність, але вимагає додаткової пам'яті. На рисунку 2.9 показано вплив розміру вибірки на точність місцезнаходження. Похибка оцінки швидко падає на початку, оскільки невелика кількість вибірок не може адекватно відображати розподіл ймовірностей. Помилка оцінки є досить стабільною після розміру вибірки 50, і точність покращується лише мінімально, якщо збільшити кількість вибірок до 1000.

Отже, MCL ефективний як у пам'яті, так і в обчисленнях. Хороша точність досягається лише за 50 зразків. Щільність вихідних вузлів також впливає на вибір розміру зразка. Чим вища щільність вихідних вузлів, тим точнішою може бути локалізація, тому для досягнення мінімальної похибки потрібно більше зразків. Для додатків із низькою щільністю вихідного коду та суворими обмеженнями обчислень і пам'яті розмір вибірки можна зменшити до 10 із невеликою втратою точності.

Варіативність фактичних шаблонів радіопередач може мати суттєвий вплив на точність локалізації залежно від техніки локалізації. На відміну від префектів кіл радіуса, згідно з нашими попередніми експериментами,

виміряна відстань прийому радіостанцій може суттєво змінюватися залежно від умов навколишнього середовища та нерівностей антени.

На рисунку 2.10 показано вплив ступеня нерегулярності на похибку оцінки. Методи MCL і Centroid – суттєво постраждали. Використовуємо ступінь нерегулярності (DOI), щоб позначити максимальну варіацію радіусу дії в напрямку поширення радіо. Наприклад, якщо $DOI = 0,1$, тоді фактичний радіус дії в кожному напрямку вибирається випадковим чином із $[0,9r, 1.1r]$. Помилка оцінки аморфного методу значно зростає зі збільшенням DOI. Це пояснюється тим, що оцінка діапазону базується на розповсюдженні кількості стрибків, і вона завжди вибирає мінімальну кількість стрибків. Отже, нерегулярні радіопередачі матимуть накопичувальний вплив на помилку визначення дальності в кількох стрибках.

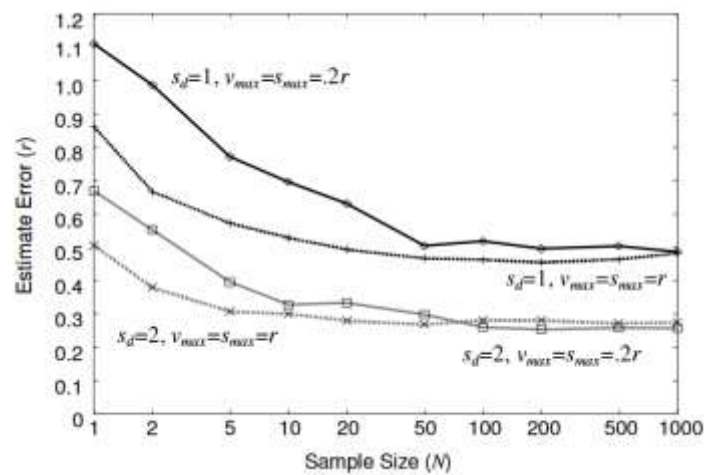


Рис. 2.9. Вплив сторони зразка. $n_d = 10$

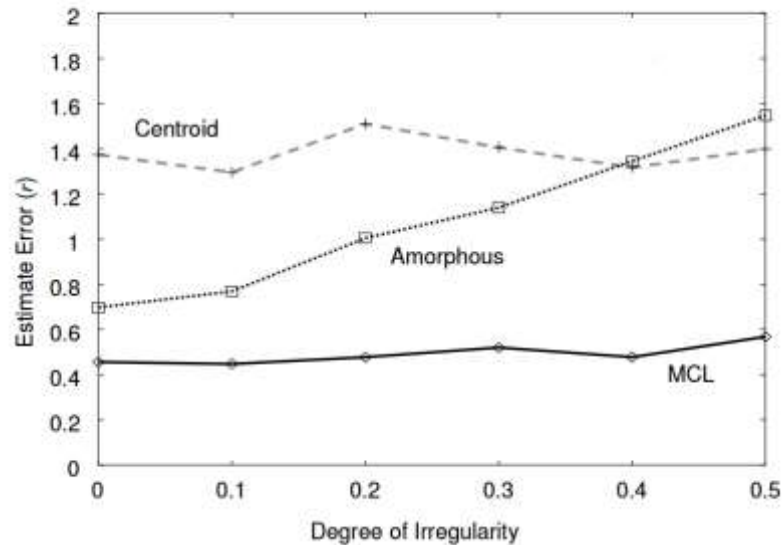


Рис. 2.10. Вплив нерегулярності. $n_d = 10$, $s_d = 1$, $v_{\max} = s_{\max} = .2r$

2.2.10 Модель руху

Поки що припускали, що і вузли, і вихідні вузли рухаються випадково та незалежно. У деяких програмах рух вузлів і вихідні вузли може бути корельованим і демонструвати певну групову поведінку, і це може вплинути на продуктивність методу.

Використовуємо модель групової мобільності контрольної точки (RPGM), щоб дослідити вплив групової поведінки на метод. У RPGM рух вузла є комбінацією групового вектора руху та вектора випадкового руху. Випадковий рух базується на контрольній точці, яка рухається відповідно до групового руху. Це забезпечує наближення для групи вузлів і вихідні вузли, які рухаються в течії або роздуваються вітром.

Поміщаємо всі вузли та вихідні вузли в одну групу. Груповий рух визначається як модель випадкової ходьби, у якій напрямок вибирається випадковим чином від 0 до 360 градусів, а швидкість вибирається випадковим чином від 0 до максимальної швидкості групового руху. Окремий випадковий рух кожного вузла відносно групового руху вибирається за допомогою модифікованої випадкової моделі маршрутної точки, як і в попередніх експериментах. Щоб підтримувати однаковий груповий рух для всіх вузлів,

припускаємо, що в мережі немає кордонів, тому вузли можуть вільно пересуватися. Якщо вузол не може знайти достатньо дійсних зразків після фільтрації, він повторно ініціалізується шляхом видалення попередніх зразків і отримання зразків безпосередньо з нових спостережень. Також припускаємо, що вузол знає максимальну відстань, яку він може перемістити за одну одиницю часу, яка є сумою максимального індивідуального випадкового руху та максимального групового руху.

