

**Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Тернопільський національний економічний університет  
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерної інженерії**

До захисту допущено  
Завідувач кафедри  
комп'ютерної інженерії  
к.т.н., доц. О.М.Березький

\_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
освітньо-кваліфікаційного рівня "Магістр"  
зі спеціальності 8.05010201 "Комп'ютерні системи та мережі"  
на тему:

**Метод локалізації об'єктів на основі вимірювання  
потужності сигналу в безпроводних сенсорних мережах**

Студент групи КСМ<sub>м</sub> - 51  
Мандзій В.А.

\_\_\_\_\_ підпис

Науковий керівник  
к.т.н., доцент Яцків Н.Г.

\_\_\_\_\_ підпис

Консультант з нормоконтролю  
Палій І. О.

\_\_\_\_\_ Прізвище, ініціали

\_\_\_\_\_ Підпис

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Тернопільський національний економічний університет  
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерної інженерії

“Затверджую”  
Зав. кафедри  
комп'ютерної інженерії  
к.т.н., доц. О.М. Березький

---

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТА**  
**Мандзія Віталія Анатолійовича**

1. **Тема дипломної роботи** “Метод локалізації об'єктів на основі вимірювання потужності сигналу в безпроводних сенсорних мережах” затверджена наказом університету № \_\_\_\_\_ від „\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р

2. **Термін здачі** закінченої дипломної роботи \_\_\_\_\_

3. **Об'єкт дослідження:** процеси локалізації об'єктів в безпроводних сенсорних мережах.

4. **Предмет дослідження:** методи та алгоритм локалізації в безпроводних сенсорних мережа.

5. **Перелік задач, які мають бути вирішені:**

- провести порівняльний аналіз існуючих алгоритмів локалізації об'єктів та можливих джерел інформації про географічне місце розташування об'єктів;
- розробити математичну модель алгоритму визначення координат;
- дослідити вплив помилок вимірювань на роботу алгоритмів локалізації об'єктів;
- дослідити розроблений алгоритм в безпроводній сенсорній мережі з використанням модулів JN5148;
- провести аналіз ефективності роботи алгоритму локалізації безпроводних сенсорних мереж.

6. **Перелік ілюстративного матеріалу:**

- структура сенсорного вузла: Т - Радіочастотний трансівер; М – мікроконтролер; В – джерело живлення; S – сенсор,
- теоретична модель трилатерації: положення невідомого вузла відповідає перетинанню цих трьох кіл, сформованих положень і відстанями до якірних вузлів,
- модель мультілатерації,
- RSSI значення вузла JN5148, в теорії,
- порівняння реальних та теоретичних значень RSSI,

## 7. Консультанти по роботі

Розділ	Консультант	Підпис
1		
2		
3		

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва структурних частин ДР	Термін виконання	Примітка
1	Огляд технологій побудови та застосування сенсорних мереж	15.09.2011 – 5.11.2011	
2	Методи та алгоритми локалізації об'єктів	6.11.2011 – 31.01.2012	
3	Дослідження та моделювання локалізації об'єктів в сенсорних мережах	1.02.2012 – 23.04.2012	

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник дипломної роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота на тему “Метод локалізації об’єктів на основі вимірювання потужності сигналу в безпроводних сенсорних мережах” на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня “Магістр” зі спеціальності “Комп’ютерні системи та мережі” написана обсягом 87 сторінок і містить 36 ілюстрацій, 5 таблиць, 5 додатків та 44 джерела за переліком посилань.

**Метою роботи** є розроблення алгоритму локалізації об’єктів на основі вимірювання потужності в безпроводних сенсорних мережах.

**Методи досліджень** базуються на використанні положень теорії ймовірностей, теорії фільтрації, обчислювальної математики, а також методи імітаційного моделювання.

Розроблено алгоритм локалізації на основі вимірювання потужності сигналу. Програмно реалізовано алгоритм локалізації і проведено експериментальні дослідження в умовах прямої видимості та відсутності прямої видимості вузлів .

Результати роботи можуть бути використані при розгортанні сенсорної мережі для аналізу оцінки похибки визначення координат вузлів .

Можливими напрямками подальших досліджень є продовження робіт по локалізації вузлів сенсорних мереж: розробка алгоритму локалізації мобільних вузлів на основі комбінованого методу.

**Ключові слова:** БЕЗПРОВІДНА СЕНСОРНА МЕРЕЖА, ВУЗОЛ, ЯКІР, ПОХИБКА, ЛОКАЛІЗАЦІЯ, ZIGBEE.

## ABSTRACT

Thesis: "The method of localization of objects based on measuring the signal strength in wireless sensor networks" of education and qualification of "Master" specialty "Computer systems and networks" written volume 87 page and contains 36 illustrations, 5 tables, 5 and 44 applications for source references.

**The objective** is to develop algorithms localization of objects based on power measurements in wireless sensor networks.

**Methods of researches** are based on use of positions of probability theory, the theory of a filtration, calculus mathematics, and also methods of imitating modeling.

The algorithm of localization on the basis of measurement of capacity of a signal is developed. Program implemented algorithm and localization of an experimental study in a line of sight and non-line of sight components.

The results may be used for the deployment of sensor networks for the analysis of error estimates for the coordinates of nodes.

Possible directions for further research is continuing work on the localization of sensor networks nodes: development of algorithm for localization of mobile nodes based on the combined method.

