

**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

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування  
інфокомунікацій»**

**зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

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

Виконав:

студент II курсу, групи ТЗ-11мп

Мулик Андрій Вікторович \_\_\_\_\_

Керівник:

Професор кафедри ТК НН ІТС ,д.т.н., професор

Лисенко О.І. \_\_\_\_\_

Рецензент:

Професор кафедри ІКТС НН ІТС, д.т.н., с.н.с.

Скулиш М.А. \_\_\_\_\_

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

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2022 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 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій КРАВЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**

**Мулик Андрій Вікторович**

1. Тема дисертації «Розвиток методів визначення координат сенсорів у мобільній сенсорній мережі», науковий керівник дисертації Лисенко Олександр Іванович, професор, д.т.н., затверджені наказом по університету від «28» жовтня 2022 р. № 3995-с.
2. Термін подання студентом дисертації 10.12.2022 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. Дослідити використання UWSN та представлену математичну модель на прикладі одиночного радіомаяка для отримання координат зануреного мобільного радіомаяка.
  2. Проаналізувати критерії оцінки працездатності і застосовності алгоритмів визначення координат в сенсорних мережах.

3. Описати методику оперативного розрахунку координат проміжних точок маршруту руху літаючого інформаційного робота (ЛІР), який збирає інформацію з мобільних сенсорів мобільної бездротової сенсорної мережі (МБСМ).

4. Вирахувати якісні показники роботи запропонованого алгоритму визначення координат об'єктів в сенсорній мережі на базі технології ZigBee.

5. Розробка стартап проекту.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу

1. Тема, мета, актуальність, задачі дослідження.
2. Аналіз сучасних бездротових технологій для побудови сенсорних мереж.
3. Метод визначення координат з використанням визначника Кейлі-Менгера
4. Метод оперативного обчислення координат проміжних пунктів руху літаючого інформаційного робота
5. Загальні висновки

7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Дата видачі завдання “15 ” жовтня \_\_\_\_\_ 2021 р.

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз завдання та літературних джерел	4.09.2022-30.09.2022	виконано
2	Аналіз особливостей сенсорних мереж	1.10.2022-15.10.2022	виконано
3	Опис методу визначення координат з використанням визначника Кейлі-Менгера	16.10.2022-30.10.2022	виконано
4	Опис методу оперативного обчислення координат проміжних пунктів маршруту руху ЛІР	31.10.2022-14.11.2022	виконано
5	Опис методу імітаційного моделювання на базі технології ZigBee	15.11.2022-30.11.2022	виконано
6	Розробка стартап проекту	1.12-2022-14.12.2022	виконано

Студент

Андрій МУЛИК

Науковий керівник дисертації

Олександр ЛИСЕНКО

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація викладена на 82 с., містить 37 рис., 14 табл., 18 джерел.

**Мета роботи** – аналіз методів визначення координат сенсорів в мобільних сенсорних мережах, а також дослідження методу визначення координат з використанням визначника Кейлі-Менгера.

Повертаючись до історії розвитку науки і техніки задачі пов'язані із визначенням місця розташування зустрічаються в різних галузях: робототехніці, морській та наземній навігації, радіолокації. Сам процес визначення координат об'єкту зазвичай складається з виміру будь-яким чином взаємного місця розташування щодо орієнтирів, координати яких апріорі відомі і подальшого розрахунку координат на основі отриманої інформації. Зараз визначення координат об'єктів в просторі вже визначається автоматично за допомогою конкретної апаратури завдяки використанню радіохвиль; при цьому в якості орієнтирів використовуються штучно створені супутники, маяки тощо.

У даній роботі було досліджено методи визначення координат в мобільних сенсорних мережах. Також буде більш конкретно розглянуто метод визначення координат з використанням визначника Кейлі-Менгера.

**Актуальність:** Повертаючись до історії розвитку науки і техніки задачі пов'язані із визначенням місця розташування зустрічаються в різних галузях: робототехніці, морській та наземній навігації, радіолокації. Сам процес визначення координат об'єкта зазвичай складається з виміру будь-яким чином взаємного місця розташування щодо орієнтирів, координати яких апріорі відомі і подальшого розрахунку координат на основі отриманої інформації. Зараз визначення координат об'єктів в просторі вже визначається автоматично за допомогою конкретної апаратури завдяки використанню радіохвиль; при цьому в якості орієнтирів використовуються штучно створені супутники, маяки тощо.

### **Задачі дослідження:**

1. Дослідити використання UWSN та представлену математичну модель на прикладі одиночного радіомаяка для отримання координат зануреного мобільного радіомаяка.

2. Проаналізувати критерії оцінки працездатності і застосовності алгоритмів визначення координат в сенсорних мережах.

3. Описати методику оперативного розрахунку координат проміжних точок маршруту руху літаючого інформаційного робота (ЛІР), який збирає інформацію з мобільних сенсорів мобільної бездротової сенсорної мережі (МБСМ).

4. Вирахувати якісні показники роботи запропонованого алгоритму визначення координат об'єктів в сенсорній мережі на базі технології ZigBee.

5. Розробка стартап проекту

**Мета роботи** – аналіз методів визначення координат сенсорів в мобільних сенсорних мережах, а також дослідження визначення координат з використанням визначника Кейлі-Менгера.

**Об'єкт дослідження** – мобільна безпроводна сенсорна мережа(МБСМ);

**Предмет дослідження** – розвиток методів визначення координат сенсорів у мобільній сенсорній мережі;

**Ключові слова:** стандарт ZigBee, мобільні сенсорні мережі, визначник Кейлі-Менгера, метод визначення координат сенсорів в бездротових сенсорних мережах, Літаючий інформаційний робот.

## ABSTRACT

This work contains 82 pages, 37 figures, 14 tables, 18 sources.

The purpose of the work is the analysis of the methods of determining the coordinates of sensors in mobile sensor networks, as well as the study of the method of determining the coordinates using the Cayley-Menger determinant.

Going back to the history of the development of science and technology, tasks related to location determination are found in various fields: robotics, sea and land navigation, radar. The very process of determining the coordinates

of the object usually consists of measuring in any way the relative location in relation to the landmarks, the coordinates of which are known a priori, and the subsequent calculation of the coordinates based on the received information. Now the definition

the coordinates of objects in space are already determined automatically with the help of specific equipment thanks to the use of radio waves; at the same time artificially created satellites, beacons, etc. are used as landmarks.

In this work, the methods of determining coordinates will be investigated in mobile sensor networks. The method of determining coordinates using the Cayley-Menger determinant will also be considered more specifically.

Relevance: Returning to the history of the development of science and technology, tasks related to determining the location are found in various fields: robotics, sea and land navigation, radar. The very process of determining the coordinates of an object usually consists of measuring in any way the relative location relative to landmarks, the coordinates of which are known a priori, and the subsequent calculation of the coordinates based on the received information. Now the determination of the coordinates of objects in space is already determined automatically with the help of specific equipment thanks to the use of radio waves; at the same time artificially created satellites, beacons, etc. are used as landmarks.

Research objectives:

1. Investigate the use of UWSN and the presented mathematical model on the example of a single radio beacon to obtain the coordinates of a submerged mobile radio beacon.
2. To analyze the criteria for evaluating the performance and applicability of algorithms for determining coordinates in sensor networks.
3. To describe the method of operative calculation of the coordinates of the intermediate points of the route of the flying information robot (FIR), which collects information from mobile sensors of the mobile wireless sensor network (MBSM).
4. Calculate the performance indicators of the proposed algorithm for determining the coordinates of objects in a sensor network based on ZigBee technology.
5. Development of a startup project

The purpose of the work is to analyze the methods of determining the coordinates of sensors in mobile sensor networks, as well as to study the determination of coordinates using the Cayley-Menger determinant.

The object of research is a mobile wireless sensor network (MBSM);

The subject of research is the development of methods for determining the coordinates of sensors in a mobile sensor network;

Keywords: ZigBee standard, mobile sensor networks, Cayley-Menger determinant, method of determining sensor coordinates in wireless sensor networks, Flying information robot.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	11
РОЗДІЛ 1.....	13
АНАЛІЗ СУЧАСНИХ БЕЗДРОТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПОБУДОВИ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ .....	13
1.1 Особливості бездротових сенсорних мереж .....	14
1.2 Апаратна архітектура сенсора .....	17
1.3 Перспективи впровадження БСМ .....	21
РОЗДІЛ 2.....	22
ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ЗАНУРЕНИХ МОБІЛЬНИХ ДАТЧИКІВ ДЛЯ НЕПАРАЛЕЛЬНОГО СТАНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИЗНАЧНИКА КЕЙЛІ-МЕНГЕРА.....	22
2.1 Вступ .....	22
2.2 Загальна характеристика .....	23
2.3. Методологія .....	24
2.4 Результати та обговорення.....	28
2.5 Обмеження.....	33
Висновки .....	33
РОЗДІЛ 3.....	34
МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ОБЧИСЛЕННЯ КООРДИНАТ ПРОМІЖНИХ ПУНКТИВ МАРШРУТУ РУХУ ЛІТАЮЧОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО РОБОТА.....	34
3.1 Вступ .....	34
3.2 Постановка проблеми.....	35
3.3 Визначення структурної та інформаційної зв'язності .....	36
3.4 Математична постановка проблеми.....	38
3.5 Алгоритм кластеризації.....	39
3.6 Моделювання функціонування мобільної бездротової сенсорної мережі з використанням запропонованого алгоритму.....	40
Висновки .....	43
РОЗДІЛ 4.....	46



МЕТОД ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ СЕНСОРІВ В СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ ZIGBEE.....	46
4.1 Модель сенсорної мережі.....	48
4.2 Модель об'єкта мережі.....	50
4.2.1 Фізичний рівень .....	52
4.2.2 Канальний рівень .....	53
4.2.3 Мережевий рівень.....	55
4.3 Результати моделювання.....	56
4.3.1 Оцінка відстані.....	57
4.3.2 Оцінка координат.....	65
Висновки .....	70
РОЗДІЛ 5.....	73
РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ .....	73
1.1 Опис ідеї стартап проєкту.....	73
1.2 Аналіз можливостей ринку .....	75
Висновки .....	77
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ .....	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БСМ	Бездротова сенсорна мережа
ЛІР	Літальний інформаційний робот
МБСМ	Мобільна бездротова сенсорна мережа
ОС	Операційна система
UNSN	Підводна бездротова сенсорна мережа

## ВСТУП

Повертаючись до історії розвитку науки і техніки задачі пов'язані із визначенням місця розташування зустрічаються в різних галузях: робототехніці, морській та наземній навігації, радіолокації. Сам процес визначення координат об'єкту зазвичай складається з виміру будь-яким чином місця розташування щодо орієнтирів, координати яких нам відомі заздалегідь і подальшого їхнього розрахунку на основі отриманої інформації. Зараз визначення координат об'єктів в просторі проходить автоматично за допомогою конкретної апаратури завдяки використанню радіохвиль; при цьому в якості орієнтирів використовуються штучно створені супутники, маяки тощо в залежності від сфери діяльності в якій нам потрібно вичислити координати. Але послідовність дій після якої ми отримаємо результат у вигляді отриманих координат залишається тим самим, що і до автоматизації.

Сам термін «сенсорна мережа» (Sensor Network), ми дізнались відносно нещодавно, на теперішній час, це є вже сталим поняттям, яке має величезне поширення, і означає, стійку до відмови окремих елементів мережу, що складається з великої кількості малих напівпровідникових пристроїв, що зв'язані один з одним бездротовим зв'язком; елементи мережі не обслуговуються і не вимагають спеціальної установки. Кожен вузол мережі може містити вбудовані сенсори фізичних параметрів навколишнього середовища, наприклад, світло, температура, світло, тиск, вологість повітря тощо, а також мікросхеми для первинної обробки інформації та зберігання

отриманих даних. Кількість вузлів в бездротовій сенсорній мережі (БСМ) визначається лише областю застосування і фінансовим обмеженням, і завдяки низькій ціні окремих пристроїв (від кількох доларів і вище) може бути дуже великою (тисячі та вище).

БСМ досить легко адаптуються для вирішення багатьох різних завдань майже в будь-якій галузі діяльності. Найкраще ми можемо побачити застосування таких мереж в організації той чи іншої системи моніторингу і контролю та для створення систем швидкого реагування в надзвичайних ситуаціях. Найбільш помітним для людського ока буде виконання наступних задач: використання протипожежної системи, система безпеки, а саме: контроль периметру або навколишнього середовища поблизу за допомогою камер спостереження, також контроль за зберігання радіоактивних матеріалів, біологічних та хімічних речовин.

Адаптуючі можливості мереж такого типу для вирішення різноманітних задач , а також використання останніх наукових досягнень робить сенсорні мережі актуальною і передовою мережевою технологією, яка може призвести до формування дуже великого ринку бездротових сенсорних мереж.

Дана робота присвячена дослідженню методів визначення координат в мобільних сенсорних мережах. Також буде показано методи в конкретних сферах діяльності і більш детально описане використання БСМ для того чи іншого випадку.

**Мета роботи** – аналіз методів визначення координат сенсорів в мобільних сенсорних мережах, а також дослідження визначення координат з використанням визначника Кейлі-Менгера.

**Об'єкт дослідження** – мобільна безпроводна сенсорна мережа(МБСМ);

**Предмет дослідження** – розвиток методів визначення координат сенсорів у мобільній сенсорній мережі;

## РОЗДІЛ 1.

### АНАЛІЗ СУЧАСНИХ БЕЗДРОВОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПОБУДОВИ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

На теперішній час бездротові мережі є неодмінною складовою нинішніх телекомунікацій. Бездротовий зв'язок має велику кількість переваг: велику швидкість, мобільність, можливість доступу в інтернет, а також підключення до мережі іншого типу тощо. Саме тому кількість користувачів бездротових технологій збільшується кожного дня. Ринок телекомунікацій пропонує надвеликий вибір бездротових технологій, сотні компаній пропонують свої послуги.

Таблиця 1.1

Порівняльні характеристики технологій Bluetooth, Wi-Fi і ZigBee

Бездротова технологія (стандарт)	ZigBee (IEEE 802.15.4)	Wi-Fi (IEEE 802.11b)	Bluetooth (IEEE 802.15.1)
Частотний діапазон	2,4-2,483 ГГц	2,4-2,483 ГГц	2,4-2,483 ГГц
Пропускна здатність, кбіт/с	250	11000	723,1
Розмір стека протоколу, кбайт	32-64	Більше 1000	Більше 250
Час безперервної автономної роботи від батареї, дні	100-1000	0,5-5	1-10
Максимальна кількість вузлів в мережі	65536	10	7
Діапазон дії, м	10-100	20-300	10-100
Галузі застосування	Віддалений моніторинг і управління	Передача мультимедійної інформації	Заміщення дротового з'єднання

Найбільш відомими прикладами бездротової передачі даних є такі: Wi-Fi, Bluetooth, EDGE, ZigBee. Вибір підходящої технології залежить в першу чергу від потреб користувача. Критеріями можуть бути наприклад

максимальна кількість вузлів в мережі, частотний діапазон, пропускна здатність, енергоефективність і так далі..

Порівняти деякі приклади бездротової мережі можна за табл. 1.1.

Завдяки таблиці 1.1 ми можемо побачити, що максимальна кількість вузлів, а також найтриваліша автономна робота від батареї в мережі у технології ZigBee, заснованої на стандарті IEEE 802.15.4.

### **1.1 Особливості бездротових сенсорних мереж**

Поняття «сенсорна мережа» визначає розподілену, стійку до відмови деяких одиниць мережу, що самоорганізується та складається з великого числа малогабаритних і дешевих напівпровідникових пристроїв, що обмінюються інформацією по бездротовому зв'язку, що не обслуговуються і не потребують спеціальної установки.

Система SOSUS (Sound Surveillance System, Звукова Система Спостереження) є одним з найстаріших прототипів сенсорної мережі. Її призначенням було виявляти та ідентифікувати підводні човни. Згодом система знайшла своє місце у цивільній сфері, де її використовують для моніторингу різних явищ, наприклад сейсмоактивності.

Ще одним зразком сенсорної мережі є протиповітряний комплекс, розроблений за часів холодної війни для оборони США та Канади. Це проявлялося у використанні аеростатів у якості точок здійснення контролю та збору інформації. Згодом до них додали літаки повітряного попередження і управління AWACS (Airborne Warning and Control System).

Дані системи чудово відображають початкові етапи розвитку сенсорних мереж, коли в першу чергу йшлося про результат та широко залучалась людська праця, що результувало у меншій ефективності роботи, а оптимізація процесу не поставала як питання. Такі системи, як наслідок, були досить дорогими та значно залежали від людей, яким вручну доводилося керувати роботою та гарантувати необхідний функціонал.

Бездротові ж сенсорні мережі активного розвитку зазнали в кінці 20 століття, у середині 90-х, тоді як суттєве спрощення та зменшення вартості виробництва припало на початок нульових, чому сприяв розвиток мікроелектроніки.

Нині бездротові сенсорні мережі не мають аналогів як вирішення проблеми моніторингу та контролю, що потребують надзвичайно швидкої та достовірної роботи датчиків. Сенсори, що поєднані в подібну мережу, утворюють здатну до самоорганізації систему, що здатна збирати, опрацьовувати та передавати далі інформацію. Сенсорна мережа також здатна продовжувати власну роботу у випадку виходу з ладу вузлів без втрати якості за рахунок використання сусідніх вузлів у якості аналога. Для передачі повідомлень визначається найбільш оптимальний для використання маршрут.

Важливою особливістю бездротових сенсорних мереж від тих, що їй передували (комп'ютерні, телефонні), є відсутність постійної інфраструктури. Всі термінали мережі мають змогу виконувати функціонал як кінцевого пристрою (отримувача), так і транзитного вузла. Дана характеристика продемонстрована на рис. 1.1.

Передача даних здійснюється шляхом перенаправлення інформації від найближчого вузла, а не на базову станцію або точку доступу як в традиційних мережах з фіксованою інфраструктурою. Такі мережі називаються багатокроковими (multi-hop).

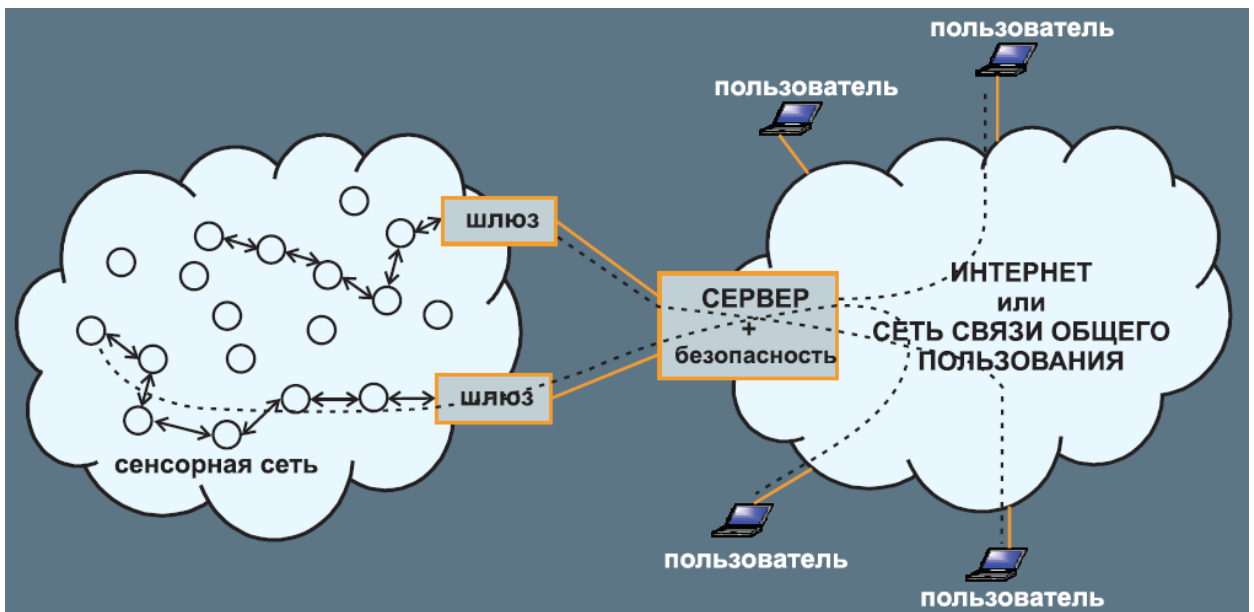


Рис. 1.1 – Приклад з'єднання сенсорів мережі

Побудова ефективних і надійних сенсорних мереж є нелегким завданням, що повинне враховувати певні аспекти.