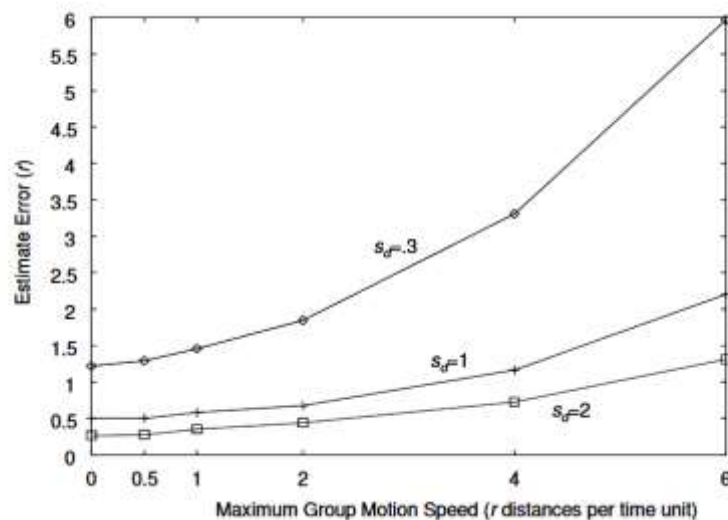


Рис. 2.11. Вплив групового руху $n_d = 10$, $v_{\max} = s_{\max} = r$, необмежена область

На рисунку 2.11 показано точність визначення місця розташування, коли підтримуємо максимальну випадкову швидкість руху за одиницю часу та змінюємо максимальну групову швидкість руху. Похибка оцінки зростає зі збільшенням максимальної швидкості групового руху. Оскільки всі вузли рухаються однаково, відносні позиції змінюються менше, тому кількість отриманих корисних нових спостережень не збільшується зі збільшенням швидкості групи. Оскільки невизначеність у фазі прогнозування стає більшою зі збільшенням швидкості руху групи, точність суттєво знижується, коли рух групи домінує над рухом окремого вузла.

З іншого боку, у деяких програмах можливо контролювати рух вихідні вузли. Стратегія, яка переміщує вихідні вузли таким чином, щоб повністю покривати площу, підвищить точність і особливо час конвергенції MCL.

На рисунку 2.12 показано, як контроль руху вихідні вузли може підвищити точність і час конвергенції локалізації MCL. Тут розглядаємо як статичні вузли, так і сценарії рухомих вузлів. Коли вузли статичні, фаза прогнозування не збільшує невизначеність, тому помилка оцінки зменшується, коли збирається більше спостережень. Коли вузли мобільні, похибка оцінки збігається, щоб збалансувати невизначеність руху та спостереження. Використовуємо низьку щільність вихідних вузлів ($cd = 0,3$), щоб уповільнити процес локалізації. Ми порівнюємо модель випадкової маршрутної точки з моделлю сканування. У моделі сканування вихідні вузли розподілені рівномірно та розділені двома r . Вони сканують мережу в а заздалегідь визначений шлях, який максимізує покриття.

Зменшується як час збіжності, так і похибка оцінки.

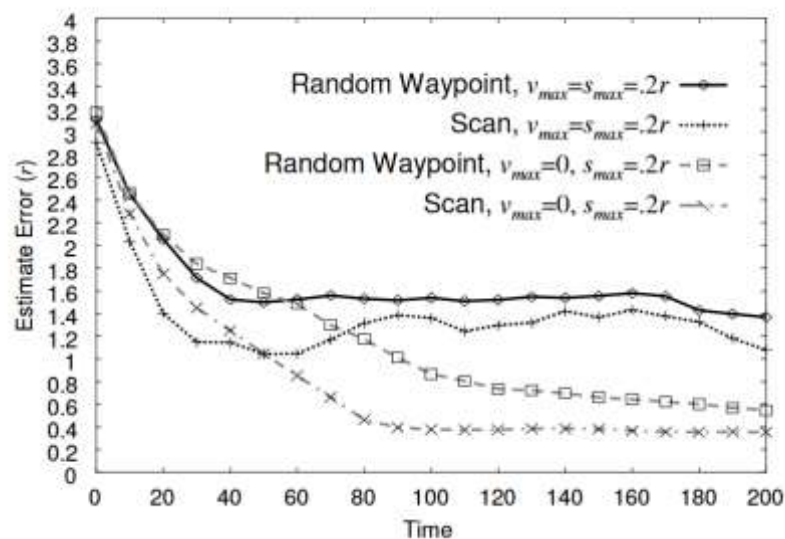


Рис. 2.12. Вплив керування рухом $n_d = 10$, $s_d = 0.3$.

2.2.11 Комунікаційні витрати

Вимірюємо накладні витрати на зв'язок як кількість повідомлень, які вузол повинен надіслати в кожному процесі локалізації. Хоча розмір

повідомлень може дещо відрізнятись залежно від методів локалізації, фактичний розмір повідомлення більше залежить від способу кодування місць і оголошень, ніж від техніки локалізації.

Оскільки метод Amorphous вимагає, щоб уся початкова інформація надходила в мережу, кожен вузол повинен транслювати точну кількість початкових даних у кожному процесі локалізації. Для розумної точності розташування існує 32 початкових числа, а це означає, що кожен вузол повинен повторно передати 32 оголошення про місцезнаходження. Для методу Centroid вузлам не потрібно передавати жодних повідомлень; уся передача місцезнаходження відбувається безпосередньо з вихідних вузлів. Для методу MCL вузли повинні ділитися своєю початковою інформацією зі своїми сусідами з одним переходом, тому на кожному кроці часу всі вузли передають свою початкову інформацію один раз. Кількість вихідних вузлів, які чує кожен вузол, є функцією щільності вихідних вузлів.

У експериментах щільність вихідних вузлів один ($cd=1$) є достатнім для точної локалізації, тому комунікаційні витрати кожного вузла дорівнюють рівно 1.

Висновки

Багато додатків бездротової сенсорної мережі залежать від того, що вузли здатні точно визначати своє місцезнаходження. Головний результат дивовижний і суперечливий: мобільність може підвищити точність і знизити витрати на локалізацію. Експерименти з моделюванням показують, що техніка MCL може забезпечити точну локалізацію, навіть якщо обмеження пам'яті суворі, початкова щільність низька та мережеві передачі дуже нерегулярні. Багато питань ще належить дослідити в майбутній роботі, зокрема, наскільки добре припущення зберігаються в різних додатках мережі мобільних сенсорів, як різні типи руху впливають на локалізацію та як техніку можна розширити для забезпечення безпеки.

РОЗДІЛ 3.