**Keywords:** SENSOR NETWORKS, NODE, ANCHOR, ERROR, LOCALIZATION, ZIGBEE.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ПОБУДОВИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ.....	11
1.1 Історія та сфера застосування сенсорних мереж .....	11
1.2 Технології безпроводних сенсорних мереж.....	16
1.2.1 Стандарт IEEE 802.15.4 .....	16
1.2.2 Альянс ZigBee та стек протоколів ZigBee.....	19
1.2.3 Операційні системи і програмні засоби.....	23
1.3 Постановка задачі локалізації об'єктів .....	28
2 МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ.....	33
2.1 Компоненти системи локалізації.....	33
2.2 Методи визначення координат .....	34
2.2.1 Метод визначення координат на основі вимірювання потужності сигналу .....	34
2.2.2 Метод визначення координат на основі часу прибуття сигналу ....	37
2.2.3 Метод визначення координат на основі кута отриманого сигналу	39
2.2.4 Метод визначення координат на основі дальності сигналу .....	40
2.3 Методи обчислення позиції розташування .....	40
2.3.1 Трилатерація та мультилатерація.....	41
2.3.2 Тріангуляція.....	44
2.3.3 Імовірнісний підхід .....	45
2.3.4 Обмеження квадрату.....	46
2.3.5 Метод центрального положення щодо опорних вузлів .....	48
2.4 Алгоритми локалізації .....	48
2.4.1 Система позиціонування в Ad Hoc.....	50
2.4.2 Рекурсивна оцінка позицій.....	53
2.4.3 Локалізація з мобільним вузлом.....	55

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ В СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ .....	59
3.1 Дослідження RSSI сигналу в залежності від відстані .....	59
3.2 Алгоритм на основі вимірювання потужності сигналу .....	62
3.3 Імітаційне моделювання локалізації сенсорних вузлів з використанням MATLAB .....	65
3.4 Експеримент в умовах прямої видимості вузлів.....	71
3.5 Експеримент в умовах відсутності прямої видимості вузлів .....	76
ВИСНОВКИ.....	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80
Додаток А – Нумерація каналів в не ліцензованому діапазонів .....	85
Додаток Б – Архітектура емулятора TOSSIM.....	86
Додаток В – Текст виконуваного фалу «gum.m».....	88
Додаток Г – Текст файлу Topology_Of_WSN .....	89
Додаток Д – Текст файлу для визначення помилки локалізації.....	90

## ВСТУП

**Актуальність теми.** На сьогоднішній день у всьому світі усе більш пильну увагу привертають до себе "безпроводні сенсорні мережі" ("Sensor Networks", далі просто сенсорні мережі). Поняття "Сенсорна мережа" з'явилося порівняно недавно (кілька років тому) але на сьогоднішній день є вже повністю сталим терміном (Sensor Network), що означає розподілену, таку, що самоорганізовується, стійку до відмови окремих елементів мережу, що складається з великого числа малогабаритних і дешевих напівпровідникових приладів, що обмінюються інформацією по безпроводному каналу зв'язку, не обслуговуються і не вимагають спеціальної установки. Кожен пристрій може містити різні датчики фізичних параметрів середовища (рух, світло, температура, вологість, тиск і так далі), а також засоби для первинної обробки і зберігання отриманих даних. Кількість об'єктів в такій мережі теоретично визначається лише сферою застосування і бюджетом, і завдяки низькій ціні окремих пристроїв (порядку декілька доларів і нижче) може бути дуже велике (порядку декілька тисяч і вище).

Даний підхід до формування мережі дозволяє адаптувати сенсорні мережі до вирішення надзвичайно широкого спектру завдань. Зокрема одним з основних використань сенсорних мереж є створення різних систем моніторингу і контролю. Слід чекати, що в недалекому майбутньому сенсорні мережі займуть значно ширшу нішу серед наявних телекомунікаційних технологій, які використовують безпроводний радіозв'язок.

Однією з актуальних задач є визначення місця розташування окремих об'єктів мережі. Неодмінною умовою при експлуатації будь-яких систем моніторингу та контролю є прив'язка даних, зібраних всією системою до географічних координат для відображення зібраної інформації на карті і подальшого аналізу. Крім того, така мережа (на відміну від традиційних радіомереж) за наявності вбудованої підсистеми позиціонування окремих об'єктів



може бути розгорнута практично де завгодно з мінімальними витратами. Це може бути зроблено, наприклад, шляхом розкидання об'єктів мережі з літака.

Крім прив'язки отриманих мережею даних в процесі роботи до карти місцевості, інформація про координати об'єктів буде необхідна в процесі функціонування самої мережі (побудова ефективних з точки зору енергоспоживання алгоритмів маршрутизації, збір отриманих даних).

У зв'язку з цим розробка алгоритмів визначення координат об'єктів в сенсорній мережі стає актуальним завданням.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дипломної роботи є розроблення алгоритму локалізації об'єктів в безпроводних сенсорних мережах.

Для досягнення поставленої мети повинні бути вирішені наступні завдання:

1. Проведення порівняльного аналізу існуючих алгоритмів локалізації об'єктів та можливих джерел інформації про географічне місце розташування об'єктів.
2. Розробка математичної моделі алгоритму визначення координат.
3. Вивчення впливу помилок вимірювань на роботу алгоритмів локалізації об'єктів.
4. Дослідження розробленого алгоритму в безпроводній мережі з використанням модулів JN5148.