По-перше, стійкість при несправності. Сенсорна мережа повинна продовжувати повноцінно функціонувати і надавати необхідні дані навіть якщо сенсор або група сенсорів, що належать мережі, вийде з ладу. Протоколи маршрутизації та алгоритми управління мережею повинні забезпечувати швидку адаптацію мережі до нової фізичної топології.

По-друге, масштабованість. Кількість вузлів в мережі може змінюватися в залежності від розвитку самої мережі, на сьогоднішній день розмір сенсорних мереж може обмежуватися як кількома сотнями, так і кількома тисячами. Істотне збільшення кількості сенсорів може призвести до перевантаження маршрутних таблиць, блокування сенсорів, і, як наслідок, до виходу сенсорної мережі з ладу.

По-третє, топологія. Зміна топології бездротової сенсорної мережі може бути викликана введенням нових сенсорів в діючу мережу, виходом з ладу сенсорів, що належать сенсорній мережі, а також у разі, якщо сенсори є мобільними.



Також слід зазначити обмеження апаратного забезпечення і бездротового інтерфейсу. Компактний розмір сенсорів є одним і головних вимог для широкого комерційного застосування, зменшення розміру і ваги апаратної частини сенсора допоможе збільшити кількість потенційних додатків сенсорних мереж. Сенсори для передачі інформації в мережі можуть використовувати різні бездротові технології зі специфічними характеристиками.

І, нарешті, споживання енергії. Сенсор через свій розмір може бути обладнаний тільки порівняно обмеженим джерелом живлення, тому збільшення терміну дії джерела живлення є одним із пріоритетних завдань, що вирішується не тільки шляхом збільшення часу життя джерела живлення, але і шляхом його ефективного використання [1].

## **1.2 Апаратна архітектура сенсора**

Сенсорний датчик складається з апаратної і програмної частини, як і будь-який інший телекомунікаційний вузол. У загальному випадку сенсор складається з наступних підсистем: прийняття, обробки даних, моніторингу, комунікаційної і джерела живлення (рис. 1.2).

Підсистема прийняття полягає, як правило, з аналогового пристрою, що знімає певну статистику і аналого-цифрового перетворювача. Підсистема обробки даних містить в собі центральний процесор і пам'ять, що дозволяють зберігати не тільки дані, що генеруються сенсором, але і службову інформацію, яка необхідна для коректного і повноцінного функціонування комунікаційної підсистеми. Підсистема моніторингу дозволяє сенсорі збирати дані про навколишнє середовище, такі як вологість, температура, тиск, магнітне поле, хімічний аналіз повітря тощо. Також сенсор може бути доповнений гіроскопом, акселерометром, що дає можливість для побудови системи позиціонування.

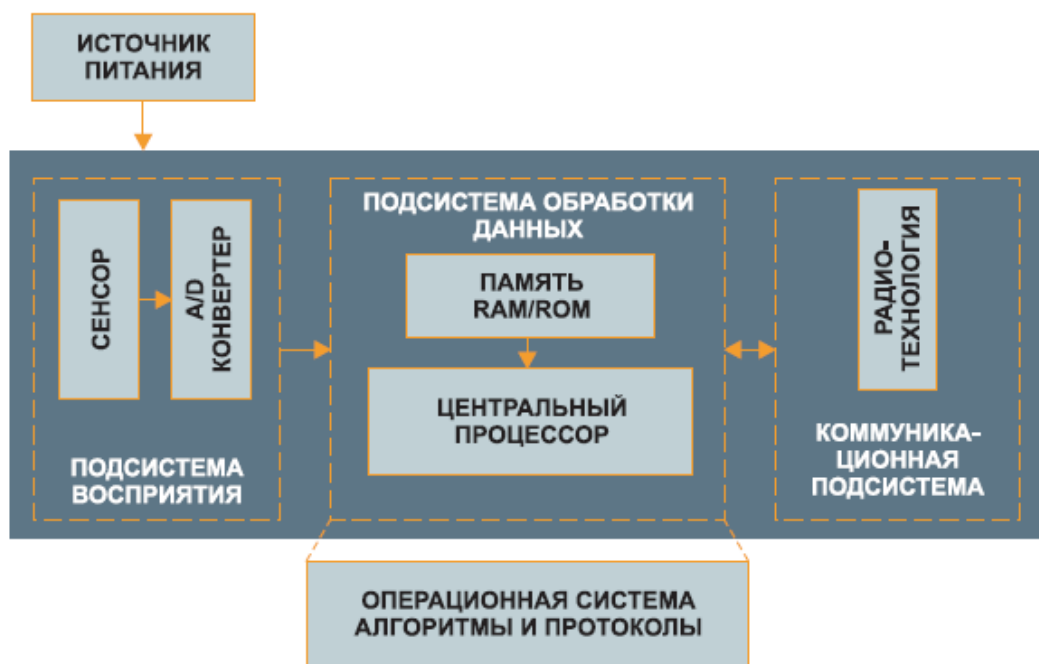


Рис. 1.2 – Загальна апаратна архітектура сенсора

Прогрес в області бездротового зв'язку і мініатюризація мікросхем відкривають нові горизонти в інформаційно-комп'ютерних технологіях. Крім багатокрокових мереж існують більш складні протоколи маршрутизації, коли наступний вузол вибирається на основі аналізу його характеристик, наприклад, рівень енергії, надійність тощо. Ситуація ускладнюється у разі, коли вузли бездротової сенсорної мережі пересуваються – топологія мережі стає динамічною.

Для реалізації сенсора як телекомунікаційного пристрою малого розміру (не більше одного кубічного сантиметра) необхідно враховувати багато технічних аспектів. Частота центрального процесора повинна бути не менше 20 МГц, обсяг оперативної пам'яті не менше 4 Кбайт, швидкість передачі не менше 20Кбіт/с. Оптимізація апаратної частини дозволить знизити розміри сенсора, але спричинить за собою збільшення його ціни. Операційну систему (ОС) необхідно оптимізувати з урахуванням архітектури центрального процесора, що використовується. Обмежені ресурси і малий розмір пам'яті стимулюють розміщення ОС в ПЗП. В даний час широко поширена ОС з відкритим кодом TinyOS, що дозволяє досить гнучко

управляти сенсорами різних виробників [2]. В області мережної взаємодії, обмежене джерело живлення в сенсорах накладає суттєві обмеження на використання радіотехнологій, що можуть бути застосовані в сенсорних мережах. Також слід зазначити, що обмежена продуктивність центрального процесора не дозволяє застосування стандартних протоколів маршрутизації IP-мереж – висока складність розрахунку алгоритму оптимального шляху перевантажить центральний процесор. На сьогоднішній день розроблена велику кількість спеціальних протоколів маршрутизації для сенсорних мереж.

Розробка технології передачі даних в сенсорних мережах є однією з найважливіших задач при побудові сенсорної мережі через те, що її специфічні архітектурні та системні характеристики накладають цілу безліч жорстких обмежень, серед яких слід підкреслити наступні:

- обмежені запаси енергії, через те, що радіус дії обмежений;
- обмежена продуктивність процесора;
- одночасне функціонування великої кількості вузлів на обмеженому просторі;
- рівнозначність вузлів, архітектура «клієнт-сервер» не може бути застосована у зв'язку з характерними для неї затримками;
- функціонування в неліцензованому спектрі частот;
- низька вартість.

В даний час розробка сенсорних мереж будується на стандарті IEEE 802.15.4/ZigBee, про який було згадано вище. Альянсом ZigBee передбачається, що радіодоступ стандарту ZigBee буде застосовуватися в таких додатках, як моніторинг, автоматизація виробництва, сенсори, безпека, контроль, побутова техніка та багато іншого. Таким чином, додатки сенсорних мереж можна розділити на кілька основних категорій:

- безпека, надзвичайні ситуації та військові операції;
- медицина і здоров'я;
- погода, навколишнє середовище та сільське господарство;
- фабрики, заводи, будинки, будівлі;

- транспортні системи і автомобілі.

Розглянемо випадки конкретного застосування сенсорних мереж в перерахованих вище категоріях. Сенсорні мережі можуть, як мінімум, використовуватися в наступних сценаріях.

Віддалений моніторинг стану хворого, наприклад, пульс, тиск, ЕКГ, рівень цукру в крові тощо. При цьому необхідна статистика знімається за допомогою спеціалізованого натільного або імплантованого сенсора і передається в централізовану базу даних, до якої має доступ лікарняний персонал. Слід зазначити, що для повноцінного функціонування такої системи, необхідно щоб вся територія лікарні була покрита БСМ. Подібні сценарії дуже важливі з соціальної точки зору через те, що передбачається, що клієнтами в основному будуть літні люди і люди з обмеженими можливостями.

Слід також відзначити поділ сенсорних мереж на комерційні та некомерційні. Така класифікація важлива через те, що при побудові сенсорної мережі необхідно спочатку визначити, чи буде статистика, зібрана мережею, доступна пересічним користувачам безкоштовно, на комерційній основі або вона носить корпоративний характер.

Можливість адаптації бездротових сенсорних мереж до вирішення надзвичайно широкого спектра завдань, а також використання останніх наукових та технологічних досягнень робить сенсорні мережі актуальною і передовою мережною технологією, яка може привести до формування досить великого ринку БСМ.

Переваги систем на основі сенсорних мереж:

- можливість розташування в важкодоступних місцях, куди складно і дорого тягнути звичайні дротові рішення;
- оперативність і зручність розгортання і обслуговування системи;
- надійність мережі в цілому – в разі виходу з ладу одного з вузлів, інформація передається через сусідні елементи;

- можливість додавання або виключення будь-якої кількості пристроїв з мережі;
- високий рівень проникнення крізь перешкоди (стіни, стелі) і стійкість до електромагнітних завад (завдяки високій частоті роботи системи – 2, ГГц);
- тривалий час роботи без заміни елементів живлення.

Таким чином, БСМ володіючи масою переваг знайшли своє застосування в сучасному світі телекомунікацій, а саме: системи автоматизації будівель, системи управління в промисловості, системи позиціонування.

### **1.3 Перспективи впровадження БСМ**

На сьогоднішній день можна оцінити вплив сенсорних мереж в житті людини, в різних галузях виробництва, областях природи. Велика кількість додатків, побудованих на основі БСМ, приведуть до поліпшень якості життя і комфорту. Моніторинг навколишнього середовища дозволить людині мати досить повну інформацію про нього, це дозволить підвищити надійність прогнозів, оптимізувати взаємодію людини з природою, що не тільки підвищить безпеку і комфорт життя людини, а й зменшить негативний вплив життєдіяльності людини на природу. Важливо відзначити, що реалізація ефективного моніторингу процесів виробництва дозволить знизити витрати і оптимізувати процес управління. В області національної безпеки сенсорні мережі є джерелом якісно нової інформації, що може бути стратегічною, тоді її отримання противником може привести до зниження загального рівня безпеки держави. У сфері економіки широке впровадження сенсорних мереж приведе до досить високої капіталізації сектора сенсорних мереж. На сьогоднішній день кількість проданих сенсорів вже досягла кілька десятків мільйонів.

## РОЗДІЛ 2.

# ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ЗАНУРЕНИХ МОБІЛЬНИХ ДАТЧИКІВ ДЛЯ НЕПАРАЛЕЛЬНОГО СТАНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИЗНАЧНИКА КЕЙЛІ-МЕНГЕРА

### 2.1 Вступ

Світовий океан забезпечує колосальні переваги для людського буття. Океан дає половину світового кисню і поглинає вуглекислий газ з нашої атмосфери. Тому в наш час дуже важливим є моніторинг водного середовища з метою з метою наукових досліджень, підводного спостереження, морської екології, освоєння морського шельфу і найголовніше - захисту від нападу ворога. Наземне застосування використовуються в багатьох галузях, але все ще існують деякі але в області підводної сенсорної техніки все ще існують певні проблеми. Для цього комплексний моніторинг підводної бездротової сенсорної (UWSN) має важливе значення. Важливо розробити відповідний механізм локалізації для збору точних даних про навколишнє середовище. Локалізація сенсорних вузлів необхідна тому що отримані дані будуть корисними, коли сенсорний вузол буде локалізовано [1]. В UWSN досліджено новий тип сенсорів, що надає нові можливості для проектування та реалізації різноманітні нові області застосування у воді. За допомогою цієї мережі (UWSN) можна вимірювати різні параметри у воді, такі як рН, каламутність, розчинений кисень та температура можуть бути виміряні [2]. Додатки, пов'язані з визначенням місцезнаходження, вдосконалюються з кожним днем наприклад, відстеження місцезнаходження об'єктів в розумних просторах, персональна персональна навігація, яка необхідна для локалізації в приміщенні. У зв'язку з тим, що глобальна система позиціонування (GPS) недоступна в приміщеннях, потрібні нові технології локалізації. Бездротовий зв'язок відіграє важливу роль в наземних додатках, в області підводних датчиків все ще існують певні проблеми. Підводний рівень має величезні ресурси, але не розроблений в дослідницькій сфері. Виявлення підводного

датчика з поверхні води обрано в якості дослідницького дослідження для вдосконалення цієї галузі. Існують деякі програми, які вже існують для непаралельної ситуації виявлення підводного статичного датчика, але непаралельна ситуація виявлення підводного мобільного датчика ще не розглядалася. Саме тому, запропонована математична модель для визначення точної координати підводного рухомого датчика для непаралельної ситуації. Для того, щоб визначити координати занурених мобільних датчиків використано визначник Кейлі-Менгера для непаралельної ситуації.

## **2.2 Загальна характеристика**

У підводному середовищі актуальною є проблема виявлення автоматичного визначення положення рухомих датчиків, були запропоновані різні методи, які відомі як проблема автокалібрування або автолокалізації. За допомогою датчика тиску можна динамічно вимірювати глибину занурення датчика. Крім того, завдяки великому масштабу та щільному розміщенню датчиків мобільні UWSN відрізняються від підводної акустичної мережі (UAN). Аналогічним чином, потрібні деякі нові завдання, такі як локалізація та множинний доступ в мобільних UWSN [3]. Для визначення місцезнаходження радіомаяка необхідно провести достатню кількість вимірювань. Вся система залежить від положення як буя, так і самого апарату [4]. Буї, пришвартовані до дна, а мобільні вузли зв'язуються з цими буями, щоб знати своє місцезнаходження. Але буї повинні бути розгорнуті у відомому місцезнаходженні. Отже, цей метод не підтримує динамічне середовище [5]. Якщо координати невідомі, то існує запропонована формула для розв'язання багатосторонніх рівнянь за допомогою нелінійної оптимізації за методом найменших квадратів. Цей алгоритм стверджує, що достатня кількість вимірювань з різних позицій забезпечить достатню кількість рівнянь для розв'язання задачі. Це називається аналіз ступенів вимірності [6]. В роботі [4] використовується аналогічна методика із застосуванням розширеного методу фільтра Калмана. Але в системі нелінійного рівняння аналіз ступенів свободи не дає єдиного розв'язку, в трилатерації, відстань

вимірюється між вузлами [7]. В роботі [8] розглядається тільки один вузол-маяк, розглядається на поверхні води, а три сенсорні вузли розташовані в підводному рівні, який знаходиться в паралельній площині з поверхнею води.

### **2.3. Методологія**

#### **А. Проблемне поле**

У цьому запропонованому методі передбачається, що є щонайменше три занурених мобільних датчиків та один вузол плавучого радіомаяка. Плавучий вузол-маяк передбачається для обчислення відстані між маяком та датчиками з шести різних положень маякового вузла. Шість різних положень радіомаяка створюють площину, яка знаходиться на поверхні води. Три датчики та один вузол маяка створюють неправильну форму тетраедра, а три датчики створюють трикутну нижню грань тетраедра яка не паралельна поверхні води. Визначник Кейлі-Менгера може бути застосований для обчислення координат датчиків, у яких об'єми тетраедра однакові. Розглянуто шість різних положень вузла маяка створять шість різних форми тетраедра, у яких площі нижніх граней однакові, а висоти різні, тому що датчики мають різні об'єми, оскільки датчики є рухомими. У запропонованому методі припускається, що швидкість і напрямок руху всіх трьох датчиків однакові. Тому тут визначник Кейлі-Менгера не буде застосовний. У цьому запропонованому методі область проєкцій була створена з області нижньої грані тетраедра. Таким чином, об'єм нової форми тетраедра для шести різних положень маякового вузла буде однаковим. Оскільки проєкції площ нижніх граней і висот всіх тетраедрів однакові. Характеристика тетраедра описана в розділі С. Далі застосовується визначник Кейлі-Менгера для обчислення координат сенсорів.

#### **В. Пояснення щодо навколишнього середовища**

У цьому запропонованому методі припускається, що всі датчики рухаються з однаковим напрямком і швидкістю, оскільки зазвичай океанічна течія - це безперервний і спрямований рух морської води, яка створюється вітром, температурою, різницею солоності, рухом землі тощо. Як правило, підводне



середовище є більш несприятливе, ніж наземне середовище. Не дивлячись на ці межі, воно стверджує певні переваги для визначення координат.

### С. Характеристики тетраедра

Якщо площа основи одного тетраедра дорівнює площі основи іншого тетраедра, а також їх висоти рівні, то їх об'єми будуть однаковими.

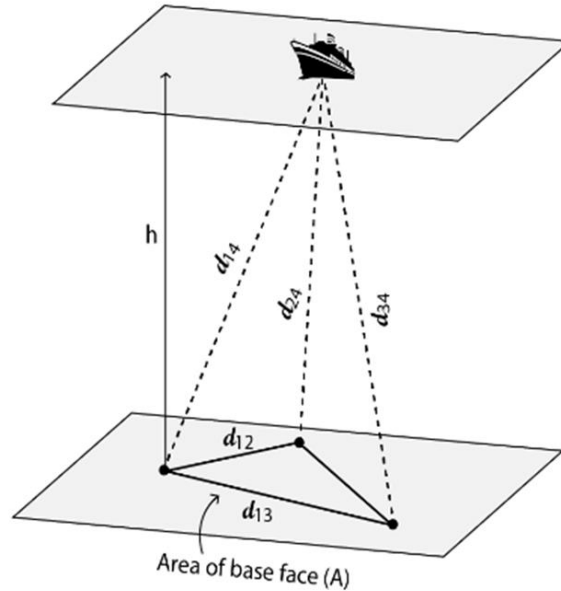
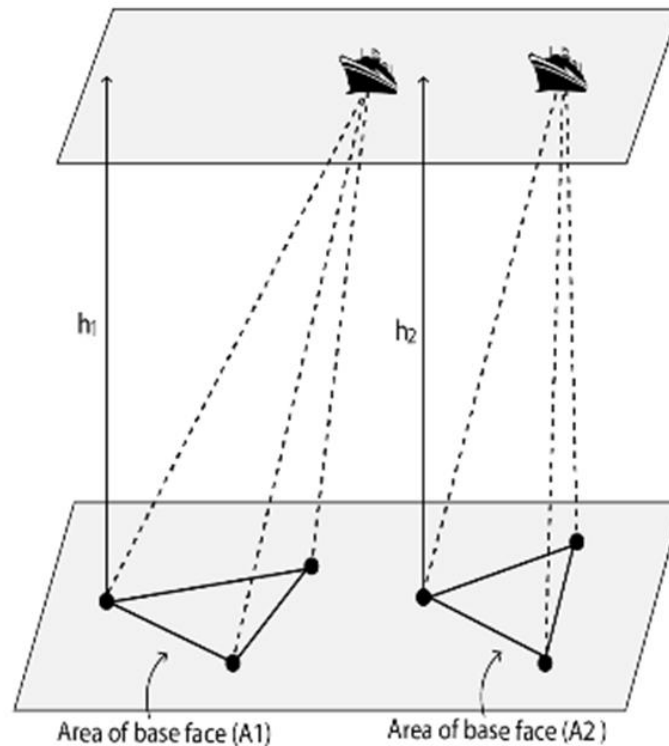


Рис. 2.1 Об'єм тетраедра

$$\text{Об'єм тетраедра} = \frac{1}{3} * A * h = \frac{1}{288} * \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & d'_{12} & d'_{13} & d'_{14} \\ 1 & d'_{12} & 0 & d'_{23} & d'_{24} \\ 1 & d'_{13} & d'_{23} & 0 & d'_{34} \\ 1 & d'_{14} & d'_{24} & d'_{34} & 0 \end{vmatrix}$$

Де A = площа основи тетраедра,

h = висота тетраедра



Площа базової поверхні (A1)

Площа базової поверхні (A2)

Рис. 2.2 Порівняння об'ємів двох різних форм тетраедра

Якщо  $A_1, h_1$  = площа основи та висота одного тетраедра

$A_2, h_2$  = площа основи та висота іншого тетраедра

І  $A_1 = A_2$ ,  $h_1 = h_2$

Тоді,  $\frac{1}{3} * A_1 * h_1 = \frac{1}{3} * A_2 * h_2$

D. Вимірювання відстані

Відстань між радіомаячним вузлом і датчиками може вимірюватися за допомогою сигнально-синхронного годинника або радіо- та акустичного сигналу. Під час вимірювання відстані враховуються завади, які впливають на що впливають на похибку передачі.