МЕТОД ЛОКАЛІЗАЦІЇ СТРИБКА ВЕКТОРА ВІДСТАНІ ДЛЯ БЕЗДРОВОВИХ МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Бездротові сенсорні мережі (WSN) вимагають точної локалізації сенсорних вузлів для різних програм. Запропоновано метод локалізації стрибка вектора відстані (DVHLM) для вирішення проблеми дислокації вузлів у мережах реального часу. Запропонований метод поєднує методи трилатерації та оптимізації роїв частинок для оцінки розташування невідомих або дислокованих вузлів. Методологія включає чотири етапи: розрахунок координат, обчислення відстані, оцінка положення невідомого вузла та корекція оцінки. Щоб оцінити запропонований метод, було проведено експерименти з моделюванням і порівняли його продуктивність із сучасними методами з точки зору точності локалізації з відомими вузлами, дислокованими вузлами та ефектами тіні. Результати демонструють, що DVHLM перевершує існуючі методи та досягає кращої точності локалізації з меншою похибкою.

Вступ

Розумні та економічно ефективні пристрої, які забезпечують зондування та радіочастотні можливості, змінили традиційні мережеві служби. Одним із прикладів є бездротові сенсорні мережі (WSN), які використовуються в різних програмах, включаючи системи охорони здоров'я, поле бою, навколишнє середовище та домени моніторингу. Невеликі інтелектуальні сенсорні вузли розгорнуті в цих мережах для моніторингу області чи регіону. З усіма цими функціями один аспект є загальним у цих мережах, і це життєздатність датчика визначення місця розташування. Під час розгортання цих вузлів посилення на місцезнаходження встановлюються вручну або вузли обчислюють місцезнаходження за допомогою служб відстані та глобальної системи

позиціонування (GPS)[16,17]. Однак послуги GPS споживають енергію та мають високу вартість.

Самолокалізація — це інший метод, коли вузли отримують своє місцезнаходження за допомогою методу локалізації. Інформація про місцезнаходження вимагає ідентифікації місця події, інформації про пристрої поблизу та перевірки покриття мережі. Точна інформація про місцезнаходження відіграє життєво важливу роль у програмах WSN. Існують різні типи методів локалізації, такі як цільова локалізація або локалізація на основі джерела, самолокалізація та локалізація на основі діапазону або вільна локалізація. У першому типі локалізації вузли контролюють територію та відстежують необхідне місцезнаходження тварин, людей або машин. Для цього типу локалізації використовувалися різні типи методів, наприклад локалізація на основі моделі розпаду та локалізація, незалежна від моделі. Методи локалізації на основі розпаду розраховують відстань і силу отриманого сигналу. Однак ці методи страждають від проблем із сідловими точками та локальними оптимумами.

WSN зробили революцію в традиційних мережевих службах і використовуються в різних програмах, таких як системи охорони здоров'я, поле бою, навколишнє середовище та домени моніторингу. Сенсорні вузли розгортаються в цих мережах для моніторингу області або регіону, а точна інформація про місцезнаходження відіграє життєво важливу роль у додатках WSN. Однак традиційні методи встановлення посилянь на місцезнаходження, такі як служби GPS, є дорогими та споживають енергію. Тут на допомогу приходять методи локалізації, які дозволяють вузлам отримувати своє місцезнаходження за допомогою різних методів, таких як методи на основі діапазону та без діапазону. Методи локалізації можуть допомогти вирішити проблему споживання енергії та вартості за допомогою індикатора потужності сигналу приймача (RSSI) і методів різниці в часі прибуття (TDOA)[18], а методи без прив'язки використовуються для отримання інформації про

місцезнаходження на локальній карті. Метою методів локалізації є досягнення локалізації за найменший час.

Складні методи локалізації споживають більше можливостей обробки та призводять до споживання енергії та проблем із виснаженням вузлів.

Методи локалізації мають бути енергоефективними, використовуючи менше обчислювальних ресурсів і вирішуючи проблеми локалізації джерела в WSN. У цьому контексті були розпочаті різні спроби розробки енергоефективних методів локалізації для WSN за допомогою методів оптимізації.

Методи оптимізації використовуються для вирішення локалізації та оцінки розташування джерела. Однак ці методи покладаються на точну виміряну інформацію, яка поширюється між сенсорними вузлами в мережах WSN. Трансляція цієї точної інформації потребує великих обчислювальних ресурсів і споживає більше енергії. З іншого боку, деякі схеми пробудження також пропонуються для активації серії вузлів для оцінки інформації про місцезнаходження вузла в мережі. Необхідно розробити більш енергоефективний метод локалізації для мереж WSN.

3.1 DVHLM

Метод локалізації вектора відстані (DVHLM)[19] — це метод розподіленої локалізації для бездротових сенсорних мереж (WSN), який не потребує визначення діапазону інформації. Потім було проведено багато наукових досліджень щодо методу DVHLM для підвищення точності. Крім того, ідеальний відстань між вузлами маяка для зменшення частоти помилок DV-Нор було вивчено. Ця техніка виконує дві основні ролі: зменшує частоту помилок у середній відстані за один стрибок, обчислений вузлом-маяком, і коригує цю відстань у всій мережі. Отже, метод найменших квадратів є засобом, за допомогою якого були ідентифіковані невідомі координати вузла. Інші дослідження розглядали середньозважену помилку відстані та оцінену

помилку відстані, використану для корекції вихідної середньої відстані стрибка. Індекс і вага логарифмічного зменшення використовуються для покращення ваги групи частинок. Кожен вузол маяка враховується при обчисленні середньої відстані стрибка після накопичення ваги окремих вузлів. Основний вузол описується коротко, звертаючи увагу на структуру типології мережі та, по суті, балансує між локальними та глобальними функціями. Фактично, деякі дослідження використовували розширений метод оптимізації роїв частинок (PSO) для оцінки відстаней до вузлів шляхом зміни традиційних методів оцінки для локалізації вузлів.

Управління радіомаячними вузлами діапазону широкомовної інформації реалізується шляхом індукування порогового значення кількості стрибків, таким чином обмежуючи розподіл інформації в межах певного діапазону. Однак коригування середньої відстані кожного вузла прив'язки виконується шляхом включення помилки середньої відстані кожного вузла маяка. Крім того, невідомий вузол з поточного раунду переміщується до нового вузла прив'язки в наступному раунді позиціонування.

Метод мультикомунікаційного радіуса використовується для визначення стрибків між вузлами. Слід зазначити, що ізольовані вузли були проігноровані при обчисленні середньої відстані стрибка невідомих вузлів. Отже, середня відстань стрибка, отримана від вузлів-маяків, потім зважується та нормалізується, щоб можна було підвищити точність локалізації невідомих вузлів. Нарешті, в деяких дослідженнях концепція обчислення відстані між невідомими вузлами та вузлами-маяками розглядалася шляхом використання чітких середніх відстаней стрибків.