**Об'єкт дослідження:** процеси локалізації об'єктів в безпроводних сенсорних мережах.

**Предмет дослідження:** методи та алгоритми локалізації в безпроводних сенсорних мережах.

**Методи дослідження:** У дипломній роботі використовуються методи теорії ймовірностей, теорії фільтрації, обчислювальної математики, а також методи імітаційного моделювання.

**Публікації та апробація ДР.** Основні результати дипломної роботи опубліковані у Матеріалах II Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» та доповідались на студентській конференції 10-11 квітня 2012 р. у Тернопільському національному економічному університеті.



# 1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ПОБУДОВИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

## 1.1 Історія та сфера застосування сенсорних мереж

На сьогоднішній день у всьому світі усе більш пильну увагу привертають до себе "безпроводні сенсорні мережі" ("Sensor Networks", далі просто сенсорні мережі). Поняття "Сенсорна мережа" з'явилося порівняно недавно (кілька років тому) але на сьогоднішній день є вже повністю сталим терміном (Sensor Network), що означає розподілену, таку що самоорганізується, яка складаються з безлічі простих мініатюрних пристроїв (вузлів), кожен з яких містить мікроконтроллер, приймач і автономне джерело живлення. Вузли оснащуються сенсорами, здатними реєструвати інформацію про параметри фізичних полів різної природи в місцях їх розташування (рисунок 1.1). Результати вимірів передаються по ланцюжку (від вузла до вузла) в обчислювальний центр для обробки і аналізу (зважаючи на обмежену потужність приймачів на вузлах безпосередня передача інформації може виявитися неможливою) [1].

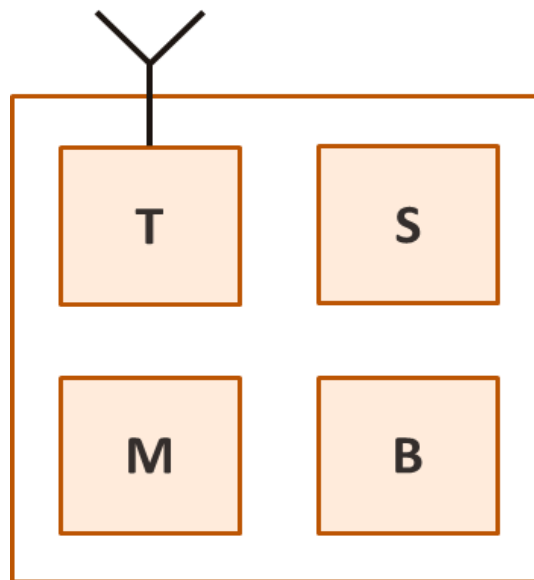


Рисунок 1.1 – Структура сенсорного вузла: Т - Радіочастотний трансівер;  
М – мікроконтролер; В – джерело живлення; S – сенсор.

Історія створення сенсорних мереж нараховує більше чотирьох десятків років. Як і в випадку для достатньо великої кількості технологій, в тому числі і телекомунікаційних, першими роботами над сенсорами і сенсорними мережами були ініційованими в захисному секторі США. Неможна виключати, що подібні роботи проводились в СССР, проте досі відкрита інформація про це відсутня. На початку 50-х років під час холодної війни з метою виявлення і спостереження за радянськими малошумними підводними лодками була розроблена і розгорнута підводна система спостереження SOSUS (Sound Surveillance System) (рисунок 1.2), яка складалась із набору акустичних сенсорів (гідрофонів), розміщених на дні океану, яку вважають одну із перших прототипів сенсорної мережі [2].

Пізніше система SOSUS була переорієнтовано на цивільний сектор і досі використовується національною океанографічною і атмосферною адміністрацією NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) для моніторингу, наприклад, сейсмічної активності [3]. Також під час холодної війни в оборонному комплексі було розроблене проти повітряний комплекс захисту континентальної частини території держав США і Канади.

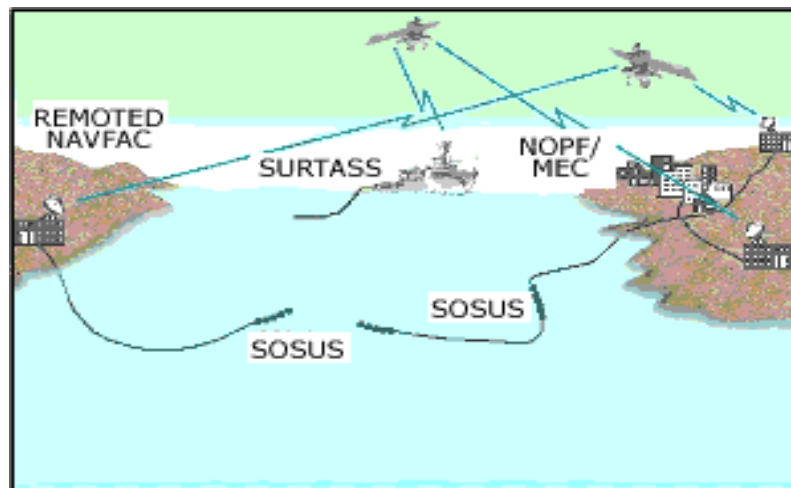


Рисунок 1.2 – Підводна система спостереження SOSUS

Особливістю цього комплексу, що дозволяє говорити про нього як про прототип сенсорної мережі, являлося використання аеростатів в якості здійснення контролю і збору інформації.