F. Координати датчиків відносно маяка

У наведеному вище описі ми визначили координати сенсорних вузлів щодо 51 Щоб знайти координати відносно маяка, виконайте наступні кроки:

Координати сенсорів з відомими вимірюваннями

Сенсори	Координати
S <sub>1</sub>	(0,0,0)
S <sub>2</sub>	(0, d' <sub>12</sub> , 0)
S <sub>3</sub>	$(\sqrt{d'_{13}{}^2 - \left(\frac{d'_{12}{}^2 + d'_{13}{}^2 - d'_{23}{}^2}{2d'_{12}{}^2}\right)^2}, \frac{d'_{12}{}^2 + d'_{13}{}^2 - d'_{23}{}^2}{2d'_{12}{}^2}, 0)$

За допомогою відповідного датчика ми можемо обчислити глибину  $h$  між маяковим вузлом  $S_4(x_4, y_4, z_4)$  і площиною  $XY$ . Вузол маяка  $S_4(x_4, y_4, z_4)$  відбивається на площині  $XY$ , координата якої  $P_4(x_4, y_4, 0)$ . Щоб знайти  $x_4$  і  $y_4$ , ми припускаємо, що відстань між  $S_1, S_2, S_3$  і  $P_4$  становить  $D_{14}, D_{24}$  і  $D_{34}$  відповідно.

$$D_{14}^2 = x_4^2 + y_4^2 \quad (2.1)$$

$$D_{14}^2 = x_4^2 + (y_4 - y_2)^2 \quad (2.2)$$

$$D_{34}^2 = (x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2 \quad (2.3)$$

З рівнянь (2.1), (2.2) і (2.3) ми отримуємо очікувані координати маяка  $P_4(x_4, y_4, 0)$ .

$$x_4 = \sqrt{\frac{1}{2D} (2d'_{12}D_{14}^2 - D_{14}^2 + D_{24}^2 + d'_{12}{}^2)},$$

$$y_4 = \frac{1}{2d'_{12}} (D_{14}^2 - D_{24}^2 + d'_{12}{}^2)$$

Оскільки  $d'_{14}, d'_{24}$  і  $d'_{34}$  є гіпотенузою  $\Delta S_1 P_4 S_4, \Delta S_2 P_4 S_4$  і  $\Delta S_3 P_4 S_4$  відповідно. Використовуючи теорему Піфагора, ми можемо знайти  $D_{14}, D_{24}$  і  $D_{34}$ .  $(x_4, y_4, h)$  буде новою координатою вузла маяка, де відомі всі елементи.

$$S_4(x_4, y_4, 0) = \left( \left( \sqrt{\frac{1}{2D} (2d'_{12}D_{14}^2 - D_{14}^2 + D_{24}^2 + d'_{12}{}^2)} \right), \left( \frac{1}{2d'_{12}} (D_{14}^2 - D_{24}^2 + d'_{12}{}^2) \right), h_{11} \right)$$

Також можна отримати координати інших датчиків, якщо ми змінимо декартову систему на координату вузла маяка  $S_1$ . Результат показано в ТАБЛИЦІ 2.2.

Таблиця 2.2.

Координати сенсорів відносно маяка

Маяк	Координата
$S_4$	(0,0,0)
Сенсори	Координати
$S_1$	$(-x_4, -y_4, -z_4)$
$S_2$	$(-x_4, y_2 - y_4, -z_4 - (h_{12} - h_{11}))$
$S_3$	$(-x_4, y_2 - y_4, -z_4 - (h_{13} - h_{11}))$

#### 2.4 Результати та обговорення

З проведеного моделювання можна зробити висновок, що координати  $x$  та  $y$  датчиків будуть змінюватися, а координата  $z$  залишатиметься незмінною. З цієї причини, при незмінних відстанях від маяка до сенсорів і внутрішніх відстанях між сенсорами, здається, що сенсори обертаються відносно маяка.

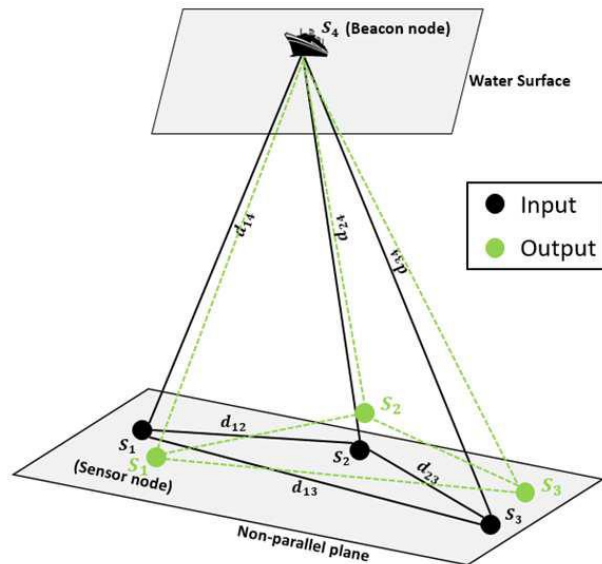


Рис. 2.3 Обертання сенсорів

#### А. Генерація помилок

У запропонованій нами математичній моделі закладено мінімальну похибку через деякі обмеження навколишнього середовища. Датчики можуть виявити сигнал, коли пройдено найкоротшу евклідову відстань. Якщо ми отримаємо більш точну відстань від водного середовища, ми зможемо отримати точніші координати з меншою похибкою.

#### В. Аналіз та обговорення результатів моделювання

Для оцінки запропонованої математичної моделі було реалізовано метод на мові Python. Перш за все, в точках  $(9, -6, -4)$ ,  $(-6, -9, -5)$  та  $(3, -12, -7)$  розгортаються три датчики маяк випадковим чином переміщується в різні положення на водній площині поверхні води. Відносно площини маяка датчики розгорнуті непаралельно. Координати маяка знімаються з шести різних положень, де першою розглядається перша координата  $(0, 0, 0)$ . З іншого боку, в під водою координати датчиків приймаються випадковим чином.

При цьому ми припускаємо, що положення трьох датчиків  $S_1$ ,  $S_2$  і  $S_3$  відносно першої позиції маяка  $(0, 0, 0)$ . При цьому три датчики вважаються рухомими у підводному середовищі. Розраховані координати датчиків при знятті показань з першої позиції радіомаяка вузла наведені на рис. 2.4.2

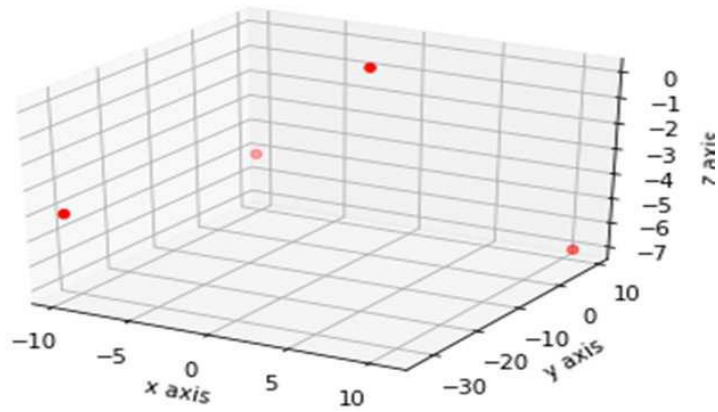


Рис. 2.4 Координати датчиків з запропонованою моделлю

Отримано координати датчиків для 100 ітерацій для розрахунку похибки визначення відстані, де похибка визначення відстані – це різниця вхідних координат та результуючих координат датчиків. Для координат датчиків \$1, \$2 та \$3 маємо обчислено похибки для 100 ітерацій та обчислено середню похибку які показані на рис.2.4.3, рис.2.4.4 та рис.2.4.5 відповідно.

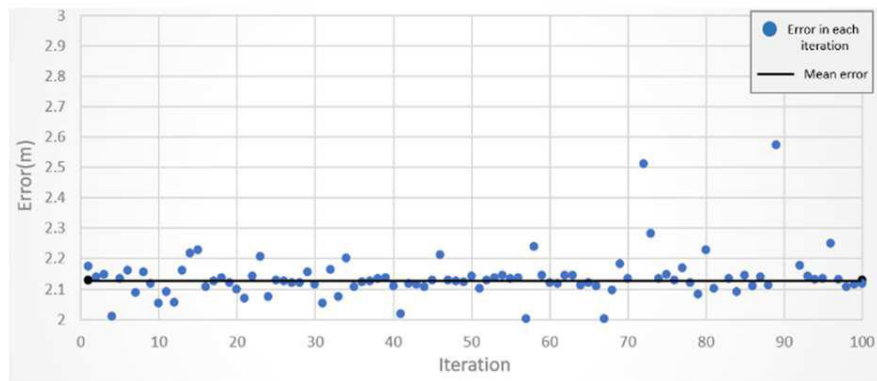


Рис. 2.5 Похибки відстані датчика  $S_1$  між результуючою та вхідною координатами

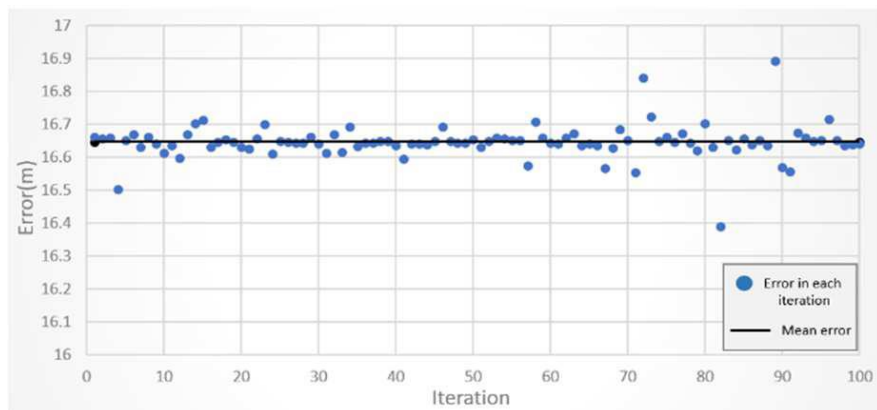


Рис. 2.6 Похибки відстані датчика  $S_2$  між результуючою та вхідною координатами

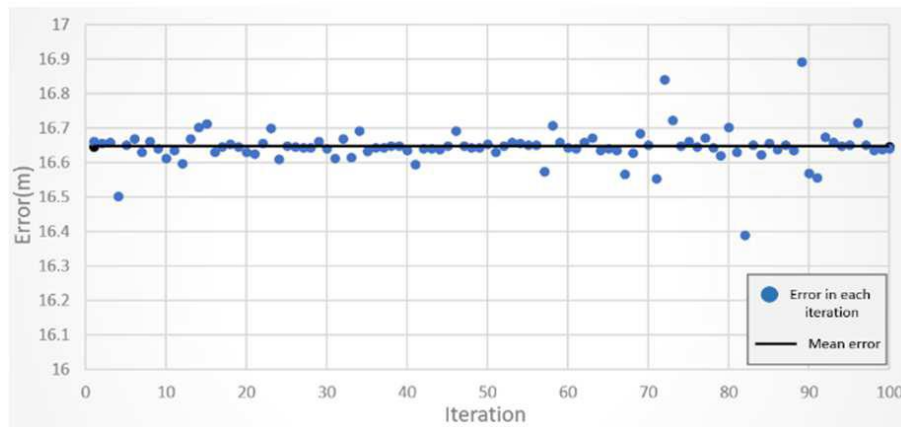


Рис. 2.7 Похибки відстані датчика  $S_3$  між результуючою та вхідною координатами

Таблиця 2.3

Генерування похибки відстані (від вхідних датчиків до вихідних датчиків)

Датчики	Середнє значення похибки (м)	Середньоквадратичне відхилення розподілу похибки(м)
$S_1$	2.12769	0.027566
$S_2$	16.6473	0.009995
$S_3$	15.6849	0.01651

Після отримання вихідних координат датчиків із запропонованої нами моделі, внутрішні відстані від датчика до датчика вийшли з невеликою похибкою, якою можна знехтувати.

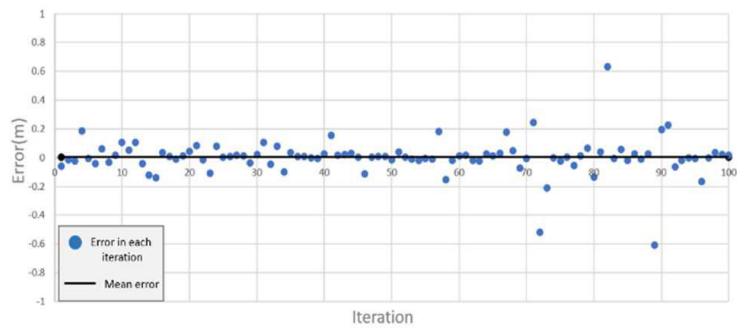


Рис. 2.8 Похибки відстані датчика  $S_1$  до  $S_2$

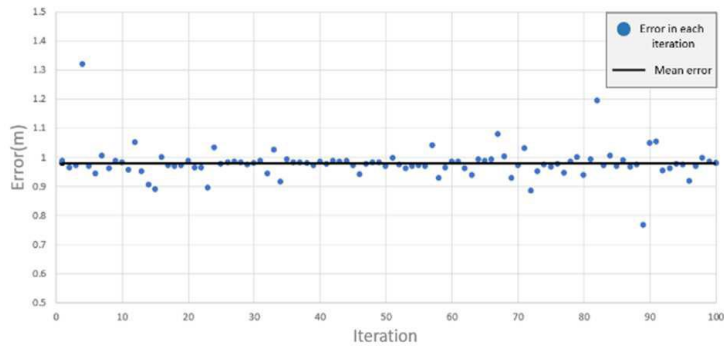


Рис. 2.9 Похибки відстані датчика  $S_2$  до  $S_3$

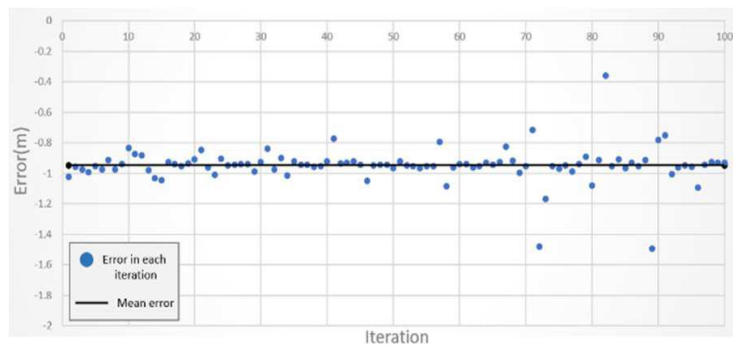


Рис. 2.10 Похибки відстані датчика  $S_3$  до  $S_1$

Таблиця 2.4

Формування похибки відстані (від датчика до датчика)

Датчики	Середнє значення похибки (м)	Середньоквадратичне відхилення розподілу похибки(м)
$S_1$ до $S_2$	0.003796	0.037179
$S_2$ до $S_3$	0.979097	0.004376
$S_3$ до $S_1$	-0.94655	0.04459



## **2.5 Обмеження**

Ми переміщували положення маячка у різних фігурах, таких як коло, трикутник та пряма лінія, де для деяких вхідних даних фігур не будуть застосовні для запропонованої нами моделі. Наприклад, з цього входу (0, 0, 0), (1, 0, 0), (2, 0, 0), (3, 0, 0), (4, 0, 0), (5, 0, 0, 0) ми не отримаємо жодного результату, тому що ці координати створюють лінійну пряму, на якій утворюється сингулярна матриця. У нашому запропонованому методі враховуються швидкість і напрямок руху цього мобільного датчика збігаються. Але якщо вони не збігаються, запропонований алгоритм не буде працювати.

## **Висновки**

В даній роботі ми дослідили використання UWSN та представлено математичну модель на прикладі одиночного радіомаяка для отримання координат зануреного мобільного радіомаяка для отримання координат занурених мобільних занурених мобільних датчиків для непаралельної ситуації. Ми описали проблеми зв'язку підводних сенсорних вузлів та представили методику їх локалізації, де методика локалізації має важливе значення для збору точних даних про навколишнє середовище. Цей метод визначення координат усуває численні проблеми на території локалізації. Моделюючи наші результати, ми можемо підтвердити, що запропонована нами математична модель забезпечує точні підводні датчики координати підводних датчиків в межах допустимої похибки. Нарешті, ми дійшли висновку, що дійшли висновку, що вона є перспективною новою моделлю визначення координат підводних сенсорів. Вона може стати способом подолання деяких проблем в галузі розгортання підводних сенсорів. Це здається ефективним рішенням для багатьох застосувань, пов'язаних з моніторингом розгортання у водних середовищах. В подальшому ми плануємо працювати з мобільними сенсорами, напрямок і швидкість руху яких швидкість руху яких є різними.

## РОЗДІЛ 3.

# МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ОБЧИСЛЕННЯ КООРДИНАТ ПРОМІЖНИХ ПУНКТІВ МАРШРУТУ РУХУ ЛІТАЮЧОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО РОБОТА

### 3.1 Вступ

Літаючий інформаційний робот-це безпілотний літальний апарат, який призначений для виконання інформаційно-телекомунікаційних операцій.

Залежно від складу бортового устаткування, ЛІР виконує функції: літаючий багатофункціональний датчик; пристрій, що запам'ятовує; ретранслятор; контролер. В той же час, ЛІР призначений підтримувати інформаційну взаємодію з контрольним центром із стаціонарними і мобільними абонентами або датчиками.

Найуспішніша програма ЛІР знаходиться в поєднанні з бездротовими сенсорними мережами (Бсм) обидві стаціонарні безпроводні сенсорні мережі (Сбсм) і мобільні безпроводні сенсорні мережі (Мбсм).

Мобільна бездротова сенсорна мережа є незамінною в умовах відсутньої або зруйнованої наземної інфраструктури( регіони зі складним рельєфом або постраждали від стихійних лих або техногенних катастроф).

Як правило, МБСМ швидко розгортається для організації інформаційної взаємодії між персоналом пошуку і рятувальними підрозділами та(або) правоохоронними органами.

МБСМ - це бездротові локальні мережі, в яких вузли(мобільні сенсори) мають однаковий статус (peer-to-peer) і можуть взаємодіяти один з одним безпосередньо в зоні радіовидимості або з ретрансляцією повідомлень через інші вузли, таким чином утворюючи багатокрокові (multi hop) мережі довільної структури. Однак мобільність вузлів, непередбачуваність в операційній середі і обмежена енергія радіо ліній призводять до нестабільного зв'язку між вузлами і, як наслідок, до втрати зв'язку МБСМ. У

цьому випадку підключення мобільного сенсору (МС) може бути забезпечено лише в межах окремих кластерів.

Ми будемо називати такий зв'язок кластером МБСМ підключення. За фізичним змістом в концепції кластерної зв'язності МБСМ означає здатність максимальної кількості МС спілкуватися один з одним протягом достатнього інтервалу часу передати необхідний обсяг інформації з необхідної якості до мобільного датчика, який є обраний як голова (пристрій зберігання інформації).

### 3.2 Постановка проблеми

Час на збір інформації з мобільного сенсора, використовуючи ЛПР, складається з часу його руху між проміжними точками шляху та затримкою в проміжних точках шляху для зчитування інформації з МС. Ми припускаємо, що інформація зчитується з використанням 5G технологій.

Тоді часом зчитування інформації можна знехтувати в порівнянні з часом механічного руху ЛПР з однієї проміжної точки маршруту до іншої. Враховуючи те, що між ними ЛПР рухається з максимальною швидкістю, можна зробити висновок що найкращим положенням вузлів буде те, що гарантує кластерне підключення мобільного сенсора та мінімальну загальну відстань між даними точками.