Маякові вузли Galactic Swarm Optimization[20] у мережі класифікуються на різні види. У кожній популяції Метод PSO використовується для оцінки невідомого вузла для локальної оптимізації. Подібним чином метод зваженого центроїда використовується для локальної оптимізації, встановлюючи координацію невідомих вузлів. Багатообіцяючим методом локалізації WSN, який протягом останніх років було багато досліджено та вдосконалено, є

Метод DVHLM. Його здатність до поширення робить його особливо придатним для великих мереж. Включивши різні методи корекції та Методи оптимізації, вчені змогли значно підвищити його точність і зменшити помилку локалізації. Можна припустити, що з подальшими дослідженнями та вдосконаленням Метод DVHLM матиме потенціал стати широко використовуваним і досить точним методом локалізації в WSN.

3.1.1. Проектування мережі

Для перевірки запропонованого рішення була встановлена мережа, де сенсорні вузли випадково розгорнуті на площі 120×120 м². Було розгорнуто кілька сенсорних вузлів у цій області та класифіковано стабільні та нестабільні вузли. Стабільні вузли розташовані точно в своєму положенні, тоді як нестабільні вузли зміщені зі свого положення. Основною метою запропонованого рішення є оцінка нестабільних або зміщених вузлів у мережі. Положення зміщених вузлів оцінюється за вузлом-кандидатом (CN). Кількість CN вибирається для оцінки розташування невідомого вузла.

3.1.2 Процес локалізації

Запропоноване рішення базується на різних процесах, таких як вибір вузлів-кандидатів і їх розрахунок координат. Після цього розрахунку інформація транслюється в мережу. Початкове значення кожного вузла встановлюється на нуль, а під час трансляції значення змінюється на одиницю, щоб отримати мінімальне значення кількості вузлів. Зміщені вузли обчислюють відстань CN, використовуючи інформацію про кількість вузлів і відстань між CN. Рівняння (1) використовується для розрахунку відстані CN

$$Distance = \frac{\sum_D^N (Des_{A \neq \frac{CN}{Hop_{A \text{ CN}}}})}{CN}, \quad (3.1)$$

де CN позначає вибрані вузли-кандидати, тоді як оціночна відстань між вибраними CN A та CN розраховується як у рівнянні (3.2).

$$Des_{ACN}^{True} = Distance_{CN} * Hop_{ACN}. \quad (3.2)$$

Справжня відстань між вибраними CN A та CN визначається як

$$Des_{ACN}^{True} = \sqrt{(x_A^2 - x_{CN})^2 + (y_A^2 - y_{CN})^2} \quad (3.3)$$

Після цього розрахунку похибка між CN надається як

$$Error_{CN} = Des_{ACN} - Des_{ACN}. \quad (3.3)$$

Після цих обчислень зміщені вузли можуть обчислити свою відстань від обраних CN. Блок-схема пропонованих методів локалізації показана в рисунку 3.1.

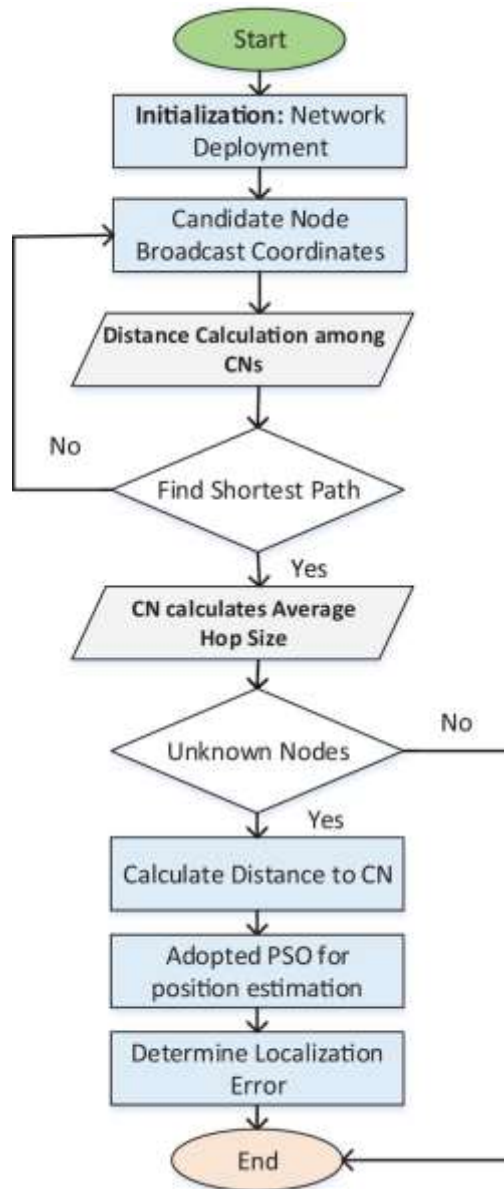


Рис. 3.1

Технічний процес запропонованого методу локалізації.

Після розробки запропонованого методу кут прибуття (AoA) і RSSI[21] використовуються для оцінки запропонованого методу. AoA використовує вимірювання кутів вузлів датчиків, тоді як RSSI використовує щонайменше три датчики маяків і рівень їхнього сигналу.

3.2. Результати

Дослідження мало на меті оцінити ефективність запропонованого методу локалізації в WSN за допомогою експериментів з моделюванням. Щоб

забезпечити точність і надійність результатів, було ретельно розроблено налаштування моделювання та вибрано відповідні параметри. По-перше, встановлено площу моделювання 200×200 м², яка зазвичай використовується в попередніх дослідженнях для локалізації WSN. Причина цього вибору полягає в тому, щоб забезпечити реалістичний сценарій розгортання WSN і гарантувати, що вузли рівномірно розподілені по мережі. По-друге, змінювалась кількість вузлів-кандидатів, які є вузлами, розташування яких потрібно оцінити, між 10 і 50, а кількість дислокованих вузлів, які є вузлами, розташування яких уже відомо та використовується як контрольні точки, між 100 і 300. Цей діапазон кандидатів і дислокованих вузлів типовий для багатьох реальних додатків WSN.