Пізніше протиповітряна система була доповнена літаками повітряного попередження і управління AWACS (Airborne Warning and Control System) [4]. Ці дві військові системи є наглядним прикладом побудови сенсорних мереж на дуже ранній стадії їх розвитку коли мова про підвищені ефективності, оптимізації, автономності і зниженні вартості ще не йшла, а людина грала одну з основних ролей в процесі функціонування цих систем – саме на людину покладалась відповідальність за функціонування, надійність, аналіз даних.

В сенсорних мережах, датчики можуть бути найрізноманітнішими; вони підключаються через цифрові і аналогові коннектори. Частіше за інших використовуються датчики температури, тиску, вологості, освітленості, вібрації, рідше — магнітоелектричні, хімічні (наприклад, що вимірюють зміст CO, CO<sub>2</sub>), звукові і деякі інші [1]. Набір датчиків залежить від функцій, що виконуються безпроводними сенсорними мережами. Живлення вузлів здійснюється від невеликої батареї та використовуються тільки для збору, первинної обробки і передачі сенсорних даних. Зовнішній вигляд вузлів, що випускаються різними виробниками, наведено на рисунку 1.3.

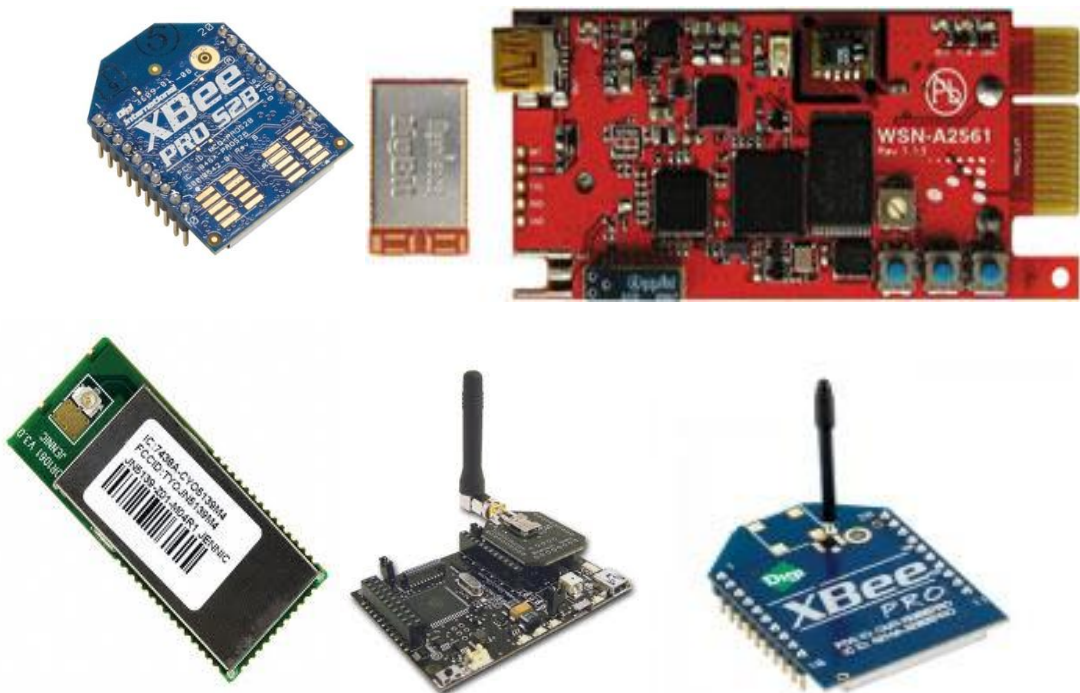


Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд вузлів

Сенсорні мережі можуть бути використані у багатьох прикладних областях. Безпроводні сенсорні мережі — це нова перспективна технологія, і усі пов'язані з нею проекти в основному знаходяться у стадії розробки. Вкажемо основні сфери застосування цієї технології:

- системи оборони і забезпечення безпеки;
- контроль навколишнього середовища;
- моніторинг промислового обладнання;
- охоронні системи;
- моніторинг стану сільськогосподарських угідь;
- управління енергопостачанням;
- контроль систем вентиляції, кондиціонування і освітлення;
- пожежна сигналізація;
- складський облік;
- стеження за транспортуванням вантажів;
- моніторинг фізіологічного стану людини;
- контроль персоналу.

З досить великого числа прикладів використання безпроводних сенсорних мереж виділимо декілька. Найбільш відомим є, мабуть, розгортання мережі на борту нафтового танкера компанії BP (British Petroleum). Там за допомогою сенсорної мережі, побудованої на основі обладнання Intel, здійснювався моніторинг стану судна з метою організації його профілактичного обслуговування. Компанія BP проаналізувала, чи може сенсорна мережа працювати на борту судна в умовах екстремальних температур, високої вібрації і значного рівня радіочастотних перешкод, наявних в деяких приміщеннях судна. Експеримент пройшов успішно, кілька разів автоматично здійснювалася реконфігурація та відновлення працездатності мережі [6].