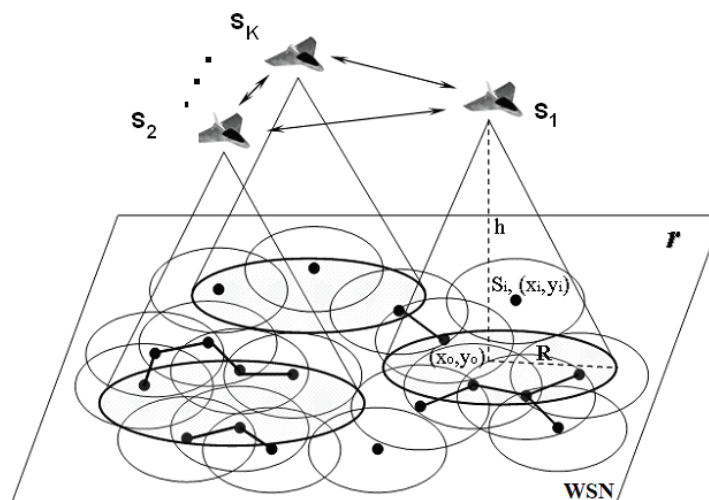


Рис.3.1 – приклад гіпотетичної траєкторії ЛПР, що результує в мінімальному часі для збору інформації з мобільних сенсорів  $S_1, S_2, \dots, S_k$  – проміжні точки маршруту ЛПР

На даний час відомі тривіальні методи збору інформації зі стаціонарних сенсорних мереж, використовуючи одну чи декілька телекомунікаційних повітряних платформ. Ці методи ґрунтуються на тому, щоб забезпечити можливість поєднання розз'єднаних зон стаціонарних наземних вузлів, коли вся мережа являється єдиним кластером [9-11], або на тому, щоб збільшити єдність наземної мережі [12]. Проте ніхто ще не розглядав методи збору інформації з МВСН в умовах кластерної єдності та використання одного ЛПР згідно з критерієм мінімізації часу обльоту всіх проміжних вузлів маршруту (точок збору інформації).

### 3.3 Визначення структурної та інформаційної зв'язності

В загальному зв'язність мережі це здатність будь-якої пари вузлів проводити обмін інформацією, використовуючи проміжні вузли як повторювачі [9]. Оскільки даний обмін відбувається на різних рівнях OSI моделі, то під зв'язністю ми можемо приймати успішне функціонування протоколів індивідуальних рівнів моделі (у вузькому сенсі), або впровадження умов та протоколів різних рівнів для гарантованого обміну між вузлами мережі (в широкому сенсі) [2-14].

На фізичному рівні, між парою вузлів передавач-отримувач  $\{a, b\}$ ,  $a, b = \overline{1, N}$ , де  $N$  – кількість сенсорів у мережі, має існувати фізичний радіо канал або маршрут  $m_{ab}$  періодично з'єднаних радіо каналів, що характеризуються довжиною радіо з'єднання між кожною парою сусідніх вузлів  $d_{ij}$ ,  $i, j \in m_{ab}$ ,  $i, j = \overline{1, N}$ , або потужністю передавача кожного вузла маршруту  $p_i$ ,  $i \in m_{ab}$ . Якщо виконуються умови  $W_1: \{d_{ij} \leq d^0 \forall i, j \in m_{ab}$ , де  $d^0, p^0$  – допустимі значення радіусу передачі (потужності), ми можемо стверджувати про наявність фізичного з'єднання або структурної зв'язності в парі передавач-отримувач.

На каналному та мережевому рівнях гарантований обмін інформацією здійснюється відповідно до обраного протоколу управління множинним доступом (МАС) та протоколу маршрутизації. З одного боку, вони характеризуються системними параметрами, такими як пропускна здатність  $s$

$(m_{ab})$  обраного маршруту передачі даних. З іншого – за параметрами користувача, такими як середня затримка  $t_d$  передачі пакету даних між парою передавач-отримувач  $\{a, b\}$  (або кількість повторних передач у маршруті  $l(m_{ab})$ ). Інтенсивність вихідних потоків визначається як  $g_{ij} \forall i, j \in m_{ab}$ . Якщо виконуються умови  $W_2: \{s(m_{ab}) \geq s^0, \bar{t}_d \leq t_d^0 (l(m_{ab}) \leq l^0), g_{ij} \leq s_{ij}(m_{ab})\}$ , то можна говорити про наявність гарантованого обміну інформацією або інформаційної зв'язності для даної пари вузлів. Зауважимо, що наявність інформаційної зв'язності можлива лише за наявності структурної зв'язності.

Тоді структурна та інформаційна зв'язність всієї мережі можуть бути визначені використовуючи матрицю зв'язності:

$$|A| = \begin{cases} 1, \text{ якщо виконуються умови } W_1, \text{ або } W_2 \\ 0 \end{cases} |W_1 \quad (3.1)$$

Якщо умови вище виконуються для всіх пар передавач-отримувач (всі елементи матриці дорівнюють одиниці), тоді мережа буде вважатися структурно або інформаційно зв'язною. Але це визначення зв'язності відображає лише її наявність, але не надає інформації про її стабільність у подібній мережі. Тому наступним кроком буде оцінити показник структурної та інформаційної зв'язності, що покаже степінь мережевої зв'язності.

У випадку коли необхідно забезпечити гарантований обмін інформації між парою передавач-отримувач, пропускна здатність мережі може бути використана як міра інформаційної зв'язності. Відобразимо MWSN у формі ненаправленого зваженого графа  $G(N, A)$ , що складається з  $N$  вершин (вузли мережі) та набору ребер (каналів зв'язку)  $A$ , позначених певною вагою, наприклад, виражених пропускною здатністю між відповідною парою сусідніх вузлів  $s_{ij}, i, j = \overline{1, N}$  за всіх інших умов  $W_1$  та  $W_2$ . Тоді пропускна здатність мережі може бути визначена наступним чином [11]:

$$U_T = S(A) = \sum_{i,j=1}^N \sum_{a,b=1}^N s_{ij}^{\min_{ab}} \quad (3.2),$$

де  $S(A)$  – пропускна здатність мережі;  $s_{ij}^{\min_{ab}}$  – мінімальна пропускна здатність каналу (ребра) що є частиною найкоротшого маршруту  $m_{ab}$  між парою передавач-отримувач,  $\{a, b\}, i, j, a, b = \overline{1, N}$

Впровадження додаткових вузлів у мережу, роль якої може відігравати ЛПР, може значно збільшити дані показники зв'язності.

### 3.4 Математична постановка проблеми

Нехай дано наступне: набір наземних вузлів  $V_i, i = \overline{1, N}$ , де  $N$  – кількість наземних вузлів (мобільних сенсорів), розподілених на певній ділянці;  $K$  – кількість ЛПР,  $R = \text{const}$  – радіус зони роботи кожного ЛПР  $m$  (ми припускаємо що вони перебувають на одній висоті  $H$  відносно поверхні Землі);  $D^0$  ( $P^0$ ) радіус (потужність) передачі сигналу ЛПР. Кожен вузол мережі  $V_i$  в певний час  $t$  можна описати набором параметрів: координати положення та швидкість руху  $(x_i, y_i), S_i, i = \overline{1, N}$ ; висота над поверхнею  $h$  (ми припускаємо що  $h = 0$ ); радіус (потужність) передачі сигналу  $d^0$  ( $p^0$ ); таблиця найкоротших маршрутів  $R_i$ . Зв'язок між вузлами мережі на каналному рівні підтримується за протоколом CSMA, а на мережевому рівні – за одним із протоколів маршрутизації [12].

Тоді математична постановка проблеми, рішення якої дозволяє знайти алгоритм кластеризації, може бути сформульована наступним чином: щоб у реальному часі знайти такий керуючий вплив  $C_x$  (координати розміщення набору ЛПР у просторі  $(x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}), S_{0j}, j = \overline{1, K}$ , що визначає матрицю зв'язності  $A^j$ ), що забезпечить максимум цільової функції зв'язності, визначеної з виразу (2):

$$A^j = \arg \max_{C \in W_2} U^T$$

$$W_2: \left\{ \begin{array}{l} d_{ij} \leq d_0, D_{ij} \leq D^0 \forall i, j \in \dots \\ \dots \in m_{ab} (p_i \leq p^0, P_i \leq P^0 \forall i \in m_{ab}); \\ s(m_{ab}) \geq s^0; \\ \bar{t}_3 \leq t_3^0 (l(m_{ab}) \leq l^0); \\ g_{ij} \leq s_{ij}(m_{ab}); \end{array} \right\} (3.3)$$

### 3.5 Алгоритм кластеризації

Алгоритм кластеризації призначений для пошуку оптимальної топології мережі ЛІР та включає наступні кроки.

*Крок 1.* Збір інформації про початкову топологію мережі та введення стартових даних:

- параметри наземних вузлів  $N$ ,  $(x_i, y_i), S_i, i = \overline{1, N}$ ; та раніше отриманих ЛІР:  $(x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}), S_{0j}, j = \overline{1, K}$  (отриманих, наприклад, через GPS);
- обмеження параметрів у  $W_2$ ;
- кількість ЛІР на операцію  $K$ ;
- параметри МАС та маршрутні протоколи.

Параметри, наведені вище, та їхні обмеження визначають початкову топологію MWSN без використання ЛІР  $A^j, j = \overline{1, K}$ ; де  $j$  – кількість ітерацій пошуку розв'язку (порядковий номер ЛІР).

*Крок 2.* Аналіз структурної зв'язності (перевірка чи виконуються умови  $W_1$ ).

*Крок 3.* Збір інформації про функціонування мережі (матриця найкоротших маршрутів  $R_i$ ). Збір цієї інформації може здійснюватися на етапі планування за наявності ЛІР (через канал зв'язку з центром управління) або на етапі розгортання шляхом «зчитування» даних з будь-якого наземного вузла MWSN (через функціонування одного з протоколів маршрутизації [21]).

*Крок 4.* Аналіз наявності інформаційної зв'язності:

1. Обчислення функціональних параметрів мережі  $g_{ij}, s(m_{ab}), \bar{t}_3(l(m_{ab}))$  згідно з [21].
2. Перевірка виконання умов  $W_2$ . Якщо умови виконуються – наступним буде крок 6, інакше крок 5.

*Крок 5.* Виконання наступного алгоритму для забезпечення інформаційної зв'язності:

1. Вибір проблематичних ребер (для яких не виконується умова  $s(m_{ab}) \geq s^0$  або  $g_{ij} \leq s_{ij}(m_{ab})$ ) та / або проблемні маршрути (для яких не справджується умова  $\bar{t}_3 \leq t_3^0 (l(m_{ab}) \leq l^0)$ ).

2. Пошук нових розв'язків (топология використовуючи поточну ЛПР  $A^{j+1}$  що покриває настільки багато проблемних ділянок мережі, наскільки можливо. Щоб зменшити складність пошуку, можна використовувати центроїд або ініціалізацію решітки, що детально обговорюються в [8].

3. Побудова маршрутних таблиць  $R_i(A^{j+1})$ , визначених матрицею потоку та прийнятим маршрутним методом. Перерозподіл потоків  $g_{ij}$  згідно з  $R_i(A^{j+1})$ . Обчислення параметрів  $s(m_{ab}), \bar{t}_3(l(m_{ab}))$  для існуючих пар передавач-отримувач.

4. Перевірка виконання умов  $W_2$  для  $A^{j+1}$ . У випадку виконання (або покриття максимальної кількості проблемних ділянок мережі) ЛПР переводиться у вказане положення (стадія розгортання), а також виконується адаптація параметрів протоколу МАС до реальних умов роботи згідно з процедурами, вказаними в [15] (стадія оперативного контролю).

5. Валідація наявності ресурсу апаратного забезпечення (ЛПР). У випадку його наявності ( $j < K$ ) – перейти до кроку 1, інакше завершити алгоритм.

Якщо всі ЛПР вилучені, то кожен з них періодично на етапі оперативного контролю виконує описану вище схему для перевірки потреби змінити власне положення (в цьому випадку всі вузли мережі вважаються фіксованими в даний момент часу). Причому проміжок часу між виконанням алгоритму управління повинен бути достатнім для побудови маршрутів і передачі по ним мінімальної кількості даних, і в той же час досить малим, щоб топология мережі істотно не змінювалася.

### **3.6 Моделювання функціонування мобільної бездротової сенсорної мережі з використанням запропонованого алгоритму**



Запропонований алгоритм було реалізовано на основі середовища Maple. Для створення було використано наступні початкові дані: кількість мобільних сенсорів  $N = 8, 12$  або  $16$ , які були випадково розставлені на поверхні в межах зони розгортання  $r \leq 10^6 m^2$ . Допустимі значення параметрів МС та ЛІР:  $d^0 = 100m, D^0 = 300m, R = 200m, s^0 = 0.9, l^0 = 5$ . Кількість ЛІР на операцію була  $K = 5$ . Для спрощення обчислень було визначено що середнє навантаження кожного МС  $\bar{g}_i = 5$ . Довжина пакета становила  $L = 1000$  біт. Частота пропускної здатності для кожного каналу мережі (МС-МС, ЛІР-МС, ЛІР-ЛІР) була  $\Delta f = 300$  кГц. BPSK використовувався як модуляція несучої. На каналному рівні МС-МС використовувався гнучкий протокол CSMA, в каналах ЛІР-МС(ЛІР-ЛІР) використовувався протокол CSMA з використанням адаптивного резервування [15-22]. Для розрахунку найкоротших маршрутів використовувався алгоритм Дейкстри. Кількість повторних передач використовувалася як метрика маршруту  $U^T$ .

Використовуючи запропоновані алгоритми для розташування набору VLIR було отримано: 1) графік залежності показника структурної та інформаційної зв'язності (пропускної здатності мережі) від координат розташування одного ЛІР (рис. 2); 2) графік залежності пропускної здатності мережі  $U^T$  від кількості  $K$  ЛІР у випадку різної кількості  $N$  мобільних сенсорів та різного розміру зони розміщення  $r$  (рис. 3).

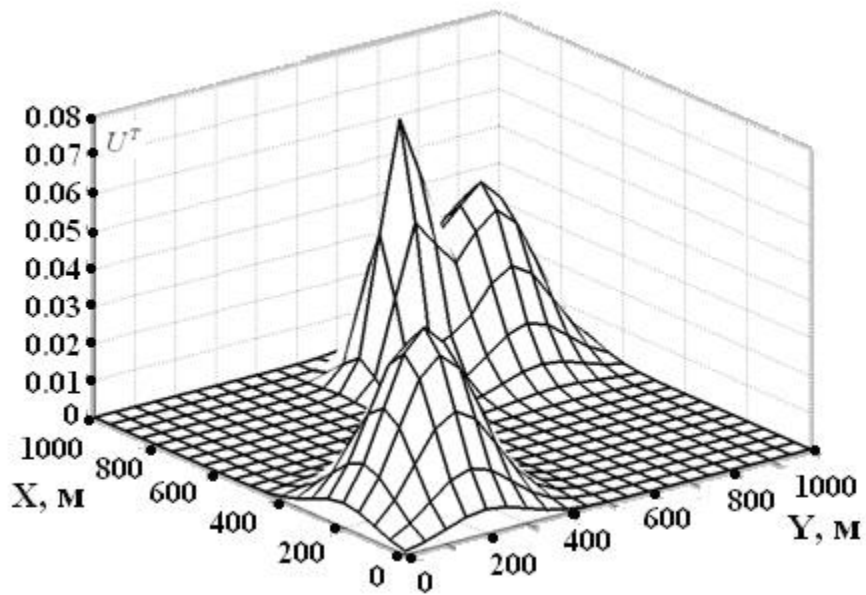


Рис.3.2 – Залежність пропускної здатності мережі від координат знаходження одного ЛПР

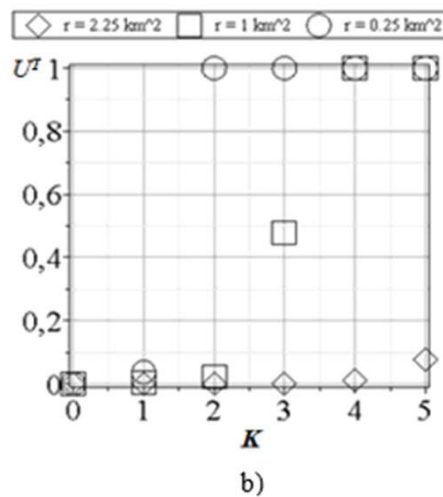
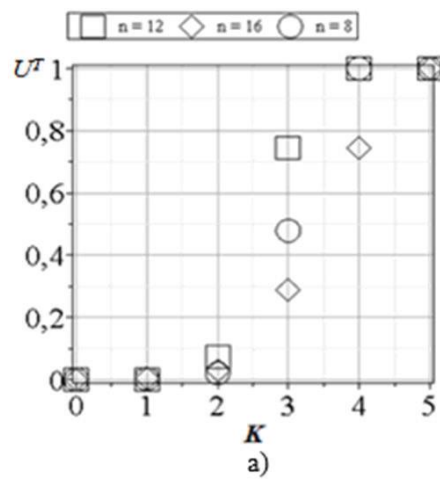


Рис. 3.3 – Залежність пропускної здатності мережі від кількості ЛПР

Аналізуючи Рис.3.2, ми можемо побачити що пропускна здатність має глобальний та декілька локальних максимумів. Тому, наприклад, коли ЛІР розташована у точці глобального максимуму з координатами (302, 261), пропускна здатність досягає свого максимального значення. У цьому випадку використання одного ЛІР збільшує пропускну здатність мережі у 2-3 рази.

Аналізуючи Рис. 3.3 ми можемо побачити що зв'язність (пропускна здатність) може бути збільшена шляхом використання кількох ЛІР. Ефективність використання комплекту ЛІР залежить від кількості мобільних сенсорів у мережі та розміру зони розгортання. З більшою кількістю МС або з меншою ділянкою розгортання пропускна здатність буде більшою для обраної кількості ЛІР, оскільки сенсори матимуть сильнішу зв'язність між собою. ЛІР потрібно використовувати поки не буде досягнуто бажаного рівня зв'язності (пропускної здатності).

### **Висновки**

У розділі описано методику оперативного розрахунку координат проміжних точок маршруту руху літаючого інформаційного робота (ЛІР), який збирає інформацію з мобільних сенсорів мобільної бездротової сенсорної мережі (МБСМ). Знання цих точок маршруту дозволяє побудувати ЛІР-траєкторії, що мінімізує час для збору інформації з мобільних сенсорів.

Метод розрахунку в реальному часі координат проміжних точок маршруту передбачає послідовне використання алгоритмів задля розв'язання навігаційної задачі, задачі кластеризації та задачі знаходження траєкторії обльоту точок збору інформації від кластерів мобільних сенсорів, що були сформовані на момент початку збору інформації.

Для вирішення задачі кластеризації в статті розроблено спеціальний алгоритм, який використовує процедури кількісного розрахунку показників структурної та інформаційної зв'язності бездротових сенсорних мереж з мобільними сенсорами. Ці показники враховують наявність не тільки структурного зв'язку, а й гарантованого обміну інформацією між даною парою відправник-адресат. Для кількісної оцінки ступеня структурної та

інформаційної зв'язності бездротових сенсорних мереж з мобільними датчиками запропоновано два показники:  $k$ -зв'язність та пропускна здатність мережі.

Розроблено алгоритм керування топологією мережі літаючих інформаційних роботів (ЛІР) для покращення показників структурної та інформаційної зв'язності бездротових сенсорних мереж з мобільними сенсорами.

Застосування евристичних прийомів задля створення початкових умов (першого наближення) дозволяє суттєво зменшити складність пошуку квазіоптимального розв'язку задачі розміщення ЛІР та підвищити ймовірність досягнення глобального максимуму за кількісними показниками структурно-інформаційної зв'язності.

Результати імітаційного експерименту свідчать про ефективність запропонованих алгоритмів. Використання хоча б одного ЛІР дає можливість збільшити пропускну здатність мережі в 2-3 рази. Використання групи ЛІР дає змогу на порядок підвищити показники структурної та інформаційної зв'язності.

У розділі показано, що критерій структурної зв'язності не може повністю характеризувати надійність зв'язку. Цей критерій не враховує характеристики алгоритмів функціонування мережі: протокол множинного доступу, алгоритм обробки заявок на вузлах мережі, протокол маршрутизації, пропускна здатність каналу тощо. Тому в статті пропонується використовувати критерій структурно-інформаційної зв'язності та критерію інформаційної зв'язності для оцінки надійності мережі. Ці критерії характеризують якість обслуговування запитів в умовах ненадійних елементів

У розділі показано, що сукупність цих критеріїв дає можливість повністю визначити структурну надійність мережі в цілому.