Крім того, встановлено дальність передачі 30 м, що є ключовим параметром для оцінки продуктивності методів локалізації. Дальність передачі визначає максимальну відстань, на якій два вузли можуть спілкуватися один з одним. Таким чином, це впливає на точність і ефективність процесу локалізації. Крім того, вибрано розмір пакета 20 байт, який зазвичай використовується в багатьох програмах WSN. Розмір пакета має важливе значення, оскільки він визначає кількість інформації, якою можна обмінюватися між вузлами, що необхідно для вимірювання відстані та розрахунків локалізації. Нарешті, було виконано повний набір моделювань для оцінки ефективності запропонованого методу. Змінювались такі параметри, як кількість вузлів, розподіл вузлів, дальність передачі та розмір пакету, щоб переконатися, що результати надійні та можуть бути узагальнені для різних сценаріїв. Інші параметри моделювання присутні в Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

S#	Параметри	Значення
1	Зона мережі	200 × 200 м ²
2	Невідомі вузли	100–300
3	Відомі вузли	1000–7000
3	Вузли-кандидати	10–50
4	Діапазон передачі	30 м
5	Кількість ітерацій	40

Оцінка запропонованого протоколу була проведена за допомогою кількох експериментів, щоб дослідити вплив відомої щільності датчика, невідомої щільності вузлів датчика та затінення на помилку локалізації. Перший експеримент був зосереджений на аналізі впливу відомої щільності сенсорних вузлів на помилку локалізації. Експеримент проводився зі 100 дислокованими або невідомими вузлами датчиків, і щільність відомих вузлів поступово збільшувалася з 500 до 700 з кроком. Моделювання було запущено в цілому 10 разів, і результати були проаналізовані. На малюнку 3 представлені результати експерименту, що відображають відсоток помилки локалізації для різної кількості розташованих вузлів. Висновки демонструють, що запропонований метод DVHLM перевершує методи локалізації AOA та RSSI з точки зору помилки локалізації для різних відомих щільностей датчиків. Крім того, результати показують, що RSSI є більш надійною технікою, ніж AOA, коли щільність сенсорних вузлів досягає 700 відомих сенсорних вузлів. На малюнку 3.1 представлена помилка локалізації з відовими вузлами та додатково обґрунтовані ці висновки. Крім того, щоб оцінити вплив щільності невідомих сенсорних вузлів на помилку локалізації, запропонований протокол було протестовано з різною кількістю невідомих сенсорних вузлів, зберігаючи постійну щільність відомих сенсорних вузлів. Результати показують, що збільшення щільності невідомих вузлів призводить

до пропорційного збільшення помилки локалізації. Окрім того, було проведено оцінку впливу тінізації на запропонований протокол.

Результати показують, що помилка локалізації зростає зі збільшенням ефекту тіні.

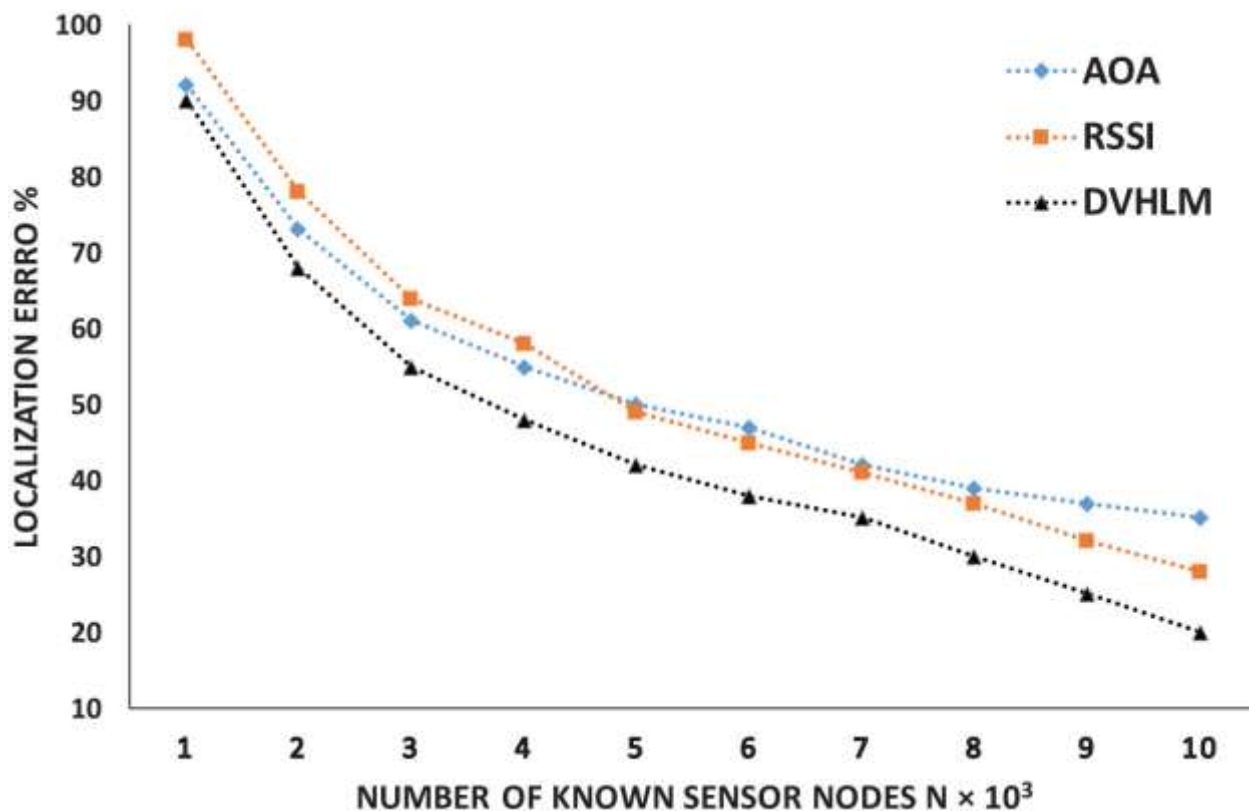


Рис. 3.2

Було оцінено вплив невідомої щільності вузла датчика на помилку локалізації. Моделювання проводилося з цікавою областю, яка містила близько 5000 відомих вузлів, а щільність невідомих вузлів було збільшено зі 100 до 1000 вузлів. Моделювання повторювалося десять разів, і кількість успішно локалізованих невідомих вузлів реєструвалася для кожного запуску. На малюнку 3.2 представлені результати відсотка помилок локалізації зі збільшенням щільності невідомих вузлів. На графіку видно, що запропонований метод DVHLM перевершив методи локалізації AOA та RSSI з точки зору точності локалізації. Результати також показують, що точність локалізації краща в повністю охопленій області інтересу з відомими сенсорними вузлами.

Крім того, результати показують, що запропонований метод є більш стійким до збільшення щільності невідомих вузлів. Можна помітити, що відсоток помилок локалізації DVHLM є відносно стабільним навіть із більшою щільністю невідомих вузлів, тоді як помилки методів локалізації AOA та RSSI зростають зі збільшенням щільності. Таку поведінку можна пояснити тим фактом, що DVHLM використовує кількість переходів, яка відносно нечутлива до щільності вузлів у мережі. На малюнку 3.2 показано відсоток помилок локалізації для невідомих вузлів датчика. Результати показують, що запропонований метод DVHLM перевершив методи локалізації AOA та RSSI. Графік показує, що зі збільшенням щільності невідомих вузлів відсоток помилок локалізації також зріс для всіх методів. Проте запропонований метод DVHLM має менший відсоток помилок локалізації порівняно з методами AOA та RSSI, що вказує на його кращу продуктивність у обробці зростаючої щільності невідомих вузлів.