Прикладом ще одного реалізованого пілотного проекту є розгортання сенсорної мережі на базі військово-повітряних сил США у Флориді. Система продемонструвала хороші можливості по розпізнаванню різних металевих об'єктів, у тому числі рухомих. Застосування сенсорної мережі дозволило

виявляти проникнення людей і автомобілів в контрольовану зону і відслідковувати їх переміщення. Для вирішення цих завдань використовувалися вузли, оснащені магнітоелектричними і температурними датчиками.

Ось ще один приклад реалізованого проекту - SISVIA (SIstema de Seguimiento y Vigilancia Ambiental) спільної комерціалізації проекту з охорони навколишнього середовища, були розроблені та інтегровані для виявлення лісових пожеж за допомогою сенсорної мережі (рисунок 1.4) [6]. Площею близько 210 га в районі Північної Іспанії в складі регіонів Asturia і Galicia. Для рішення даної проблеми була використано сенсори які розташовані в стратегічних місцях та кожних 5 хвилин вимірюють 4 параметри: температуру, відносну вологість повітря, чадний газ (CO), діоксид вуглецю (CO<sub>2</sub>) Мета полягає в тому, щоб надати різним організаціям інфраструктуру моніторингу навколишнього середовища, з можливістю мати попередження управління і попередження ранніх тривог. Крім профілактичних заходів, раннє виявлення пожеж є єдиним способом, щоб мінімізувати збитки та людські жертви [7].

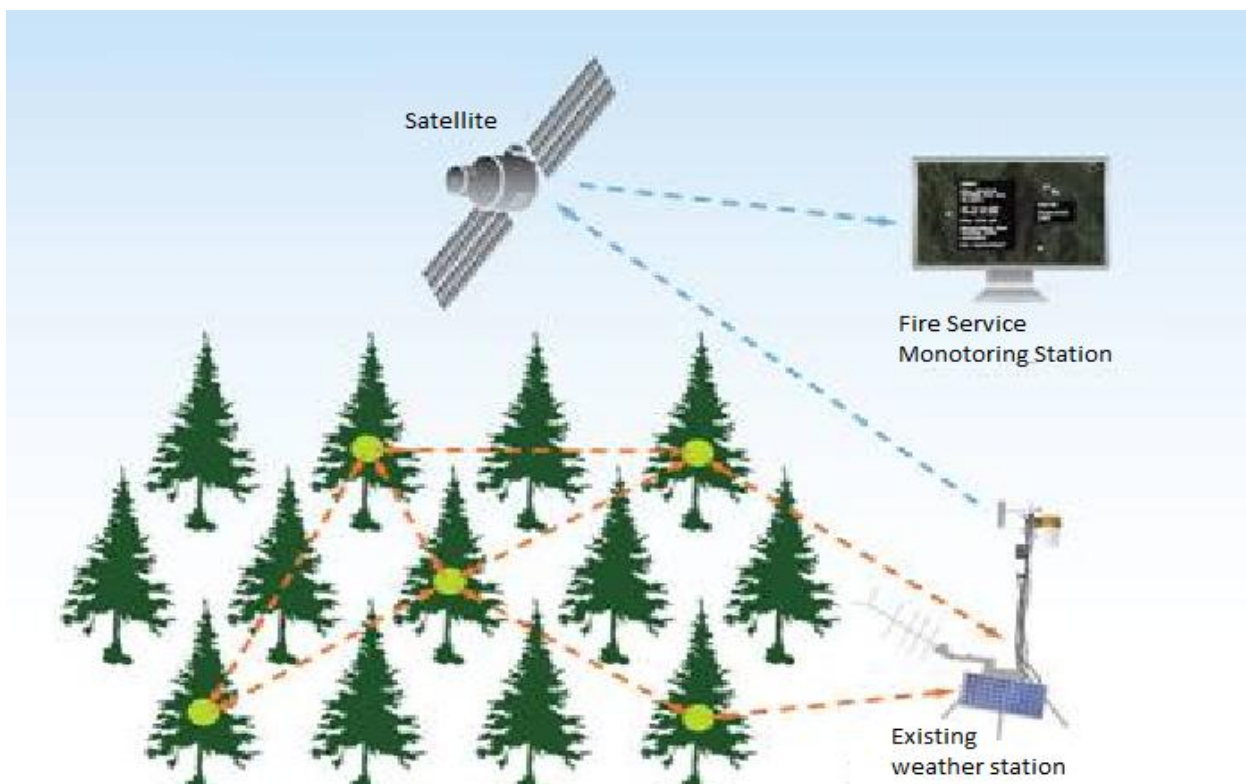


Рисунок 1.4 – Сенсорна мережа для виявлення лісових пожеж

## 1.2 Технології безпроводних сенсорних мереж

Можливості сучасної мікроелектроніки і безпроводних мережевих технологій відкривають великі перспективи для створення різноманітних мережевих комплексів з широкою сферою застосування. Найбільш відомою і такою, що зарекомендувала себе в цій області являється технологія безпроводних сенсорних мереж (далі – БСМ або сенсорні мережі). Основною їх відмінністю від класичних радіомереж є використання як основні вузли мережі великого числа недорогих мікрокомп'ютерів. Ці пристрої настільки самостійні, що можуть автоматично вибудовувати розподілену безпроводну мережу, передавати інформацію, шляхом знаходження один одного на відстані до декількох кілометрів, автоматично приймати рішення, і виконувати завдання без участі людини.