Ці критерії дозволяють оцінити надійність мобільної бездротової сенсорної мережі в умовах швидких змін її структури. Ці критерії можна

приміняти для оцінки надійності МБСМ в умовах детермінованого та стохастичного розвитку її структури.

У розділі показано, що літаючий інформаційний робот або зависає, або летить по колу з мінімальним радіусом навколо точки свого оптимального розташування. Перед переходом до наступної точки маршруту здійснюється адаптивне налаштування маршрутів передачі даних і завантаження каналів.

Оперативне управління обладнанням літаючих інформаційних роботів означає адаптацію потужності передавача, протоколів множинного доступу, маршрутизації тощо до реальних умов функціонування. Швидкість адаптації залежить від швидкості зміни топології мережі.

Якщо є кілька літаючих інформаційних роботів, їх можна використовувати для підвищення структурної та інформаційної зв'язності (надійності). Літаючий інформаційний робот повинен бути розміщений таким чином, щоб охопити (зв'язати) якомога більше вузлів мережі.

Якщо через невеликий розмір зони покриття літаючого інформаційного робота з'єднати навіть пару заданих вузлів неможливо, то літаючого інформаційного робота необхідно розташувати таким чином, щоб з'єднати один із заданих вузлів зі стількома іншими мережевими вузлами, наскільки це можливо. Усі наступні літаючі інформаційні роботи повинні бути розміщені таким чином, щоб зв'язувати попереднього літаючого інформаційного робота з якомога більшою кількістю інших вузлів мережі.

## РОЗДІЛ 4.

### МЕТОД ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ СЕНСОРІВ В СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ ZIGBEE

На сьогодні найбільш доступний і простий спосіб оцінити та проаналізувати працездатність дротової чи бездротової системи як в цілому, так і окремих її складових – скористатися методом імітаційного моделювання. Для досягнення результату використовують спеціальне програмне забезпечення (ПЗ) або емулятори, що здатні відтворити необхідну систему. Існує чимало безкоштовного та комерційного ПЗ, здатного моделювати роботу бездротових сенсорних мереж. Такі програмні комплекси ґрунтуються на компонентній архітектурі, працюють за відносно схожим принципом, зокрема дають змогу моделювати наступні аспекти функціонування бездротових сенсорних мереж:

- 4 нижчі рівні стека мережевого протоколу 802.15.4;
- реалізація фізичного середовища та взаємодії компонентів;
- реалізація різних моделей електроживлення та режимів роботи від вбудованих батарей.

Хоча подібне ПЗ є універсальним, досліджувати як функціонує мережа залежно від топології мережевої інфраструктури можна в доволі обмежених рамках. Важливим аргументом є складність програмної адаптації додатків до можливості дослідження алгоритмів визначення координат. На основі сказаного було сформульовано наступні причини невикористання емуляторів бездротових мереж:

- Складність топологій, що містять величезну кількість об'єктів;
- мета даної роботи, що полягає у розгляді роботи різноманітних алгоритмів обчислення координат;
- відсутність потреби реалізовувати більшість мережевої взаємодії;

Таким чином було прийнято рішення самостійно створити комп'ютерну модель бездротової сенсорної мережі, що буде здатна перевіряти отримані в ході даної роботи теоретичні результати. Крім того, вона зможе оцінювати працездатність запропонованого алгоритму визначення координат.

Моделювання системи здійснювалось на операційній системі Linux. Розробка мережі здійснювалась мовою Python, модель представлена комплектом скриптів.

Сам алгоритм визначення координат було реалізовано використовуючи його бібліотеки NumPy/SciPy, що значно спрощували математичні обчислення. З метою відображення кінцевого результату через двовимірні графіки було застосовано бібліотеку matplotlib.

Варто зазначити, що чисельне моделювання не здатне створити комп'ютерну модель, яка повністю зможе відтворити реальну складну систему. Сама суть моделювання полягає в тому, щоб врахувати лише найбільш важливі складові роботи мережі. Тому далі буде розглянуто реалізовану модель та перевірено адекватність її роботи порівняно з реальною мережею стандартом[1].

Наша модель має такі елементи реальної бездротової сенсорної мережі:

1. Набір  $M$  об'єктів, що перебувають у певній прямокутній області двовимірного простору розміром  $A \times B$ ;
2. Через будь-які випадкові проміжки часу жоден об'єкт мережі не може встановити спілкування з іншим, якщо той перебуває на відстані, більшій за  $L$ , від нього. У випадку ж успішної передачі повідомлення здійснюється обчислення відстані між двома об'єктами;
3. Реалізація окремих компонентів наступних рівнів протоколів мережі IEEE 802.15.4:
  - Фізичний рівень. Було реалізовано можливість взаємодії об'єктів з метою передачі повідомлень; оцінку відстані між об'єктами.

- Канальний рівень. Реалізовано обмеження доступу до середовища передачі повідомлень, використовуючи алгоритм CSMA-CA.
- Мережевий рівень. Тут було реалізовано алгоритм оцінки координат об'єктів, що ґрунтується на математичному апараті, описаному в минулому розділі даної роботи.

Таким чином ми реалізували необхідний мінімум, за якого здатні змодельовати та оцінити алгоритми визначення координат у сенсорній мережі. Це дозволило нам відкинути реалізацію задач, що не є потрібними для дослідження алгоритмів визначення координат. Далі детально описано компоненти, з яких складається дана модель.

#### **4.1 Модель сенсорної мережі**

Створена комп'ютерна модель має за мету відтворити роботу бездротової сенсорної мережі. Алгоритм визначення координат можна описати за допомогою наступних кроків:

- обирається певний момент часу  $t_0$ , в який об'єкти мережі випадковим чином будуть розподілені всередині  $S$ , після чого буде здійснено перевірку того, що цей розподіл був рівномірним;
- з об'єктів мережі обирають базис СК з  $q$  об'єктів;
- на проміжку часу  $[t_0; t_0 + T]$  відбувається комунікація об'єктів мережі, а на основі результату взаємодії вони визначають свої нові координати;
- в момент часу  $t_0 + T$  здійснюється збір даних про координати, що отримано протягом часу  $T$ , після чого їх порівнюють з відповідними реальними координатами об'єктів мережі.

При цьому має місце бути кілька припущень щодо характеру функціонування як окремих об'єктів, так і всієї бездротової сенсорної мережі в цілому.

*Мобільність об'єктів.* Першочергово під час розгляду об'єктів мережі важливо встановити динаміку їх пересувань у просторі. Для об'єкта сенсорної мережі доцільно вважати її таким чином: більшість часу об'єкт не змінює



свого положення, тобто має статичні координати, тоді як їх зміна, а отже і рух, теоретично може відбутися через зовнішній вплив на об'єкт. Через це було прийнято рішення досліджувати саме ситуацію, в якій об'єкт не змінює власного розташування. Для неї можемо записати наступне співвідношення ФК на кроці передбачення:

$$\begin{aligned} \vec{r}^{n-} &= \vec{r}^{n-1} \\ p^{n-} &= p^{n-1} \end{aligned} \quad (4.1)$$

На основі умов (3.1) для моделювання були використані оцінки відстаней, отримані при прийомі повідомлень з довільним тимчасовим інтервалом між ними. Облік мобільності окремих об'єктів вимагає модифікації співвідношень (4.1) і синхронізації обміну повідомленнями об'єктів мережі, що виходить за рамки даної роботи.

*Взаємодія об'єктів між собою.* Так як для взаємодії об'єктів мережі між собою використовується загальне середовище передачі даних, то не є можливим реалізувати одночасне спілкування всіх об'єктів між собою. Система передбачає лише одночасну передачу інформації в різних сегментах мережі на певною відстань  $D = O(L)$ .

Для кращого відображення цієї тези розглянемо механізм передачі повідомлень між двома об'єктами (рис. 4.1.):

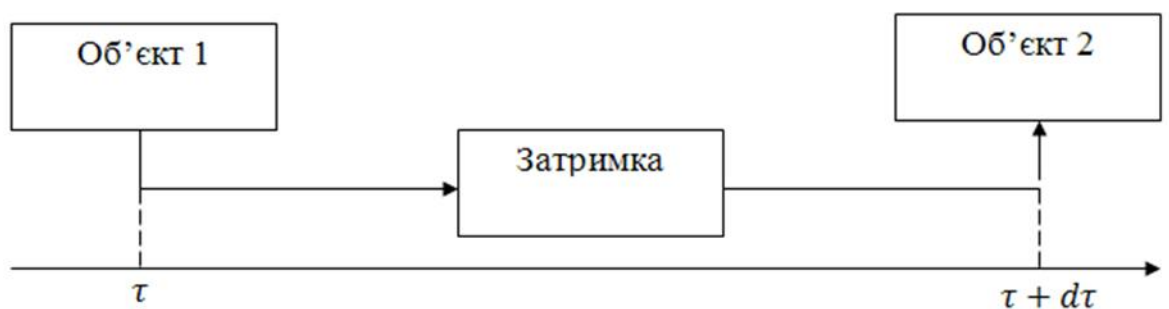


Рис. 4.1. Передавання повідомлення

Повідомлення, що було відправлене об'єктом  $n_t$  у певний момент часу  $\tau$ , отримують всі сусіди  $n_t$ , що перебувають в межах відстані  $L$  від нього протягом часу  $d\tau$ .

Для того, щоб відобразити особливості середовища, до  $L$  додається випадкова величина, тому межі відстані, в межах якої сусіди  $n_t$  отримують повідомлення, можна представити у наступному вигляді:

$$L \leq N(L, \Delta L) \quad (4.2)$$

Аналогічно можна описати доступ до загального середовища передачі даних: для об'єкта  $n_t$  що перебуває у певній точці в момент часу  $n_t$ , канал визнається чистим тоді і тільки тоді, коли в околицях радіуса від цієї точки жоден об'єкт не передає дані. Якщо ж є будь-які два об'єкти на відстані, що не перевищує (3.3), починають передавати повідомлення з різницею в часі меншою за  $dt$  – виникає колізія, і повідомлення не отримує жоден об'єкт мережі.

$$D < N(D, \Delta D) \quad (4.3)$$

*Характер взаємодії об'єктів.* Протягом проміжку  $[t_0; t_0 + T]$  об'єкти здійснюють спілкування між собою, в результаті якого вони оцінюють відстані, на яких відбувалось спілкування, і розраховують свої координати. Варто зазначити, що в будь-який момент часу у взаємодії беруть участь лише ті об'єкти мережі  $j$ , для яких вже було встановлено координати з точністю, що задовільняє встановлений поріг  $\nu$ .

При цьому об'єкт мережі  $j$  відправляє повідомлення своїм сусідам в момент часу  $T$  якщо задовільняються наступні умови:

- сусіди мають відомі координати з необхідною точністю (4.2);
- рівень шумів в каналі менше заданого порогу;
- попереднє вихідне повідомлення від  $j$  було передано не пізніше за момент часу  $\tau - \Delta\tau_1$ ;
- попереднє вхідне повідомлення було прийнято мережею  $j$  не пізніше за момент часу  $\tau - \Delta\tau_2$ .

## 4.2 Модель об'єкта мережі

Схема, зображена на рис. 4.2, відображає алгоритм, за яким працює кожен об'єкт мережі:



Рис. 4.2. Робота об'єкту мережі

У повідомленнях передається лише необхідна для визначення координат інформація. Для кращого сприйняття послідовність, що відбувається при передачі та прийомі повідомлень, зручно розділяти за рівнями стека мережевих протоколів:

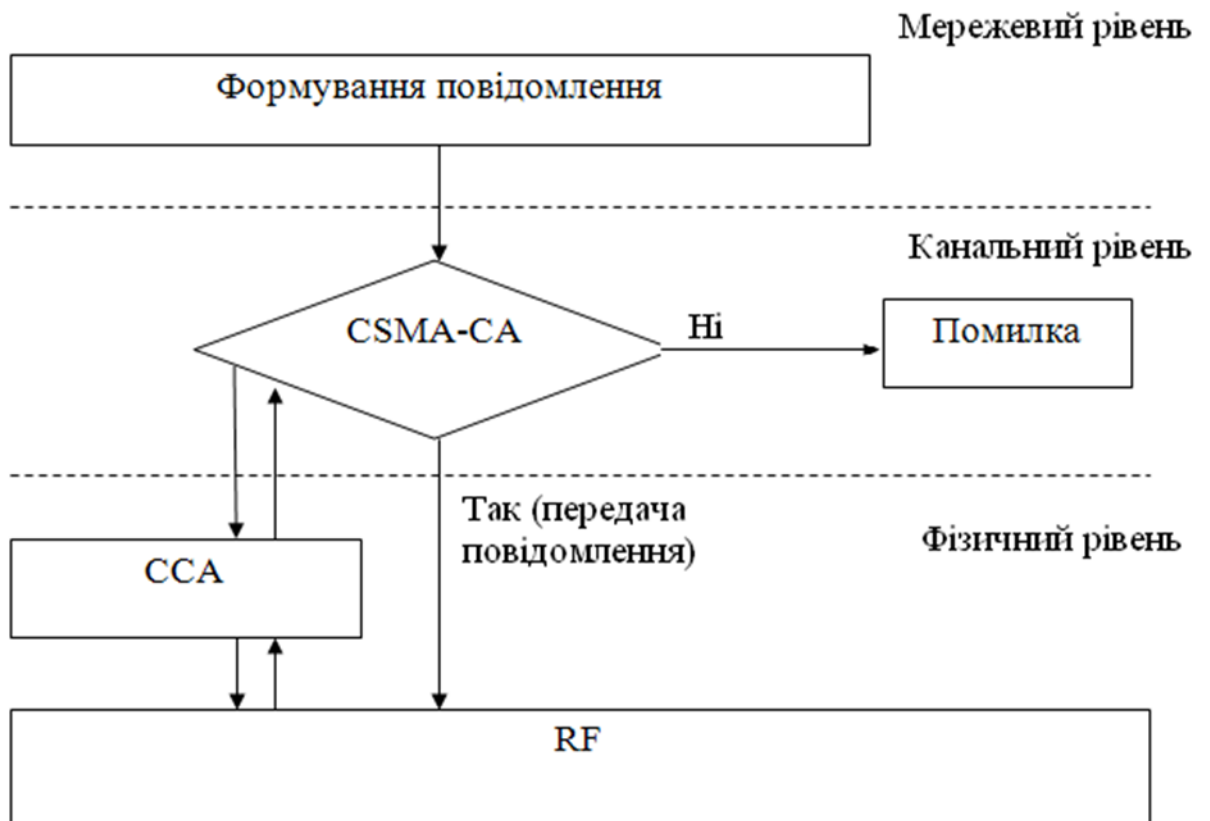


Рис. 4.3 Передача повідомлення

Вихідне повідомлення, що буде надіслано сусідам об'єкта, формується на мережевому рівні. Воно містить ідентифікатор об'єкта  $n_t$ , що здійснює відправлення повідомлення, а також власні координати у вигляді  $\{\vec{r}_{n_t}, p_{n_t}\}$ . На каналному рівні відбувається перевірка рівня шумів у каналі (ССА). На фізичному рівні виконується безпосереднє надсилання повідомлення.

Алгоритм дій, що відбуваються при прийомі повідомлення, зображено на рис. 4.4:

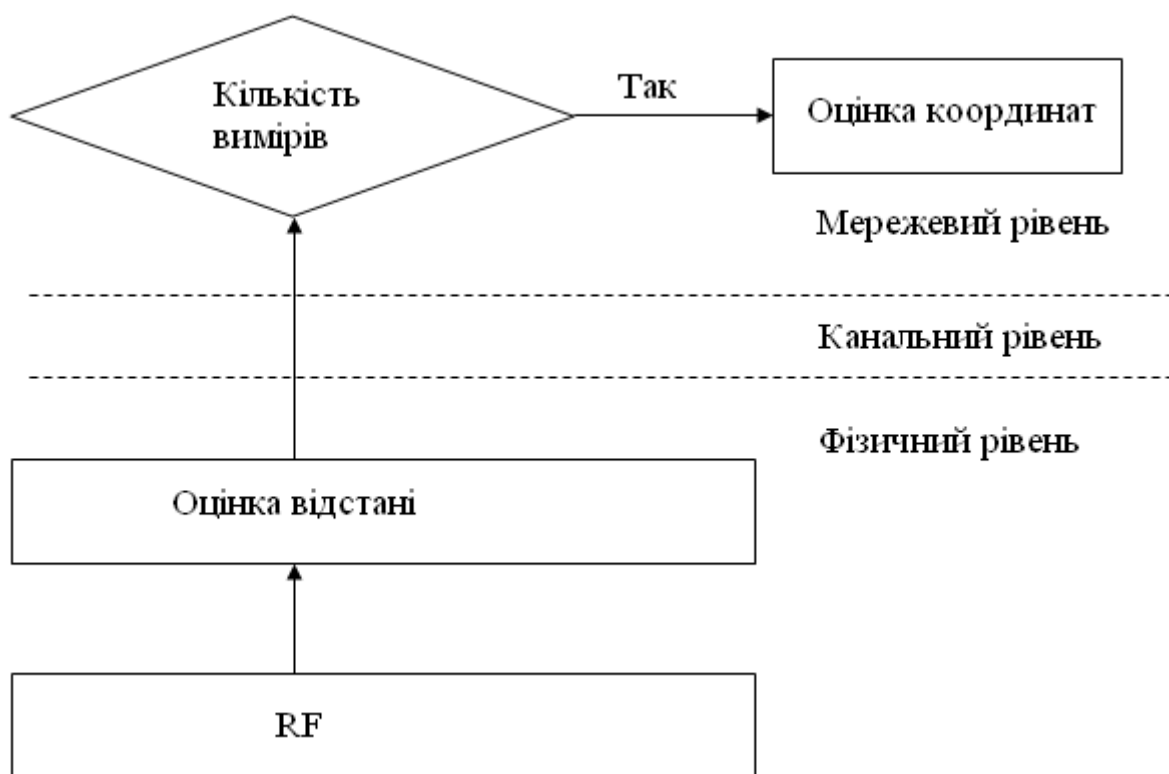


Рис. 4.4 Приймання повідомлення

Коли об'єкт  $n_r$  отримує повідомлення, з нього дістають всю інформацію, оцінюють відстань відстань  $d$  і точність цієї оцінки. Ці дані передаються на мережевий рівень, де визначають або ж уточнюють координати відповідних об'єктів

#### 4.2.1 Фізичний рівень

Фізичний рівень містить 16 каналів передачі даних. Формула для обчислення центральної частоти кожного каналу наступна:

$$F_c = 2405 + 5 * (k + 1),$$

де  $k = 1, \dots, 16$

Для імітаційного моделювання основний інтерес на фізичному рівні представляє максимальний радіус взаємодії  $L$  і точність оцінки відстаней  $d$ . Величина  $L$  визначається потужністю переданого сигналу  $P$  відраховується від величини  $1\text{мВт}$  і може приймати значення близько  $-3\text{дБм}$  з апріорно заданою похибкою. За стандартом максимальне значення цієї похибки може приймати значення не більше  $\Delta P = \pm 1$  дБ. Характер і величина цих відхилень визначаються конкретною фізичною реалізацією передавальної частини і вимагають окремих досліджень, що виходять за рамки даної роботи. Також слід зазначити, що відхилення потужності переданого сигналу  $P = 1\text{дБ}$  в результаті призведе до помилки вимірювання відстані:

$$\delta d_p \sim 1 - 10^{\frac{\Delta P}{10n}} \sim 0.1d \quad (4.4)$$

Радіус дії передавача визначається величиною  $P$  і чутливістю приймача. За стандартом приймач повинен бути здатний приймати сигнал потужністю від  $P > -20\text{дБм}$ , що означає радіус дії при  $P = -3\text{дБ}$  (без урахування впливу антен)

$$d \sim 10\text{м} \quad (4.5)$$

проте реальна дальність дії доступних прийомопередатчиків ZigBee (зокрема [17]) може бути вагомо вищою – порядку 100м).

Додатково слід зазначити такі особливості програмної реалізації фізичного рівня:

- для оцінки відстані між об'єктами використовуються статистичні розподіли, отримані на етапі дослідження типового для сенсорних мереж тракту "передавач-канал-приймач";
- помилка вимірювання відстаней складається з помилок, внесених передавачем, каналом і приймачем.