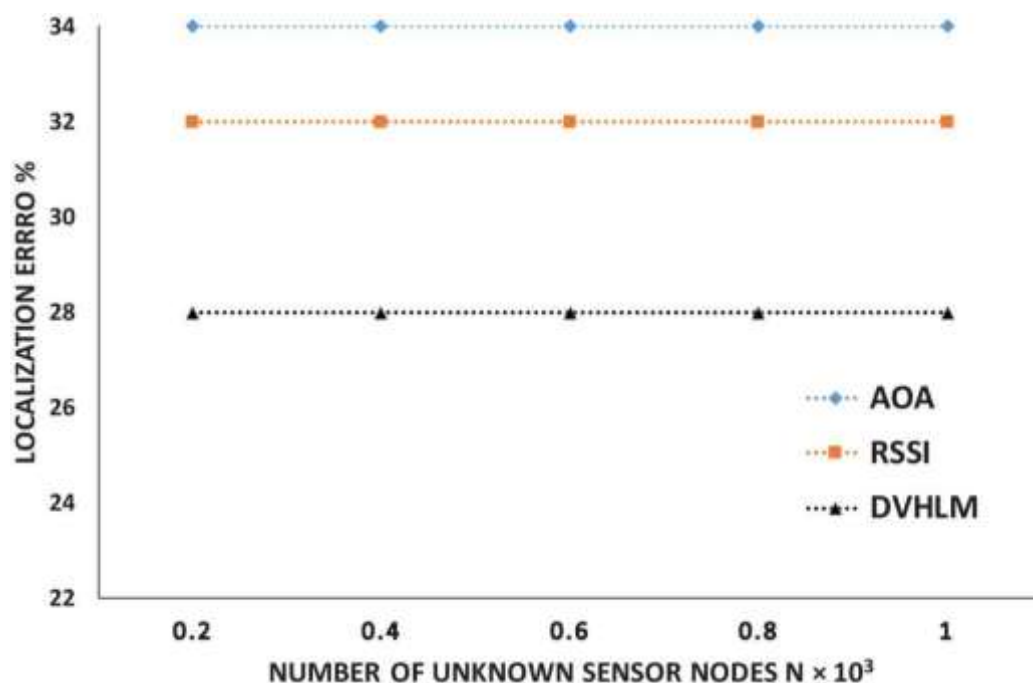


Рис. 3.3

У рисунку 3.3 продемонстровано вплив затінення на помилку локалізації. Для виконання цього експерименту установка для моделювання використовувала 7000 розташованих вузлів і 70 дислокованих вузлів. Ефект

затінення було збільшено з 0 м до 100, і запропонований метод DVHLM був проаналізований. Для кожного прогону моделювання кількість успішних локалізацій дислокованих вузлів датчика підраховувалась за допомогою локалізованих вузлів, а результати записувалися у вигляді відсотка затінення. Результати цього експерименту вказують на те, що запропонований метод DVHLM перевершує методи RSSI і AOA з точки зору помилки локалізації. Запропонований метод забезпечує найкращу ефективність, тоді як AOA є другим найкращим методом. Ці висновки узгоджуються з результатами попередніх експериментів (Таблиця 3.2).

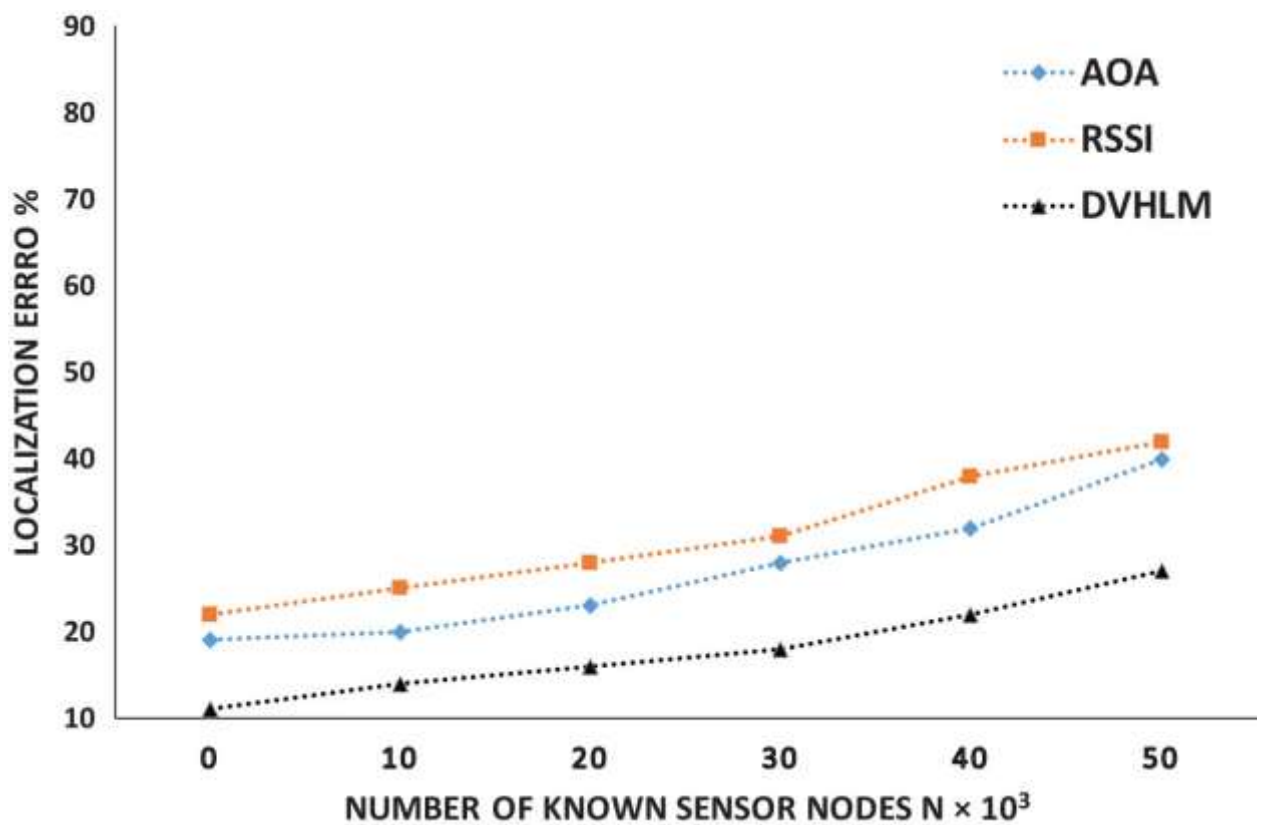


Рис. 3.4

Помилка локалізації з ефектом затінення.