Найважливішим чинником при роботі безпроводних сенсорних мереж є обмежена місткість батарей, що встановлюються на сенсори. Слід враховувати, що замінити батареї найчастіше неможливо. У зв'язку з цим необхідно виконувати на сенсорах тільки просту первинну обробку, орієнтовану на зменшення об'єму переданої інформації, і, що саме головне, мінімізувати число циклів прийому і передачі даних. Для вирішення цього завдання розроблені спеціальні комунікаційні протоколи, найбільш відомими з яких є протоколи альянсу ZigBee, які використовують раніше розроблений стандарт IEEE 802.15.4 [8-9].

### 1.2.1 Стандарт IEEE 802.15.4

В 2001 році робочою групою № 4 IEEE (Інститут інженерів електротехніки та електроніки) 802.15 були розпочаті роботи зі створення нового стандарту, який би відповідав наступним вимогам:

- низький рівень енергоспоживання апаратної частини, що реалізує технологію бездротової передачі даних (час роботи від батареї повинен становити від декількох місяців до декількох років);
- передача інформації повинна здійснюватися на не високій швидкості;
- низька вартість апаратної частини.



Результатом стала розробка стандарту IEEE 802.15.4. У багатьох публікаціях під стандартом IEEE 802.15.4 розуміють технологію ZigBee і навпаки під ZigBee — стандарт IEEE 802.15.4. Однак це не так. Стандарт IEEE 802.15.4 визначає взаємодію тільки двох нижчих рівнів моделі взаємодії (рисунок 1.5) [10,11]:

- фізичний рівень (PHY) рівень керування доступом до радіоканалу для трьох неліцензійних діапазонів частот: 2,4 ГГц, 868 МГц і 915 МГц (додаток А). У таблиці 1.1 наведені основні характеристики обладнання, що функціонує в цих діапазонах частот.

- канальний рівень (MAC) відповідає за керування доступом до радіоканалу з використанням методу множинного доступу з упізнанням несучої частоти й усуненням колізій (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA), а також за керування підключенням і відключенням від мережі передачі даних і забезпечення захисту переданої інформації симетричним ключем AES-128.

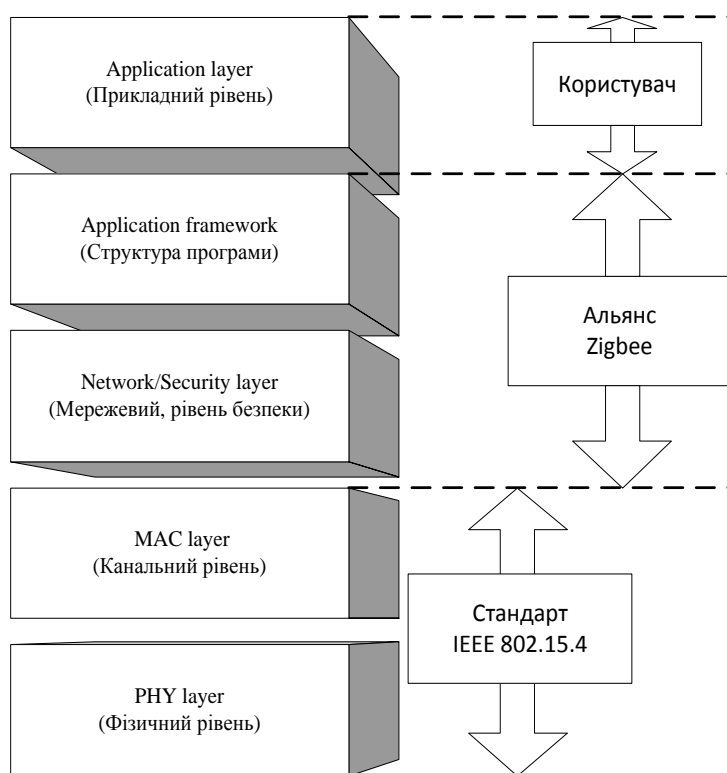


Рисунок 1.5 – Модель взаємодії стандарту IEEE 802.15.4, технології безпроводної передачі даних ZigBee і користувача

Таблиця 1.1 – Характеристики радіопередачі даних для IEEE 802.15.4

Смуга частот, МГц	Необхідність ліцензії	Швидкість передачі даних, Кбіт/с	Число каналів	Географічний регіон
868,3	Ні	20	1	Європа
902-928	Ні	40	1-10	Америка
2405-2480	Ні	250	11-26	Весь світ

Безпроводний стандарт IEEE 802.15.4 резервує під обмін даними 27 каналів в трьох частотних діапазонах (868 і 915 МГц, а також 2,4 ГГц). Це дозволяє ліцензувати застосування стандарту на території більшості країн (як відомо, діапазони, доступні для цивільного використання, диференціюються залежно від погляду урядів на це питання), а також забезпечити оптимальну передачу сигналу в різних умовах. Швидкість передачі в єдиному дозволеному в Україні частотному діапазоні 2,4 ГГц може досягати 250 кбіт в секунду (у інших діапазонах вона істотно нижча) [12].