#### 4.2.2 Канальний рівень

Канальний рівень має задачу розмежування доступу до загального середовища передачі даних, використовуючи алгоритм CSMA-CA (рис. 4.5):

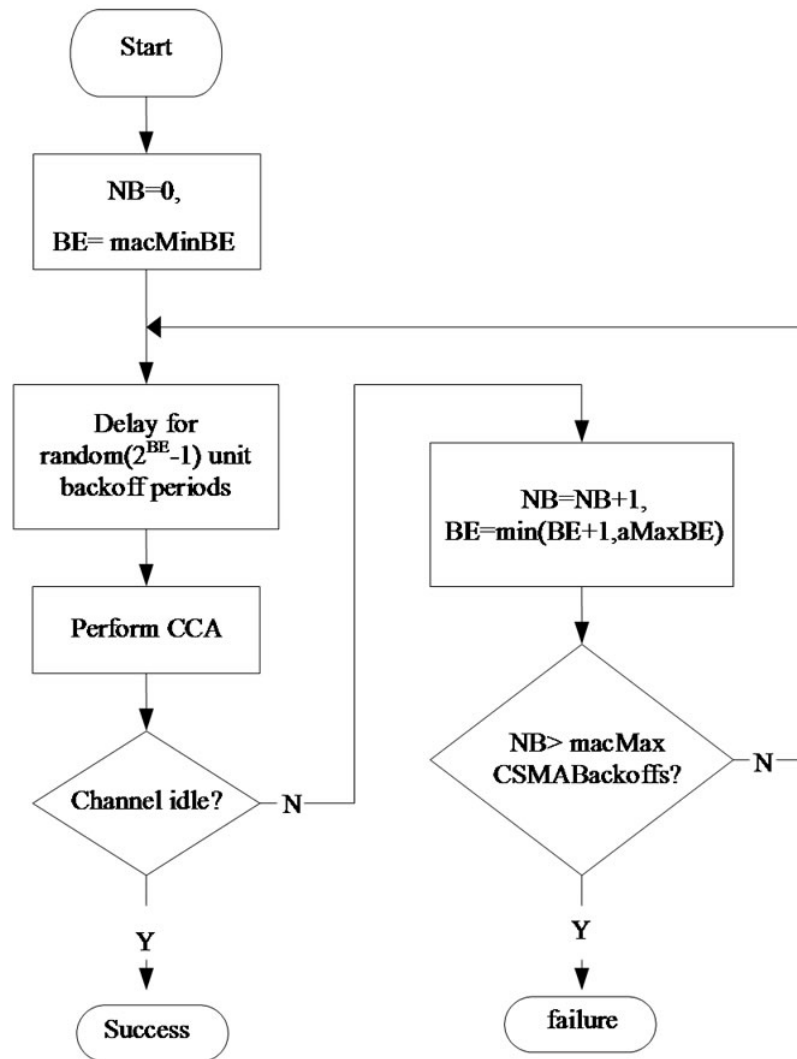


Рис. 4.5 Механізм CSMA-CA

Щоб довідатись чи є канал вільним, використовується алгоритм оцінки рівня шумів у каналі (Channel Clearance Algorithm, CCA). Він полягає в наступному: мінімальна відстань між двома об'єктами, які можуть передавати дані одночасно в одному і тому ж каналі не може бути менше фіксованої величини, яка може бути оцінена виходячи з вимог в [1]. Канал визнається зайнятим якщо на вході приймача не менше  $\Delta P = +10$  дБ щодо визначеного в стандарті рівня чутливості  $P_{min} = -85$ дБм, тобто якщо два об'єкти знаходяться на відстані один від одного не менш, ніж:

$$L = \lambda \sqrt{\frac{P_r}{P_{min} + \Delta P}} \sim 100\text{м} \quad (4.6)$$

### 4.2.3 Мережевий рівень

Мережевий рівень стека мережевих протоколів в специфікації [2] стека мережевих протоколів [1] - [2] складається з двох частин, які реалізують наступну функціональність:

1. Network Layer Data Entity (NLDE):
  - формування пакетів мережевого рівня;
  - маршрутизація;
  - безпека.
2. Network Layer Management Entity (NLME):
  - конфігурування пристрою (залежно від типу топології);
  - початок роботи в мережі;
  - приєднання до мережі, від'єднання від мережі;
  - адресація;
  - складання таблиць маршрутизації;
  - складання шляхів для маршрутизації пакетів.

Дана модель на мережевому рівні реалізує лише алгоритм визначення координат об'єкта сенсорної мережі. Його роботу схематично представлено на рис. 4.6:

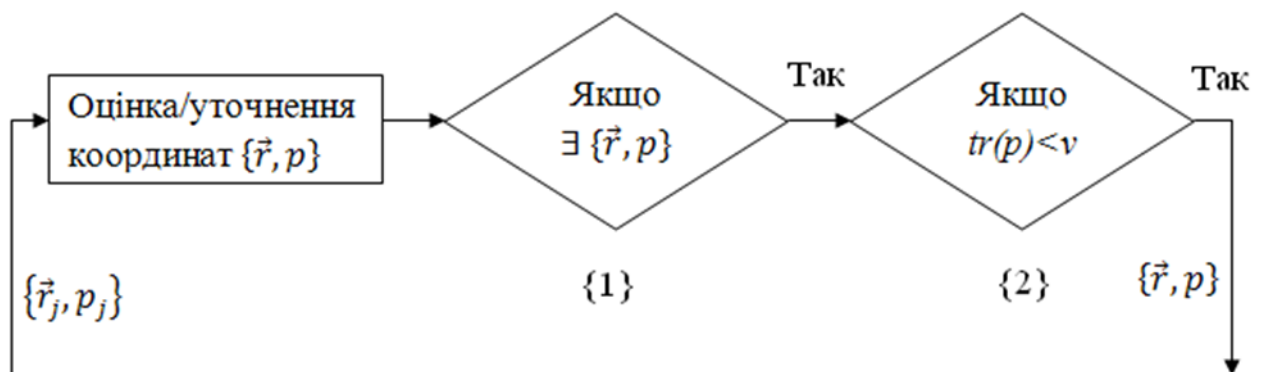


Рис. 4.6 Оцінка координат на мережевому рівні

Оцінка і уточнення координат відбувається у міру накопичення достатнього обсягу інформації від довколишніх сусідів у таблиці T.

У випадку виконання умов {1-2} після завершення обробки отриманих даних відбувається передача broadcast пакета. Даний процес також виконується після того, як мине заданий інтервал часу, з метою прискорення моделювання алгоритму визначення координат (за рахунок збільшення обсягу переданого трафіку в мережі).

### 4.3 Результати моделювання

Дослідження, що ґрунтуються на основі імітаційного моделювання, мають на меті всебічну оцінку можливих меж застосування обраного алгоритму визначення координат. Основним моментом є можливість застосування алгоритму в мережах ZigBee. На цьому побудоване подальше дослідження.

Щоб визначити сферу, для якої є доцільним використання алгоритму, необхідно встановити відповідність між параметрами, що впливають на його роботу:

- Розміри та топологія мережі ( $S, M, m, Q, q$ );
- Індивідуальні характеристики окремих об'єктів мережі, залежні від застосовуваного стандарту радіозв'язку ( $L, \sigma_d$ ).

Відповідно з такою постановкою завдання імітаційного моделювання можна розділити на дві частини:

- Оцінка радіусу дії об'єктів мережі  $L$ , можливість вимірювання відстані між сусідніми об'єктами мережі  $d$  в мережі IEEE 802.15.4/ZigBee на основі рівня прийнятого сигналу (RSSI); оцінка точності одержуваних вимірів  $\sigma_d$
- Відшукання прийнятних з точки зору оцінки координат характеристик бездротової сенсорної мережі  $S, M, m, Q, q, L, \sigma_d$

Через використання RSSI для оцінки відстані, в імітаційну модель закладається можливість аналізу дистанції за наявності прямої видимості між передавачем і приймачем. Це відповідає ситуації розгортання мережі поза приміщеннями та на відстані від штучних перешкод, пов'язаних з явищем інтерференції.



Якщо ж дані умови не виконуються (тобто відсутня пряма видимість між об'єктами), мережа повинна відповідати жорсткішим умовам, а також необхідно обирати нові способи оцінки відстаней, що призводить до потреби корегування початкової постановки завдання.

#### 4.3.1 Оцінка відстані

Головним питанням на даному етапі роботи є теоретична оцінка точності вимірювання відстаней, а також дальності дії у вільному просторі, що дозволяє у подальшому порівнювати результати у ситуації роботи всередині приміщення.

Імітаційне моделювання тракту "передавач-канал-приймач" було розроблено на початковому етапі даної роботи в середовищі Matlab версії 7.0 [14]. Щоб спростити структуру вихідних m-файлів, елементи тракту "передавач- канал-приймач" були реалізовані у вигляді так званих COM-компонент, які потім об'єдналися з m-файлами в процесі моделювання.

*Передавач.* Цей елемент відповідає за перетворення вихідних даних в аналоговий радіосигнал із заданою частотою дискретизації. Задля досягнення цього результату в компоненті була реалізована наступна функціональність:

- формування пакету MAC рівня з вихідних даних;
- перетворення пакету MAC рівня в пакет PHY рівня;
- перетворення пакету PHY рівня у відповідну чипову послідовність;
- перетворення чіпової послідовності у вихідний аналоговий радіосигнал із заданою частотою дискретизації;
- фільтрація у вихідному ФНЧ типу "піднятий косинус".

*Канал.* Функціонал даного елемента полягає у здійсненні згортки з передавальної характеристики каналу передачі, отриману відповідно до моделі SMRCIM [8]. Дана модель може використовуватися з метою отримання передавальних характеристик каналу для випадків всередині і поза приміщенням.

*Приймач.* Елемент "приймач" являє собою імітаційну реалізацію кореляційного приймача. Для цього всередині даної компоненти реалізована наступна функціональність:

- фільтрація у вхідному ФНЧ;
- синхронізація прийнятого аналогового сигналу, яка необхідна внаслідок наявності затримок в бездротовому каналі;
- перетворення аналогового сигналу в 32 псевдовипадкові чіпові послідовності, визначені в [1] і вибір правильної послідовності на основі кореляційних співвідношень;
- перетворення чіпових послідовностей в пакет РНУ рівня;
- перетворення пакету РНУ рівня в пакет МАС рівня;
- витяг вихідних даних.

Крім зазначеної функціональності, дана компонента також дозволяє отримувати якісні характеристики, а саме: ймовірність помилки, оцінку рівня сигналу, затримку сигналу.

Під час моделювання роботи тракту "передавач-канал-приймач" канал використовувався для передачі пакетів з фіксованою довжиною з подальшою оцінкою параметрів системи для підведення підсумків роботи та їх зображення. На результат впливали наступні параметри (табл. 3.3.1):

Таблиця 4.1

Параметри для моделювання передавач – канал – приймач

$f_c$	2000000	Чіпова швидкість передачі [1]
$N_{mac}$	100	Розмір початкового пакету МАС рівня в октетах
$S_{pc}$	64	Кількість відліків на 1 чіп
$n_{lpf}$	32	Порядок ФНЧ передавача і приймача
$r_{lpf}$	0.5	Rollof factor
$\sigma_{ch}$	$0.01P_t$	Дисперсія адитивного гаусового шуму в каналі

Після передачі кожного пакета оцінюються такі величини:

- Потужність сигналу на виході передавача;
- Потужність шуму в каналі;
- Потужність сигналу на вході приймача;
- Відносна кількість бітових помилок в пакеті, отриманому в приймачі;
- Потужність сигналу, що оцінюється в приймачі;
- Копія переданого пакета MAC рівня, отримана в приймачі;
- Вихідний переданий пакет MAC рівня (створюється випадковим чином).

У кожному випадку виходило дві залежності:

- для випадку поза приміщенням;
- для випадку всередині приміщення.

Нижче проілюстровано ослаблення сигналу в каналі в залежності від відстані між передавачем і приймачем.

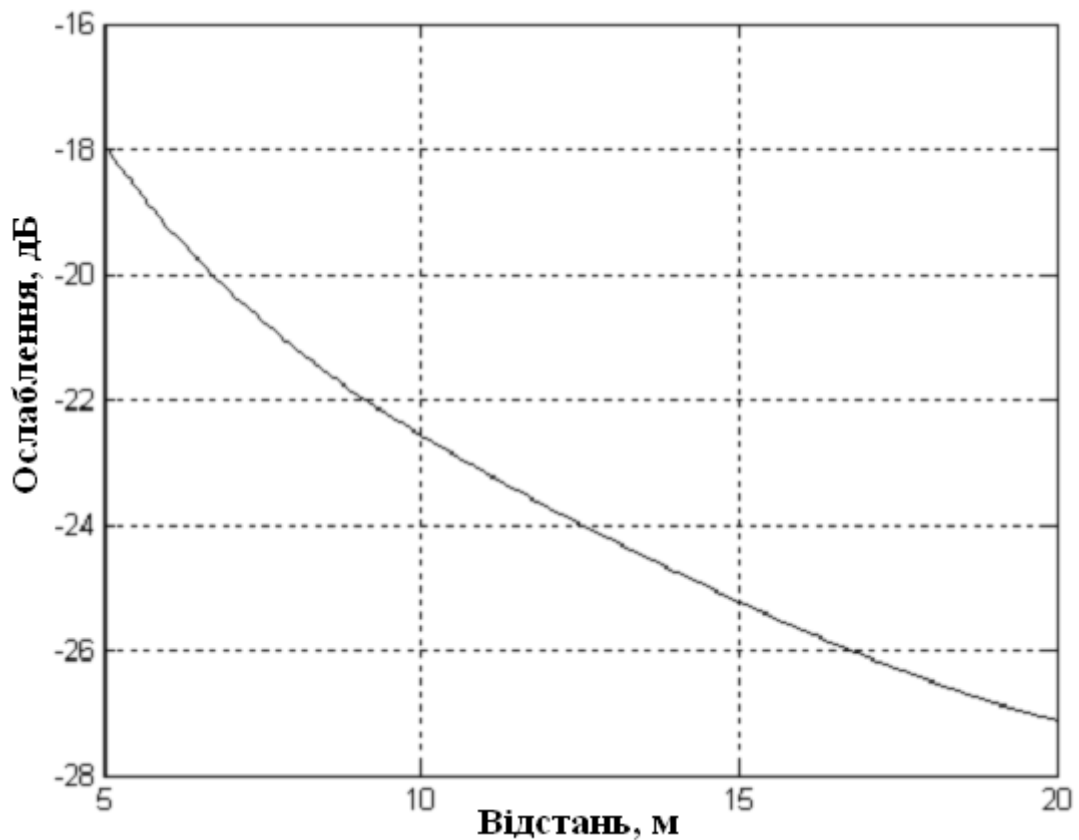


Рис. 4.7 Залежність ослаблення сигналу від відстані у випадку розміщення передавача і приймача поза приміщенням

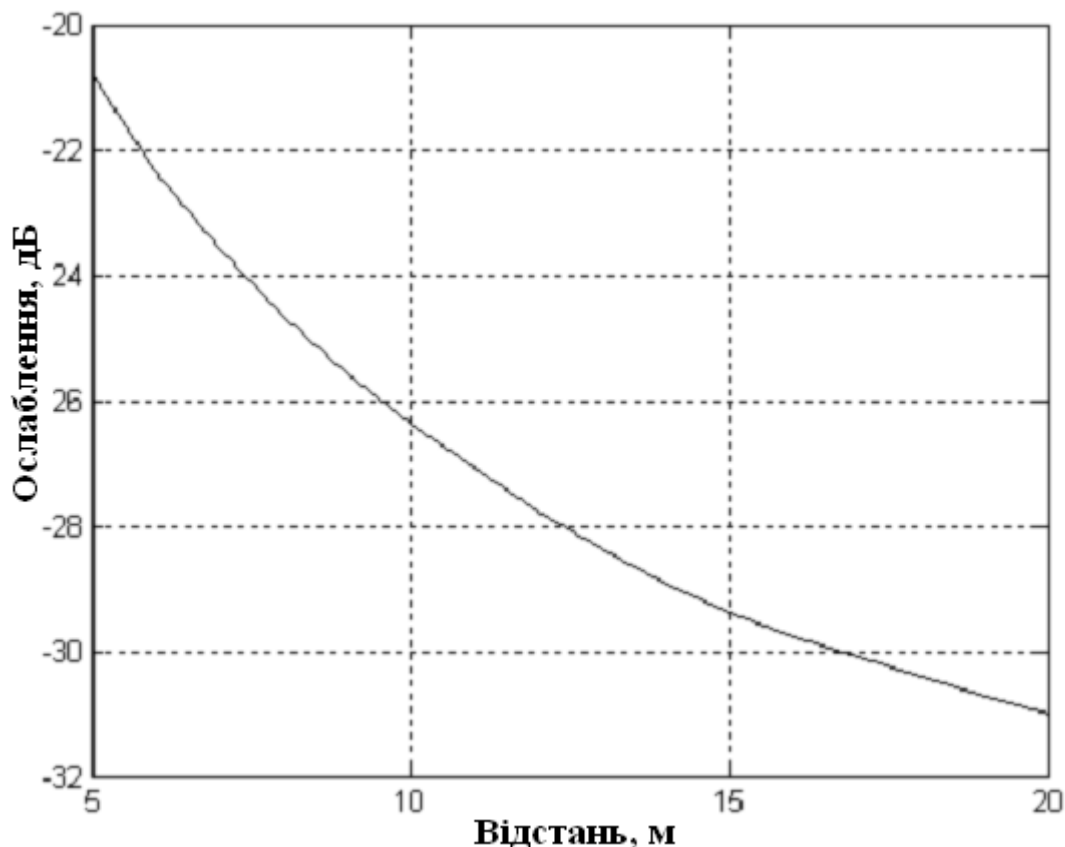


Рис. 4.8 Залежність ослаблення сигналу від відстані у випадку розміщення передавача і приймача в приміщенні

Щоб встановити дані залежності було обчислено потужності сигналів на виході передавача та вході приймача. Далі усереднювали різницю між ними та відклали на осі ординат в логарифмічному масштабі. Оскільки модель каналу передачі SMRCIM носить ймовірнісний характер, для відображення плавної залежності вимірювання проводили на тривалості 100 інформаційних пакетів для кожного значення відстані. Ці значення обирали з проміжку від 5 до 20 метрів з інтервалом 3 метри.

На рис. 4. 9 та 4.10 показані залежності кількості бітових помилок (BER) від відстані між передавачем й приймачем поза приміщенням та в приміщенні:

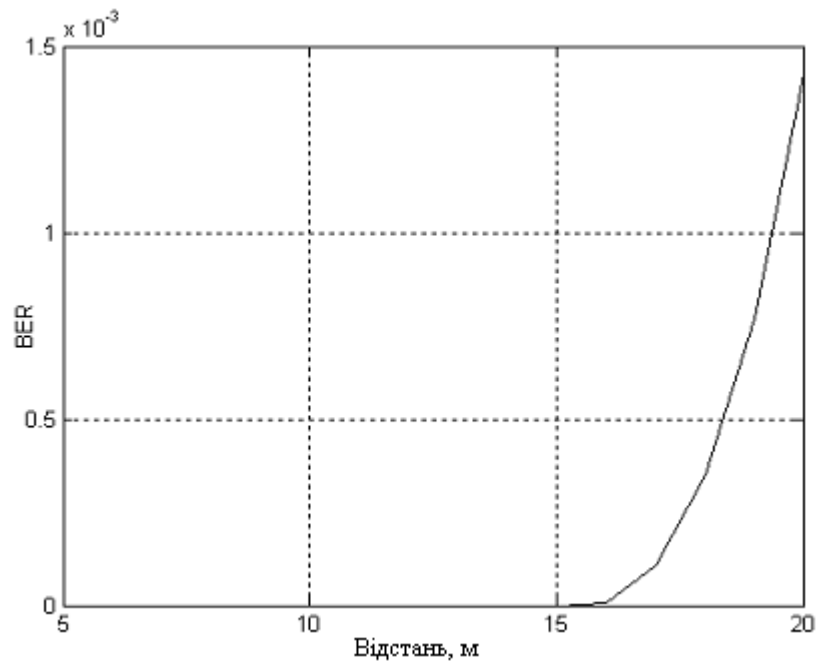


Рис. 4.9 Залежність кількості бітових помилок (BER) від відстані між передавачем й приймачем поза приміщенням

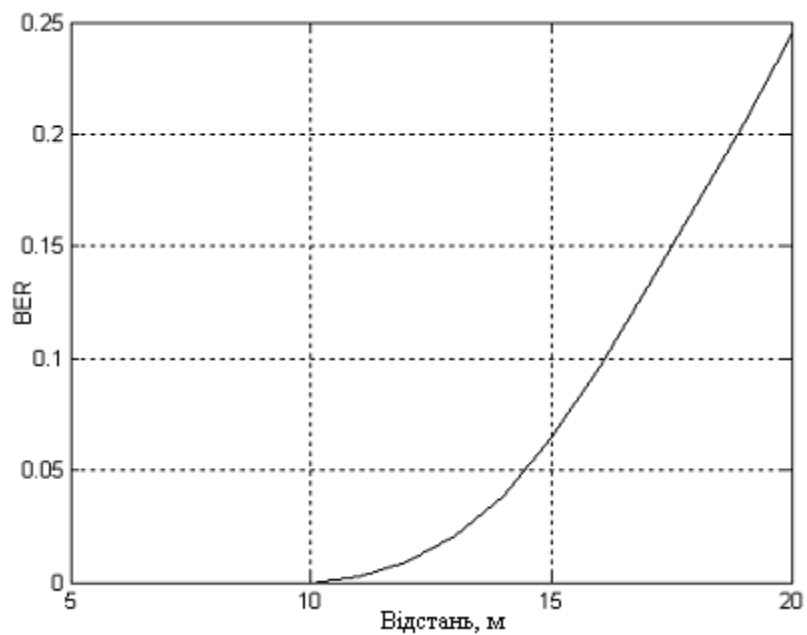


Рис. 4.10 Залежність кількості бітових помилок (BER) від відстані між передавачем й приймачем в приміщенні

Кожна точка графіків отримана шляхом усереднення вимірювань на тривалості 100 інформаційних пакетів, кожен тривалістю 200 біт. На рис. 4.11 та рис. 4.12 показані залежності числа бітових помилок від відношення сигнал / шум.