Порівняння відсотка помилок локалізації запропонованого методу DVHLM із сучасними методами локалізації

Таблиця 3.2

Метод	Похибка локалізації (м)
Пропонований спосіб	3.5
DV-хоп	4.0
Багатовимірне масштабування (MDS)	4.2
Метод бездіапазонної локалізації (RFLA)	4.5
Індикатор рівня отриманого сигналу (RSSI)	5.0
АоА	6.5

Загалом детальні експерименти демонструють, що запропонований метод DVHLM має кращу продуктивність з точки зору помилки локалізації з відомими вузлами, помилки локалізації з дислокованими вузлами та помилки локалізації з ефектом затінення. Ці висновки є переконливими доказами того, що запропонований метод є ефективним для точної локалізації сенсорних вузлів у WSN.

3.3 Обговорення

Було представлено комплексну оцінку запропонованого DVHLM і порівняння його продуктивності із найсучаснішими методами локалізації. Оцінка включає низку показників, зокрема точність локалізації, помилку локалізації та складність обчислення. Стосовно аспектів підвищення продуктивності нашої запропонованої моделі, варто зазначити, що підхід використовує комбінацію добре встановлених методів, таких як трилатерація та PSO, щоб оцінити розташування невідомих вузлів. Трилатерація обчислює положення невідомого вузла на основі його відстані від кількох AN. Метод підвищує точність трилатерації, використовуючи PSO, який є потужним методом оптимізації, який уточнює оцінку позиції вузла. Крім того, метод включає стрибок вектора відстані, який полегшує зв'язок між вузлами для отримання інформації про відстань, яка використовується для оцінки розташування невідомих вузлів. Ця техніка зменшує кількість AN, необхідних для локалізації, і покращує загальну точність процесу локалізації.

Запропонований DVHLM має значні наслідки для WSN реального часу. У цьому методі використовується комбінація таких методів, як трилатерація та PSO для оцінки розташування невідомих вузлів, що підвищує точність процесу локалізації. Крім того, включення стрибкоподібної зміни вектора відстані зменшує кількість AN, необхідних для локалізації, і покращує загальну точність процесу. Запропоноване рішення може бути застосоване в різних програмах реального часу, таких як моніторинг навколишнього середовища, точне землеробство та військові програми. Його можна використовувати для визначення місцезнаходження неправильно розташованих вузлів у мережі та покращення загальної продуктивності мережі. Крім того, запропоноване рішення може зменшити обчислювальну складність процесу локалізації, що є вирішальним фактором у мережах реального часу. Отже, очікується, що запропоноване рішення матиме значний вплив на WSN у реальному часі. Подальші дослідження можуть вивчити потенційні застосування та наслідки запропонованого рішення в сценаріях реального світу.

Точність запропонованого методу залежить від кількості доступних AN та їх розміщення в мережі. Точність методів, заснованих на трилатерації, знижується, оскільки кількість AN зменшується, а вузли знаходяться далеко один від одного. Таким чином, у сценаріях, де є кілька AN або AN розташовані далеко одна від одної, запропонований метод може працювати погано. Запропонований метод ґрунтується на вимірюванні відстані між вузлами, на які можуть впливати перешкоди сигналу, такі як завмирання або затухання, що призводить до неточних вимірювань відстані та призводить до неправильної локалізації вузла. Пропонований метод передбачає складні розрахунки, що включають трилатерацію та PSO. Тому це може бути неможливим для пристроїв із обмеженими ресурсами та обмеженою обчислювальною потужністю та пам'яттю.

Висновок

DVHLM для локалізації в WSN[22]. Цей метод використовується для локалізації в реальному часі, коли положення вузла може бути зміщеним і потребує уваги. Запропонований метод складається з чотирьох основних етапів, включаючи розрахунок координат, обчислення відстані, оцінку положення дислокованого вузла та корекцію оцінки. Методика PSO використовується для вибору вузлів-кандидатів і розрахунку їх координат. Запропонований DVHLM порівнюється з методами локалізації AOA та RSSI для перевірки продуктивності. Запропонований метод досяг кращих результатів щодо помилки локалізації з відомими вузлами, помилки локалізації з дислокованими вузлами та помилки локалізації з ефектом затінення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У процесі виконання цієї дипломної роботи були успішно вирішені всі поставлені завдання, а саме проведено аналіз методів визначення координат сенсорів в мобільних сенсорних мережах.

Основні результати дослідження включають наступне:

1. Було проаналізовано методів локалізації бездротових сенсорних мереж.
2. Було проаналізовано особливості та обмеження кожного методу локалізації бездротових сенсорних мереж у мобільній сенсорній мережі.
3. Було розроблено та вдосконалено методи обробки та інтеграції даних з різних сенсорів для отримання більш точних координат сенсорів.
4. Було виконано експериментальне дослідження та порівняння ефективності різних методів локалізації координат сенсорів у реальних умовах мобільної сенсорної мережі.
5. Розроблено рекомендації щодо використання оптимального методу локалізації координат сенсорів у конкретних сценаріях застосування мобільної сенсорної мережі.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що наукові положення, розроблені в дисертації, формують методологічну основу для підвищення ефективності локалізації окремих вузлів БСМ при низькій щільності їх розміщення. Це дає можливість: визначати координати сенсорів за умов низької щільності розміщення вузлів; підвищувати надійність локалізації сенсорів у випадку виходу з ладу частини вузлів; покращувати точність визначення координат сенсорів; знижувати обчислювальне навантаження на елементи мережі під час процесу локалізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стрела Т.С., Романюк В.О., Жук О.В, Олексенко В.П. Аналіз методів підвищення та забезпечення якості обслуговування в бездротових сенсорних мережах. Збірник наукових праць ВІТІ № 1. 2018. С. 141-148. URL: https://www.viti.edu.ua/files/zbk/2018/17_1_2018.pdf
2. Nidal J. M. Optimal UAS Assignments and Trajectories for Persistent Surveillance and Data Collection from a Wireless Sensor Network. Fort Belvoir, VA : Defense Technical Information Center, 2015. URL: <https://doi.org/10.21236/ad1003575>
3. Сушин І.О., Лисенко О.І., «Програма оцінки зв'язності вузлів безпроводових епізодичних мереж при умові застосування бпла», Сімнадцята міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ», с. 36-41, 18–21 квітня 2023р, ISSN (print) 2663-502X, ISSN (online) 2664-3057. Доступ: <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/278918/273569>
4. Романюк А.В. Метод временной кластеризации узлов беспроводных сенсорных сетей для сбора информации мониторинга с использованием БПЛА / А.В. Романюк // Міжвідомчий науково-технічний збірник „Адаптивні системи автоматичного управління”, № 2 (33). – 2018. – С. 106 – 117.
5. Романюк В.А., Стрела Т.С, Класифікація методів кластеризації в безпроводових сенсорних мережах, збірник наукових праць ВІТІ №3, 2018, с.79-86. Доступ: https://www.viti.edu.ua/files/rom/2018/5_2018.pdf
6. Гримуд А., Романюк В. Модель пошуку траєкторії польоту телекомунікаційною аероплатформою для збору даних з вузлів кластеризованої бездротової сенсорної мережі військового призначення. Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень НУОУ імені Івана Черняхівського. 2022. С. 118–128. URL: <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-1-74/118-128>

7. Романюк А.В. Цільові функції управління вузлами безпроводних сенсорних мереж для моніторингу об'єктів критичної інфраструктури / А.В. Романюк // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 28 (67), № 2, 2017. – С. 49 – 54.