Співвідношення "сигнал/шум" дозволяють сигналам стандарту IEEE 802.15.4 успішно співіснувати з джерелами випромінювання на тій же частоті, приміром, пристроями, сполученими за допомогою WiFi. До речі, в стандарті також передбачені канали, що не перетинаються з WiFi, що дозволяє реалізувати мережа навіть у безпосередній близькості з дуже потужними джерелами випромінювання.

Коли пристрій планує почати передачу, перевіряє, чи не зайнятий ефір. Якщо виявляється "чужий" сигнал, то передавач "засинає" на випадковий проміжок часу, а потім знову пробує почати передачу. У такому разі одночасно передача може виходити тільки від одного пристрою, що підвищує продуктивність мережі. Проте необхідність очікування вільного каналу позначається на швидкості обміну повідомленнями. У зв'язку з цим, стандарт IEEE 802.15.4 - не найшвидкісний безпроводний зв'язок; проте, як згадувалося вище, стандарт має свою власну, і дуже широку, сферу застосування. Дані передаються відносно невеликими пакетами, що специфічно для мереж

управління і моніторингу. Важливою особливістю стандарту є обов'язкове підтвердження доставки повідомлень [13].

Протокол передачі має на увазі "засипання" передавача за відсутності даних для пересилки, забезпечуючи низьке енергоспоживання пристроїв, сполучених за стандартом IEEE 802.15.4 [14]. В результаті чого час автономної роботи крайових пристроїв може вимірюватися роками. Важлива особливість протоколу в тому, що подібні "засипання" не позначаються на збереженні підключення. Створюючи стандарт, основний напрямок робився на швидкість процесів конфігурації і реконфігурації мережі, і розробники в цьому дуже досягли успіху. Приміром, перехід приймача в активний стан займе близько 10-15 мс; а додавання пристрою в мережу – від 30 мс. Швидкість додавання пристроїв і реконфігурації залежить від того, чи постійно маршрутизатори "слухають" мережу. Тому, якщо потрібно, тоді додавання пристрою відбувалося швидко, маршрутизатор не може знаходитися на автономному живленні. Мережі WiFi і Bluetooth не можуть забезпечити такої швидкодії [15].

### 1.2.2 Альянс ZigBee та стек протоколів ZigBee

Для підтримки і розвитку стандарту, а також забезпечення взаємної сумісності пристроїв у рамках IEEE 802.15.4 в 2002 році був утворений "Альянс ZigBee" (ZigBee Alliance). Компанії, що представляють широкий спектр галузей промисловості, включаючи комунальні служби електропостачання, виробництво, технології, промислову автоматизацію і проектування, об'єдналися в Альянс ZigBee для того, щоб спільно сформувати ринок рішень для безпроводних комунікацій на основі специфікації ZigBee і сприяти її використанню [11].

На сьогоднішній день до складу Альянса ZigBee входять більше 225 членів. У їх числі – наступні компанії-промоутери, представники яких входять в склад Ради Директорів: Cellnet, Eaton Corporation, Ember Corporation, Freescale Semiconductor, Honeywell, Huawei Technologies, Itron, Mitsubishi Electric, Motorola, Philips, Samsung, Schneider Electric, Siemens, STMicroelectronics, Tendril Networks і Texas Instruments [16].

ZigBee активно підтримують і сім з 10 провідних постачальників напівпровідникового устаткування: членами Альянсу є Ember Corporation, Freescale Semiconductor, NEC, NXP, Renesas, Samsung, STMicroelectronics и Texas Instruments. Провідні OEM-виробники – такі, як Eaton, Honeywell, Huawei, Johnson Controls, LG, Mitsubishi, Motorola, NEC, Philips, Samsung, Schneider Electric, Siemens, Vantage/Legrand, Yokogawa, – розробляють нові продукти на основі стандарту ZigBee [16].

Альянс успішно визнаний і отримує підтримку своїх рішень в області управління енергією і енергозбереження з боку комунальних промислових органів і співтовариств-прибічників побудови інтелектуальних мереж енергоспоживання. До Альянсу недавно прилучилися і вже зорієнтовані на рішення ZigBee декілька провідних світових компаній, що просувають "розумну енергетику", починаючи від комунальних споживачів і закінчуючи енергопостачальниками. Для того, щоб використовувати вже існуючі недорогі і легко встановлювані ZigBee-продукти і послуги, такі служби як CenterPoint Energy, Southern California Edison і Sempra Utilities співпрацюють з іншими компаніями-членами Альянсу: Cellnet, Eaton, Itron, Phillips, Schneider Electric, Siemens, Comverge, Control4, DCSI, Golden Power, Johnson Controls, Legrand, Nivis, Nuri Telecom, Sensus Metering, Silver Spring Networks, Site Controls, Talon Communications, Trilliant Networks, Trittech Technology і Viconics.

Працюючи із стандартом IEEE 802.15.4, призначеним для низько швидкісних персональних мереж, Альянсу ZigBee повною мірою вдалося використати надійність, довгий термін служби елементів живлення, і підтримку mesh-мереж, закладених в стандарті, для того, щоб забезпечити надійні і економічні системи безпроводних комунікацій в цілях моніторингу і управління.

ZigBee ввів таку систему сертифікації продуктів, яка гарантує, що будь-який з продуктів з логотипом ZigBee пройшов суворий контроль якості і відповідає критеріям експлуатації. Розробники, що вибирають стандарт ZigBee основою для розробки своїх продуктів, можуть зосередити свої зусилля на принципово нових рішеннях – замість того, щоб розвивати дорогі приватні рішення – і тим самим можуть розширювати можливості виведення на ринок нових, креативних

застосувань. Щоб забезпечити повне інтегроване рішення для ринку, ZigBee продовжує працювати в тісній співпраці з IEEE [17].