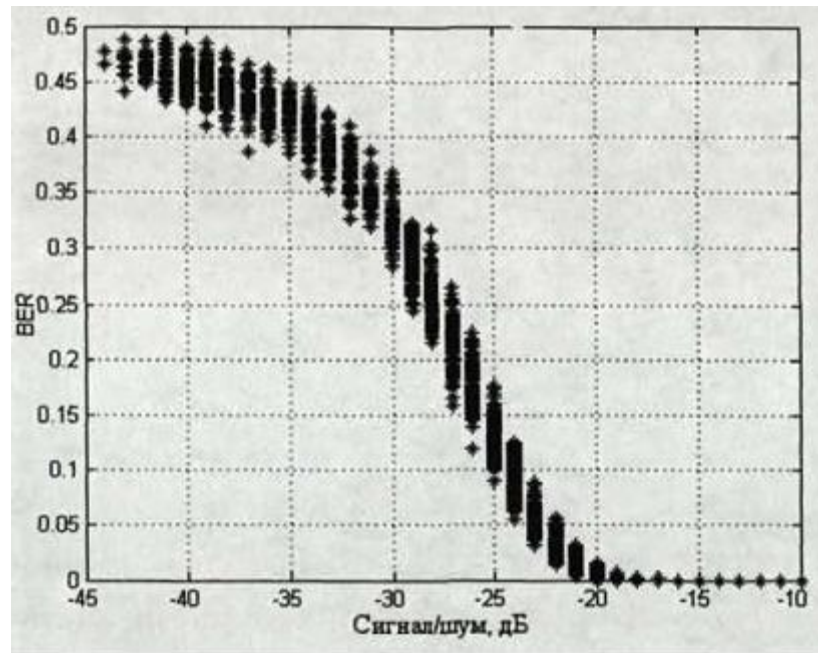


Рис. 4.11 Залежність числа бітових помилок від відношення сигнал/шум поза приміщенням

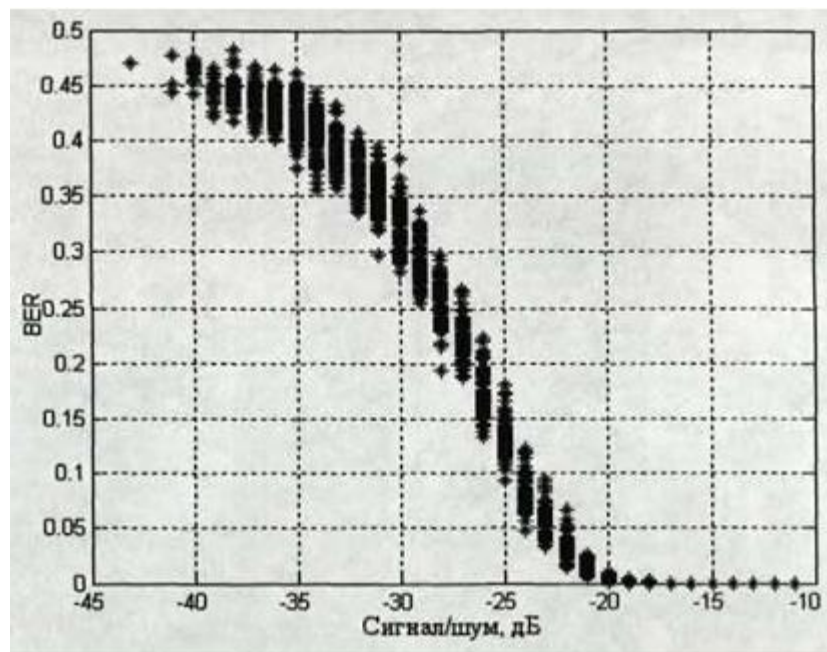


Рис. 4.12 Залежність числа бітових помилок від відношення сигнал/шум в приміщенні

У графіках використовували дані, що були отримані при передачі 2000 пакетів. Додатково було округлено значення сигнал/шум до найближчого цілого.

Рисунки 4.13 та 4.14 зображають залежність відносної помилки вимірювання відстані від фактичної відстані між передавачем і приймачем

для ситуацій у приміщенні та поза ним. Розглянуто відстані від 5 до 20 метрів з інтервалом 1 метр.

На рис. 4.15 і рис. 4.16 відображено асимптотику потужності сигналу в приймачі при збільшенні відстані між передавачем і приймачем поза приміщенням та в приміщенні. Кожна точка отримана шляхом усереднення на 10 інформаційних пакетів, кожен об'ємом 100 біт.

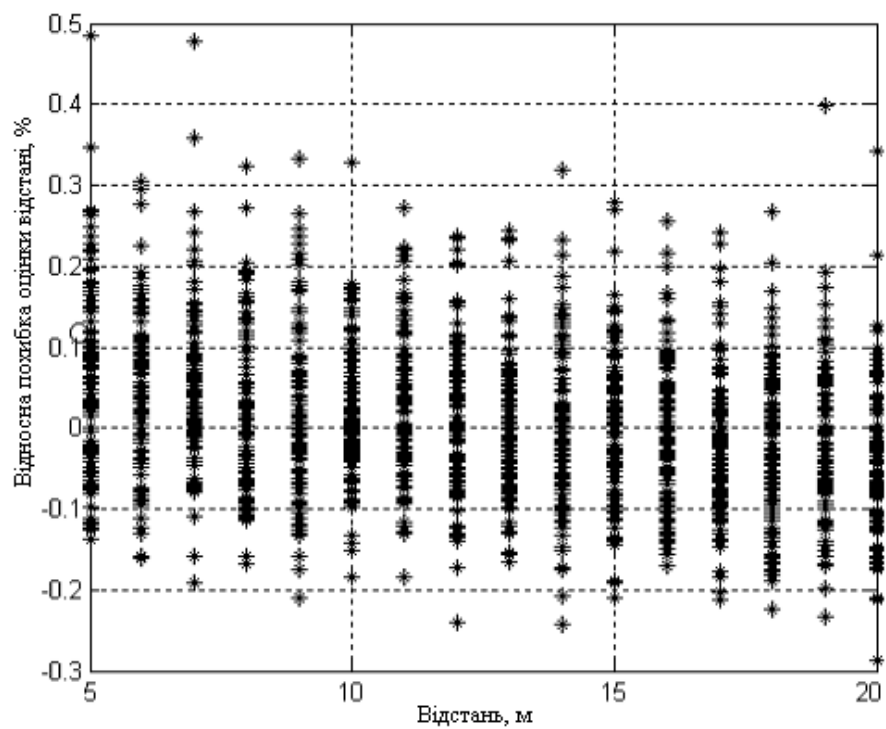


Рис 4.13 Залежність відносної похибки оцінки відстані від відстані поза приміщенням

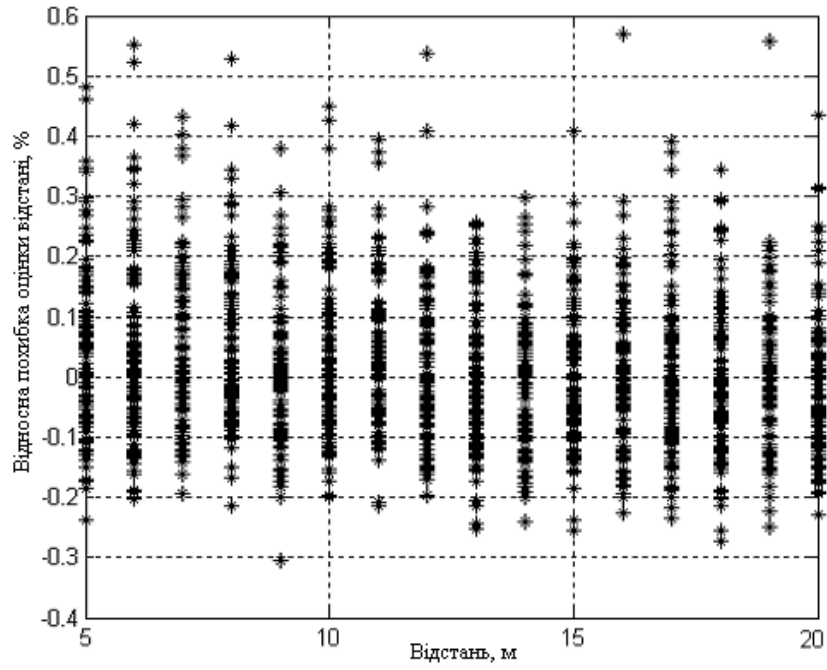


Рис 4.14 Залежність відносної похибки оцінки відстані від відстані в приміщенні

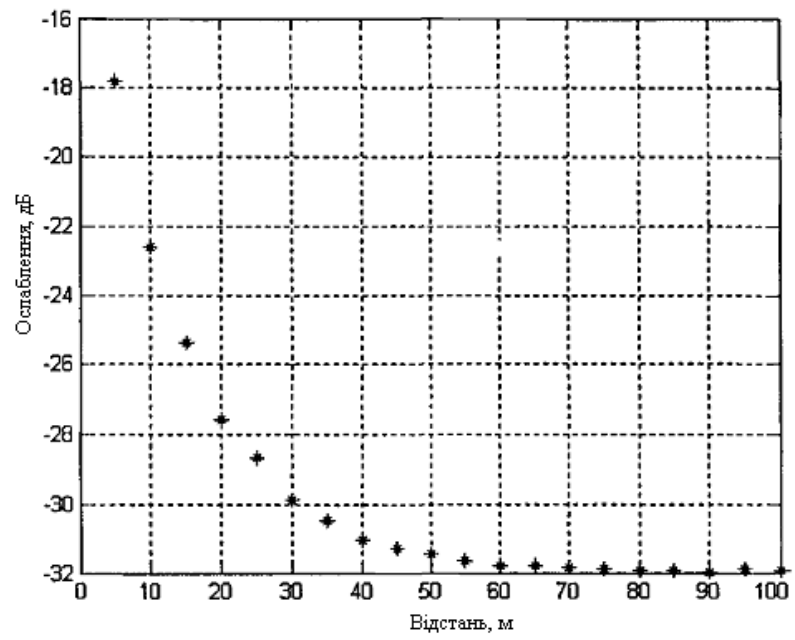


Рис. 4.15 Оцінка сигналу в приймачі, що знаходиться поза приміщенням



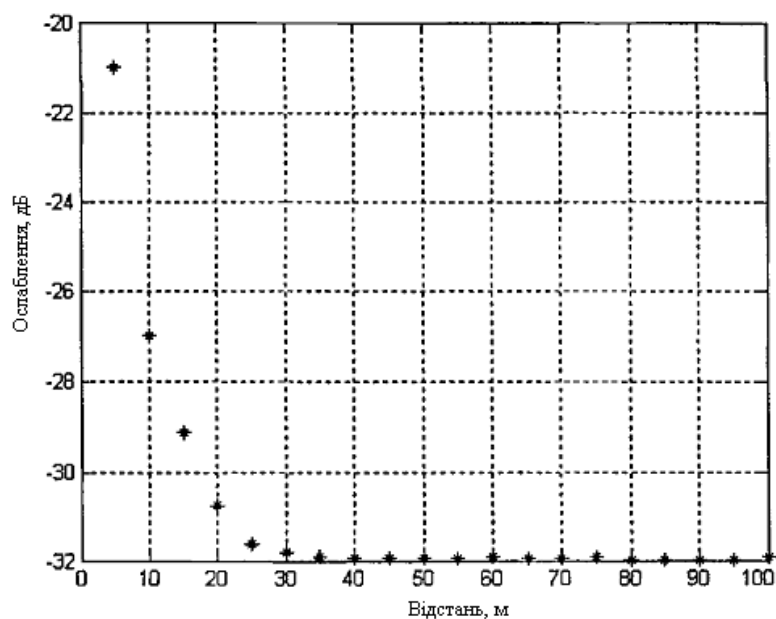


Рис. 4.16 Оцінка сигналу в приймачі, що знаходиться в приміщенні

На основі даних залежностей можна оцінити максимальну дальність між передавачем і приймачем, при якій можлива оцінка відстані.

#### 4.3.2 Оцінка координат

При дослідженні поведінки алгоритму визначення координат використовувалися такі типові ([9], [12],) значення параметрів, що характеризують топологію бездротової сенсорної мережі (табл. 4.2):

Таблиця 4.2

Параметри, що характеризують мережу

$A$	100	Географічні розміри мережі ( $S=A*A$ ), кв.м
$M$	200	Число об'єктів мережі
$M$	15	Щільність мережі
$m'$	70	Ступінь рівномірності розподілу об'єктів мережі
$Q$	0,25	Частка об'єктів, координати яких відомі апріорі
$Q$	1.5L	Ступінь рівномірності розподілу орієнтирів всередині мережі
$\Delta T$	60	Час моделювання, с

Поведінка об'єкта описується наступними змінними (табл.4.3):

Таблиця 4.3

Параметри, що характеризують поведінку об'єкту

$\sigma_d$	0.1	Дисперсія розподілу оцінки відстані по рівню сигналу
$L$	25	Максимальна дальність зв'язку
$\Delta\tau_1$	1	Мінімальний час очікування об'єкта між посилкою двох послідовних broadcast пакетів (за наявності координат)
$\Delta\tau_2$	5	Максимальний час очікування об'єкта між посилкою двох послідовних broadcast пакетів (за наявності координат)

Для роботи імітаційного моделювання генерувалась сенсорна мережа вмістом в  $M$  об'єктів, що рівномірно розподілені на певній області  $S = A * A$ . З них  $Q$  об'єктів апіорі точно знають власні координати.

Після успішної генерації мережі починається етап обміну пакетами та оцінки координат. По завершенню періоду  $\Delta T$  відбувається збір інформації та встановлюють ефективність роботи алгоритму по наступним показникам:

- кількість об'єктів, що здійснили оцінку координат за вказаний інтервал часу  $M'$ ;
- наскільки точними є отримані координати залежно від величин  $Q, m, \sigma_d$ .

З метою дослідження обсягу трафіку, необхідного для оцінки координат, було досліджено швидкість збіжності алгоритму. Оскільки швидкість збіжності в абсолютній часовій шкалі визначена інтенсивністю трафіку, тимчасовою шкалою використовується кількість ітерацій ФК. На рис. 3.3.2.1 зображено залежність усередненої помилки виміряних координат по всіх об'єктах:  $\overline{\delta r_i} = \sum_1^i \frac{|\vec{r}_i - \vec{r}_{ik}|}{i}, i \in M', k \in [1, \dots, 50]$  при початкових умовах  $M = 100, Q = 0.2M, \sigma_d = 0.12$

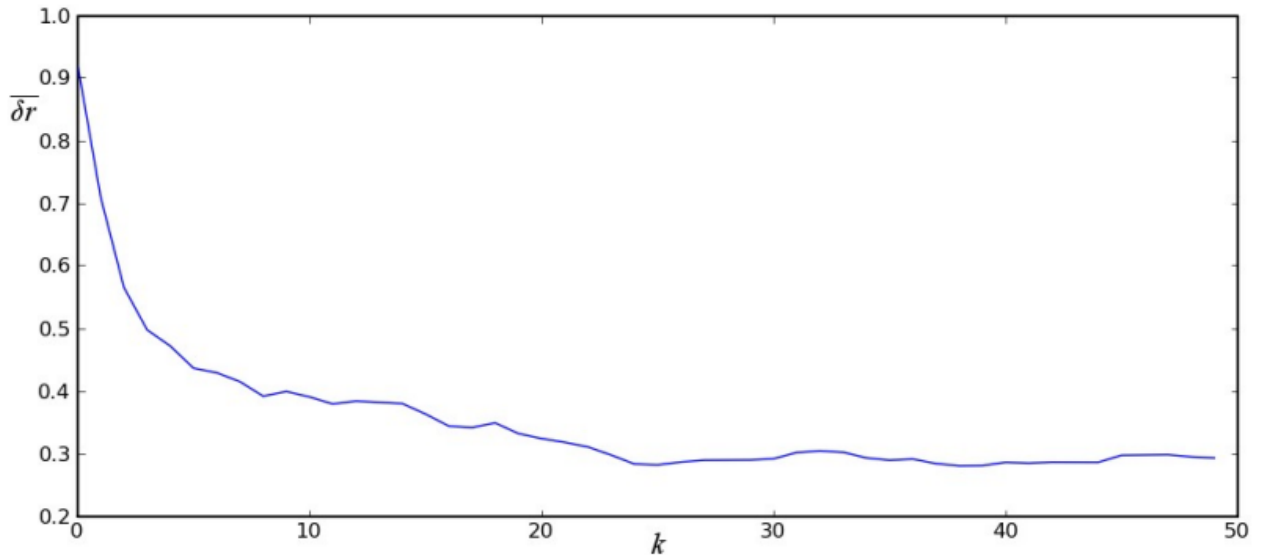


Рис. 4.17 Залежність усередненої помилки виміряних координат від номеру ітерації ФК

Нижню межу необхідної кількості переданих пакетів для визначення координат можна оцінити наступним чином: для оцінки координат об'єкта  $i$  потрібно  $b_i = 60$  broadcast пакетів. При заданих величинах  $m$  і  $q$  від кожного з орієнтирів, що знаходяться в безпосередній близькості від  $i$ , об'єкт  $i$  отримує  $b_{ij} = \frac{b_i}{qm}$  пакетів. У масштабі всієї мережі виходить:

$$b_{ij} = \frac{b_i}{qm} Q = \frac{b_i}{m} M \quad (4.4)$$

пакетів. У залежності, представленій на рис. 4.17, були використані значення  $m = 12$ ,  $M = 100$ . За таких умов обсяг трафіку сенсорної мережі становить приблизно 500 пакетів, що є доволі незначним значенням порівняно з іншими алгоритмами. Останні ґрунтуються на використанні таблиць маршрутизації та використанні інформації про положення об'єктів, які не є безпосередніми сусідами ([13], [9], [12],).

Раніше було відмічено що результат оцінки координат залежить від власних характеристик мережі як-то: середнє число сусідів  $m$  і частка об'єктів, які спочатку здатні слугувати орієнтирами  $q$ . До того ж вагому роль відіграє точність вироблених вимірів відстаней  $\sigma_d$ . Якщо використовувати відстані в мережах стандарту [1], отримані на основі оцінки рівня сигналу, то ця величина фіксована і, за умови відсутності перешкод між передавачем і

приймачем, становить порядку  $\sigma_d = 12\%$ . У випадку використання інших сигналів або методів оцінки відстаней точність може підвищитись [15].