8. Methodology of the tactical wireless sensor networks control / A. Zhuk et al. 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 20–24 February 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/tcset.2018.8336374>

9. Романюк А. Методи збору даних з безпроводових сенсорних мереж телекомунікаційними аероплатформами. Автореферат. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 2021. С. 6-11.

10. Hrymud A., Romaniuk V. Modifying a method for direct data collection by a telecommunication aerial platform from nodes of wireless sensor networks. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 4, no. 9(118). P. 15–29. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263559>

11. Chumachenko S., Lysenko O., Novikov V., Furtat O., Furtat S., Sushyn I., Development of the method of support and increase of connectivity wireless networks using UAVs, «CHALLENGES AND THREATS TO CRITICAL INFRASTRUCTURE», Detroit (Michigan, USA), 2023, p. 277-283. ISBN-10/979-8-218-22315-1, Available: <https://conference.cyberspace.org.ua/wp-content/uploads/2023/06/Monograph-09-06-2023.pdf>

12. Oleksandr Lysenko, Olena Tachinina, Valeriy Novikov, Oleksandr Guida, Fedir Kirchu, Ihor Sushyn, «Methodology of Synthesizing Digital Regulators in Precision Electric Drives for Orientation and Stabilization Target Tracking System of Mobile Robot's Directional Sensors», CEUR Workshop Proceedings, 2023, Vol. 3513, pp. 51-63. ISSN 1613-0073. Available: <https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper05.pdf>

13. Sova O.Y. Hierarchical model of decision acceptance in intelligent manet control system / O.Y. Sova, V.A. Romanyuk, A.V. Romanyuk, O.I. Lysenko, I.V.

Uryadnikova // Milan Rastislav Stefanik, Liptovskiy Mikulas. No 1, Vol. 11, 2016. P. 14 – 20. ISSN 1336-8885 (print). ISSN 2453-7632 (on-line). EBSCO

14. Романюк А.В. Класифікація задач системи управління епізодичної радіомережі на основі телекомунікаційних аероплатформ / А.В. Романюк, С.В. Валуйський, О.І. Лисенко // Міжнародна науково-технічна конференція „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2015. Київ. – 2015. – С. 381 – 383.

15. Chumachenko S., Lysenko O., Tachinina O., Furtat O., Furtat S., Sushyn I., Method of collecting information on the condition of critical infrastructure objects from wireless sensor network nodes. «CHALLENGES AND THREATS TO CRITICAL INFRASTRUCTURE», Detroit (Michigan, USA), 2023, p. 171-178. ISBN-10/979-8-218-22315-1, Available: <https://conference.cyberspace.org.ua/wp-content/uploads/2023/06/Monograph-09-06-2023.pdf>

16. Niculescu D, Nath B. DV based positioning in ad hoc networks. Telecommun Syst. 2003;22:267–80.[10.1023/A:1023403323460Search in Google Scholar](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=10.1023/A:1023403323460)

17. BenSaleh MS, Saida R, Kacem YH, Abid M. Wireless sensor network design methodologies: A survey. J Sens. 2020;2020:1–3.[10.1155/2020/9592836Search in Google Scholar](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=10.1155/2020/9592836)

18. Qureshi KN, Abdullah AH. Localization-based system challenges in vehicular ad hoc networks: Survey. Smart Computing Review. 2014;4(6):515–28.[10.6029/smartcr.2014.06.009Search in Google Scholar](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=10.6029/smartcr.2014.06.009)

19. Al Qundus J, Dabbour K, Gupta S, Meissonier R, Paschke A. Wireless sensor network for AI-based flood disaster detection. Ann Oper Res. 2020;319:1–23.[10.1007/s10479-020-03754-xSearch in Google Scholar](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=10.1007/s10479-020-03754-x)

20. Kulkarni VR, Desai V. Sensor localization in wireless sensor networks using cultural algorithm. Int J Swarm Intell Res (IJSIR). 2020;11(4):106–22.[10.4018/IJSIR.2020100105Search in Google Scholar](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=10.4018/IJSIR.2020100105)

21. Kanchi SP. Localization in wireless sensor networks using bilateration enhanced by negative knowledge. Int J Comput Appl. 2020;975:8887.[10.5120/ijca2020920720Search in Google Scholar](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=10.5120/ijca2020920720)

22. Shrivastava A, Gupta N, Srivastav S. Aosp-based secure localization for wireless sensor network. In Security and Privacy Issues in Sensor Networks and IoT. IGI Global; 2020. p. 125–44. [10.4018/978-1-7998-0373-7.ch005](https://doi.org/10.4018/978-1-7998-0373-7.ch005) [Search in Google Scholar](#)

23. Теорія ймовірностей в радіотехніці: підручник / В. М. Васильєв, С. Я. Жук. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. с. 292–205.

24. **Сушин І.О., Буткевич Г.Ю.** Методика оцінки зв'язності вузлів бездротової сенсорної мережі при умові використання багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ // Фаховий журнал рівня Б. – Том 34 (73), № 6, 2024 р. URL: <https://tech.vernadskyjournals.in.ua/34-73-6>

25. **Буткевич Г.Ю., Лисенко О.І.** Інноваційні підходи до визначення координат сенсорів у мобільній сенсорній мережі для оптимізації міської інфраструктури та ефективного використання ресурсів // Всеукраїнська науково-практична конференція "Практичні питання функціонування і відновлення об'єктів муніципальної інфраструктури та промисловості України в сучасних умовах". – с. 36-41. URL: <http://surl.li/nuity>

26. **Буткевич Г.Ю.** Аналіз сенсорної системи контролю положення дронів під час шоу // Вісімнадцята міжнародна науково-технічна конференція "ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ". – с. 259-261, 15–19 квітня 2024 р. ISSN (print) 2663-502X, ISSN (online) 2664-3057. Доступ: <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/278918/273569>