Імітаційна модель дозволяє оцінити можливу ефективність алгоритму визначення координат за відповідності мережі таким умовам. На рис.4.18 показана залежність результатів роботи алгоритму від величин  $m$  та  $\sigma_d$  у вигляді частки об'єктів, що не оцінили свої координати ( $M-M'/M$ ), при цьому у кожній ітерації моделювання варіювалися такі величини: параметр  $m$  в межах від 10 до 20 сусідів і параметр  $\sigma_d$  в межах від 0 до 0,1. Отримані залежності відображено у вигляді двовимірних поверхонь з відкладеними в горизонтальній площині значеннями параметрів  $m$  та  $\sigma_d$ . Для розрахунку даної залежності було використано таке значення величини  $Q = 0.25M$ , кожна точка на даному графіку отримана за результатами усереднення по 10 ітераціях.

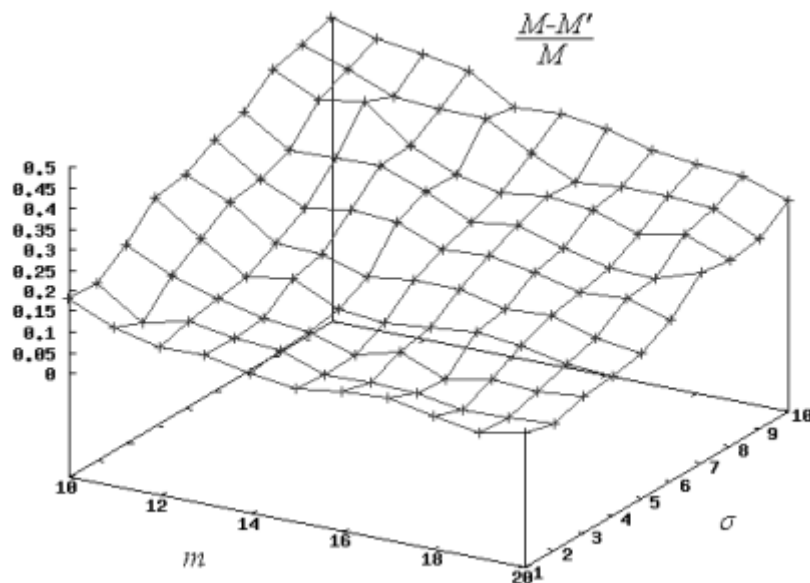


Рис. 4.18 Кількість об'єктів, що не оцінили координати в залежності від  $m, \sigma$

Наведений рисунок демонструє пропорційне збільшення  $M'$  до  $0.9M-1.0M$  при зменшенні величини  $\sigma_d$  залежно від топології мережі. Ефективність роботи алгоритму покращується від збільшення середнього числа сусідів  $m$ .

На наступному рис. 4.19 зображує зміну середньої помилки  $\overline{\delta r} = \overline{\delta}_i$  при зміні величин  $m$  та  $\sigma_d$  в тих же межах. Дана залежність використовувала

значення величини  $Q = 0.25M$ , кожна точка даного графіку отримана за результатами усереднення по 10 ітераціях.

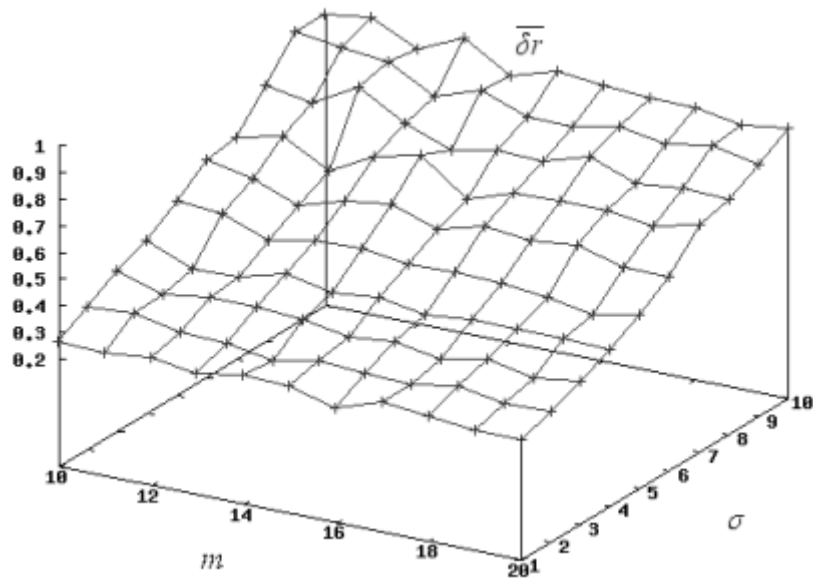


Рис. 4.19 Усереднена помилка оцінки координат залежно від  $m, \sigma$

Як видно з наведеного рисунка, при зменшенні величини  $\sigma_d$  пропорційно збільшується точність отриманих координат.

На наступному рис. 4.20 показана залежність результатів роботи алгоритму від величин  $q, \sigma_d$  у вигляді частки об'єктів що не оцінили свої координати  $(M-M'/M)$ , при цьому на кожній ітерації моделювання варіювалися такі величини: параметр  $q$  в межах від  $0.2$  до  $0.5M$  і параметр  $\sigma_d$  в межах від  $0$  до  $0.1$ . Отримані залежності зображені у вигляді двовимірних поверхонь з відкладеними в горизонтальній площині значеннями параметрів  $q$  і  $\sigma_d$ . Кожна точка на даному графіку отримана за результатами усереднення по 10 ітераціях.

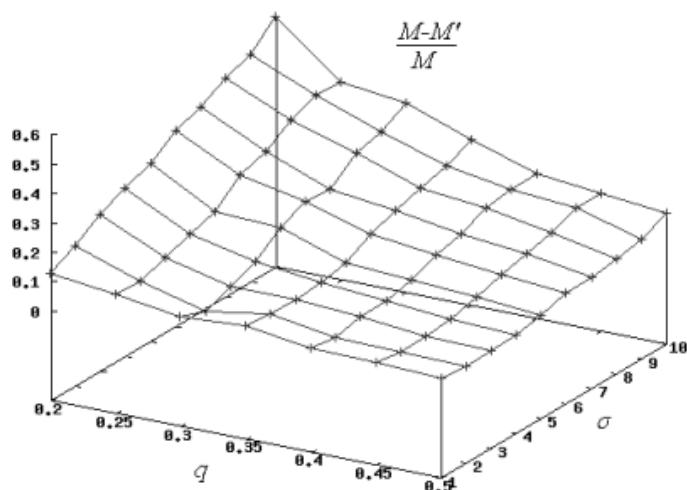


Рис. 4.20 Число об'єктів, які не оцінили координати залежно від  $q, \sigma$

На наступному рис. 4.21 показано середню помилку (в залежності від зміни величин  $q$  і  $\sigma_d$  в тих же межах. Кожна точка на даному графіку отримана за результатами усереднення по 10 ітераціях.

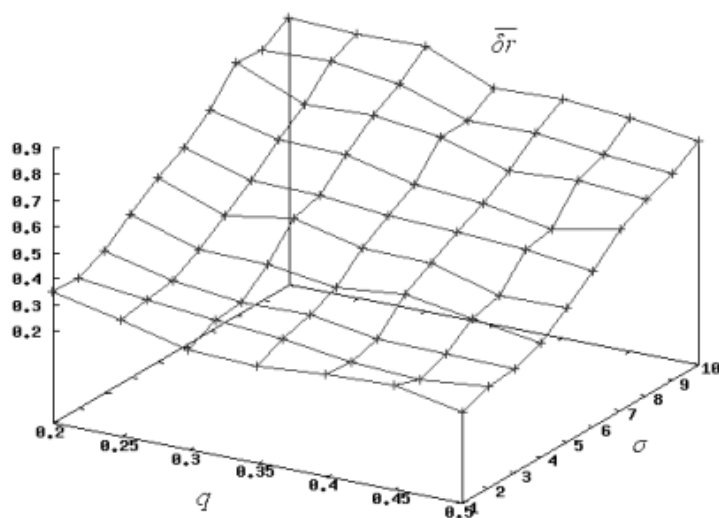


Рис. 4.21 Усереднена помилка оцінки координат залежно від  $q, \sigma$

## Висновки

1. Запропонований в даній дипломній роботі розподілений алгоритм визначення місця розташування об'єктів в бездротовій сенсорній мережі використовує лише інформацію від безпосередніх сусідів об'єкта в якості вихідних даних для оцінки координат.

2. Використовуючи імітаційне моделювання було створено комп'ютерну модель, завдяки якій були отримані якісні характеристики запропонованого алгоритму визначення координат.
3. Якщо для побудови бездротової сенсорної мережі використовувати прийомо-передавачі стандарту IEEE 802.15.4, а для виміру точок – оцінки, засновані на рівні сигналу, то за наявності прямої видимості між передавачем та приймачем відносна точність вимірів становить приблизно 12%. У випадку ж зовнішніх умов результати роботи запропонованого алгоритму залежать від ступеня рівномірності і щільності розподілу об'єктів мережі (середнє число сусідів  $m$  при фіксованих розмірах мережі) і частки об'єктів мережі, які можуть служити орієнтирами  $q$ .
4. Результати імітаційного моделювання на персональному комп'ютері дозволяють стверджувати про працездатність алгоритму при  $m > 10$  та  $q > 0,2$ , оскільки більше 90% об'єктів мають умови для оцінки власних координат за отриманими даними. Оцінки координат, отримані за результатом Калманівської фільтрації (після приблизно 30 ітерацій ФК), збіжні до значень в межах  $\delta r = 1\text{м}$  від реальних координат об'єктів мережі. Такі оцінки, на жаль, не є оптимальними, проте вони потребують мінімум обчислювальних ресурсів та трафіку для отримання необхідної інформації про положення у просторі стосовно сусідів даного об'єкта. Зокрема в мережі, що складається з  $M = 100$  об'єктів з  $Q = 0.2M$ ,  $S = 100 \times 100$  мінімально необхідний для оцінки координат обсяг трафіку складає близько 500 broadcast пакетів
5. Середня помилка визначення координат, отримана використовуючи створену модель, залежить від помилок оцінок відстаней. Тому чим точніше здійснюється вимірювання відстаней (наприклад використовуючи інші способи вимірювання відстаней – TOA, TDOA та інші), тим точнішими будуть координати, а також збільшиться швидкість збіжності алгоритму. Зокрема при  $\sigma_d < 5\%$  одержувана

середня помилка оцінки координат виявляється менш  $0.3m$  за умови  $q > 0,25$  та  $m > 12$ .



## РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

Шоста частина дисертації представляє економічний аналіз перспектив введення розглянутих методів розвитку локалізації в безпроводових сенсорних мережах на основі застосування адаптивного алгоритму кластеризації.

### 1.1 Опис ідеї стартап проекту

Вектор даного проекту очікує підвищення продуктивності локалізації в відомих бездротових сенсорних мережах для здобуття вищих показників ефективності систем, диверсифікації витрат енергії датчиків та запобіганню можливих втрат через збою сенсорів.

Таблиця 5.1.

Опис ідеї проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигода для користувача
Алгоритм локалізації FT-TEEN в безпроводових сенсорних мережах	1. Передача інформації на БС тільки за допомогою участі датчиків-лідерів. 2. Покращення значень доступності та масштабованості системи.	Оператори БСМ матимуть можливість звести до мінімум кількість втраті на обчислювальні ресурси без негативного впливу наякість послуг, які надаються користувачам. Система збільшить свої розміри та зменшить втрати ресурсів.

## Технологічна здійсненність проекту

№ п/п	Ідея проекту	Методи реалізації	Можливості реалізації	Доступність реалізації
1	У запропонованом у алгоритмі кластеризації мобільний датчик назначає себе датчиком-лідером кластера базуючись на значення	Реалізація у беспроводній сенсорній мережі	Беспроводні сенсорні вузли, БС	Є доступним
2	простого точкового предиктора <i>SPP (Single Point Predictor)</i> для комбінованого критерію прогнозування	Реалізація у мобільних сенсорних мережах	Наявність мобільних сенсорних вузлів, БС	Є доступним
Обрана технологія реалізації проекту: <i>Fault-Tolerance Threshold-sensitive Energy Efficient Network algorithm</i>				

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг мого стартапу у порівнянні з вже відомими пропозиціями, які пропонують конкуренти:

- а) визначення техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї стартап-проекту;
- б) визначення ринку та існуючих конкурентів на ньому, збір інформації щодо техніко-економічних показників для власного стартапу і конкуруючих проектів;
- в) проведено порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначені показники, що мають:

- 1) гірші значення (слабкі - W);
- 2) кращі значення (сильні S).

Таблиця 5.3

Визначення сильних та слабких характеристик

	Потенційні товари/концепції конкурентів	
	Мій проєкт	«Адаптивний алгоритм кластеризації» у протоколі FT-TEEN
W слабка сторона	Керування у кластері відбувається за допомогою головного вузла, який для керування використовує велику кількість енергії	Стабільність роботи мережі та енергоефективність
S Сильна сторона	Масштабованість мережі	Відмовостійкість мережі не залежно від розміру моделі мережі

### 1.2 Аналіз можливостей ринку

Під час спостереження за можливостями ринку, спочатку було проаналізовано попит: наявність попиту, динаміку розвитку ринку і його обсяг. Результати досліджень нижче.

Таблиця 5.4.

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№ п/п	Показники стану ринку	Характер стану
1	Передача даних в безпроводових сенсорних мережах (якісна оцінка)	Йде на зріст постійно
2	Загальнодоступні для обрання алгоритми маршрутизації в БСМ	Розвиток похилий
3	Наявність обмежень для входу	Відсутня
4	Специфічні вимоги для стандартизації, специфікації	Відсутні

Після проведення аналізу сьогоденної необхідності ринку рішень стосовно покращення показників ефективності локалізації в безпроводових сенсорних мережах, за зазначеним вище оцінюванням ринок викликає інтерес для входження.

Таблиця 5.5.

Характеристика потенційних клієнтів стартап проекту

No п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Недостатня довжина життєвого циклу сенсорної мережі при використанні існуючих алгоритмів маршрутизації	Багатий асортимент застосунків: дослідження довкілля недосяжного для людини, охоронні системи і т.д.	Самостійна установка формату провайдером. Юридичні особи мають особливі привілеї у вигляді додаткових можливостях.	Поліпшення щабелю наданих послуг. Зменшення втрат за рахунок більш ефективної передачі даних та більш енергоефективно і системи.

## Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Дефіцит інтересу у продукті	Успіх застосування пропонованого методу залежить від готовності модифікації власних технологій, адже будь-які зміни можуть привести до неочікуваних впливів в роботі мережі, в тому числі і зі знаком мінус. Низька популярність кінцевого рішення серед користувачів БСМ.	Глобальне тестування пертурбацій з фідбеком від користувачів.
2	Складність технічної реалізації	Введення даних технологій в існуючих безпроводових мережах ускладнено через технічні складності	Ітеративне впровадження компонентів модифікованої системи, узгодження плану розробки і релізу з розробниками.

**Висновки**

В даному розділі приведені можливості використання методу локалізації в БСМ *FT-TEEN*, заснованого на адаптивному алгоритмі кластеризації, на ринок безпроводових сенсорних мереж та якісна оцінка перспектив ринкового впровадження даного методу. Конкурентна ситуація на ринку дозволяє розглянути запропоноване рішення як більш енергоефективне та стабільне в роботі.

Існуючі рішення-аналоги не створюють прямої конкуренції на ринку, оскільки вирішують поставлену задачу лише частково. Основною

проблемою є ймовірна складність розробки готового рішення на основі наведених методів.

Проведений аналіз підтверджує, що подальша імплементація проєкту є доцільною.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В ході виконання цієї дипломної роботи було вирішено всі поставлені задачі, основні результати роботи полягають у наступному:

1. Було досліджено використання UWSN та представлено математичну модель на прикладі одиночного радіомаяка для отримання координат зануреного мобільного радіомаяка для отримання координат занурених мобільних датчиків для непаралельної ситуації.

2. Досліджено критерії оцінки працездатності і застосовності алгоритмів визначення координат в сенсорних мережах.

3. Описали методику оперативного розрахунку координат проміжних точок маршруту руху літаючого інформаційного робота (ЛІР), який збирає інформацію з мобільних сенсорів мобільної бездротової сенсорної мережі (МБСМ).

4. Отримано якісні показники роботи запропонованого алгоритму визначення координат об'єктів в сенсорній мережі на базі технології ZigBee, а саме:

– відносна точність отриманих вимірів представляє собою близько 12% у разі наявної прямої видимості між передавачем і приймачем.

– більше 90% об'єктів мережі мають змогу оцінювати свої координати спираючись на зібрану інформацію

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лисенко О.І., Тачиніна О.М., Алексеєва І. В. «Математичні методи моделювання та оптимізації. Частина 1. Математичне програмування та дослідження операцій: підручник» – К.: НАУ, 2017. – 212 с. ISBN 978-966-932-063-6.
2. Лисенко О.І., Алексеєва І.В. Дослідження операцій. Конспект лекцій. —К: НТУУ «КПІ», 2016. – 196 с.
3. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи. – Київ: Наукова думка, 2017. – 730 с.
4. Lysenko, O., Valuiskyi, S., Yavisya, V., Tachinina, O., Novikov, V., Sushyn, I. Method of operational calculation of coordinates of intermediate route points of flying information robot, in: Information and Telecommunication Sciences, No. 1, 2022, pp.27 – 34. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12022.27-34>
5. Лисенко О.І. Математична модель для індикації екологічного стану природного середовища території бойових дій із застосуванням екосистемного підходу. [Текст] / О.І. Лисенко, С.М. Чумаченко, Є.О. Яковлєв, О.В. Пиріков, В.А. Дерман // Електронне моделювання, Том 44 № 4, 2022. – С. 1 – 18, ISSN 0204–3572. <https://doi.org/10.15407/emodel>
6. Лисенко О.І. Моделі використання інформації від мобільних безпроводових сенсорних мереж в алгоритмах оцінювання та прогнозування стану екологічних систем ускладнених техногенним навантаженням [Текст] / Лисенко О.І., Чумаченко С.М., Явіся В.С., Гуйда О.Г., Новіков В.І., Сушин І.О. // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, Том 33 (72) № 4, 2022. – С. 103 – 112. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/17>, ISSN 2663-5941 (Print) ISSN 2663-595X (Online)
7. Siva Ram Murthy C., Manoj B.S. Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols, Prentice Hall, 2004. 880 p.



8. Tiny OS webpages. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tinyos.net>.  
Дата звернення 11.11.19.
9. Bahl P., Padmanabhan V.N. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system// Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. 784 p.
10. Bahl P., Padmanabhan V. N., Balachandran A. Enhancements to the RADAR User Location and Tracking System// Microsoft Research: Redmond, WA. 2000, 784 p.
- 11.M. Beniwal and R. Singh, "Localization Techniques and Their Challenges in Underwater Wireless Sensor Networks," Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol., vol. 5, no. 3, pp. 4706–4710, 2014.
12. S. Verma and P. Chaudhary, "Communication Architecture for Underwater Wireless Sensor Network," no. February, 2016.
13. J. H. Cui, J. Kong, M. Gerla, and S. Zhou, "The challenges of building scalable mobile underwater wireless sensor networks for aquatic applications," IEEE Netw., vol. 20, no. 3, pp. 12–18, 2006
14. A. Rahman, V. Muthukkumarasamy, and E. Sithirasenan, "Coordinates determination of submerged sensors using cayley-menger determinant," Proc. - IEEE Int. Conf. Distrib. Comput. Sens. Syst. DCoSS 2013, pp. 466–471, 2013.
15. Imad Jawhar, Nader Mohamed, Jameela Al- Jarood, UAV-based data communication in wireless sensor networks: Models and Strategies, International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015.
16. Huseyin Okcu, Mujdat Soy Turk, Distributed Clustering Approach for UAV Integrated Wireless Sensor Networks, in: International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, volume15, 2014, pp.106 – 120.
17. Asim Zeb, A. K. M. Muzahidul Islam, Mahdi Zareei, Ishtiaq Mamoon, Nafees Mansoor, Sabariah Baharun, Yoshiaki Katayama, Shozo Komaki, Clustering Analysis in Wireless Sensor Networks: The Ambit of Performance Metrics and Schemes Taxonomy, in: International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016.

18. Tony Ducrocq, Michaël Hauspie, Nathalie Mitton, Balancing Energy Consumption in Clustered Wireless Sensor Networks ISRN Sensor Networks, 2013, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/314732>.