Щоб побудувати ZigBee, Альянс стандартизував свої специфікації вище фізичного рівня (PHY) і рівня управління доступом в середовищі передачі даних (MAC), прийнятих в загальному стандарті IEEE 802.15.4, і додавши рівні моделі взаємодії, до яких відносять мережевий рівень, рівень безпеки, рівень структури програми і прикладний рівень як показано на рисунку 1.5. Мережевий рівень, технології безпроводної передачі даних ZigBee, відповідає за виявлення пристроїв і конфігурацію мережі і підтримує три варіанти топології мережі, приведені на рисунку 1.6 [16].

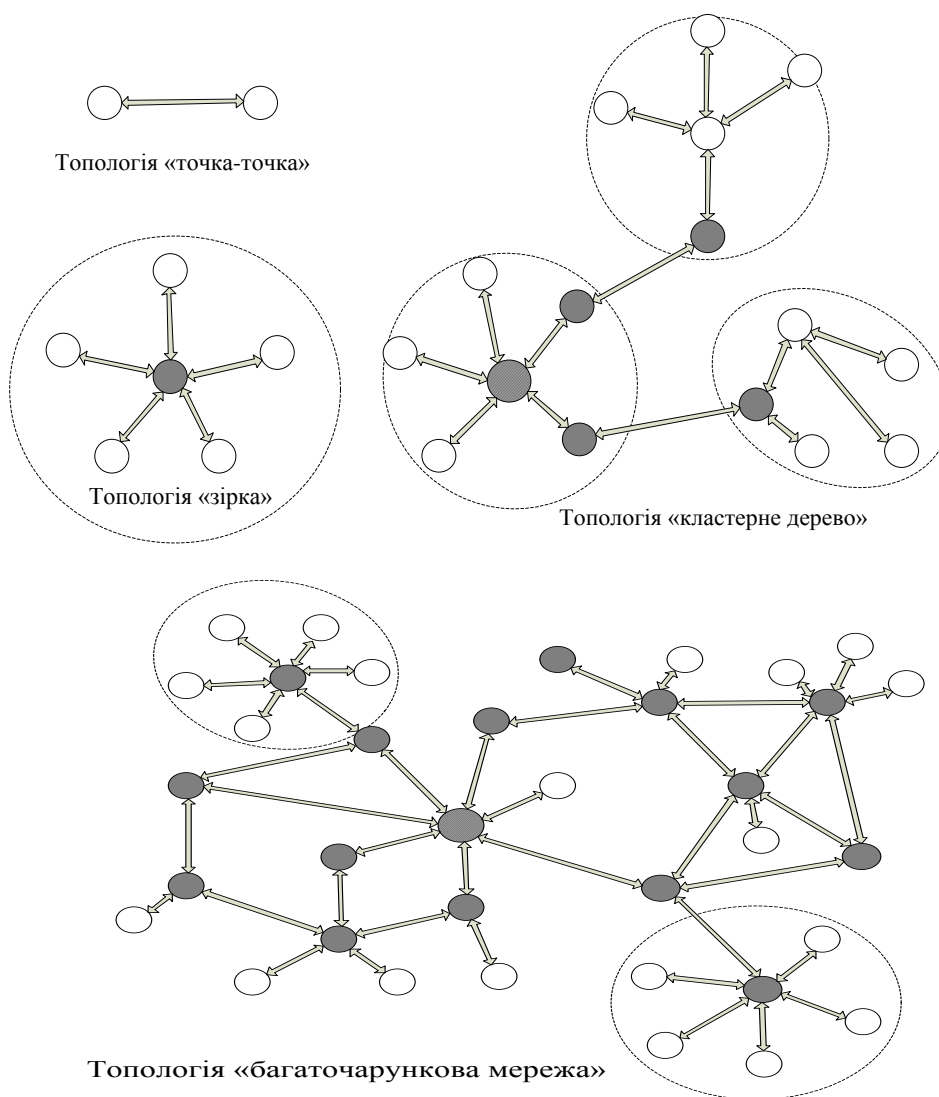


Рисунок 1.6 – Топології сенсорних мереж

Будь-яка з мереж, створення яких підтримується в ZigBee, може об'єднати до 65 000 вузлів – як повнофункціональних пристроїв (FFD), так і пристроїв з обмеженою функціональністю (RFD). FFD-вузли, що підтримують повний набір функціональностей стандарту 802.15.4, а також ZigBee, виступають в мережі так званими роутерами (тобто маршрутизаторами).

Кінцеві вузли, якими можуть бути FFD- або RFD-пристрої, зазвичай розташовуються на периферії мережі. Будь-який з них може бути простою системою, що складається з приймача, мініатюрного 8-бітового мікроконтролера і пари батарей. Зважаючи на це, кінцевим пристроям необов'язково мати функції маршрутизації. Оскільки ZigBee-пристрої споживають надзвичайно мало електроенергії, то, залежно від свого використання, вони можуть працювати без заряджання батарей багато років.

Особливість ZigBee полягає в тому, що, на відміну від інших безпроводних технологій, вона призначена для реалізації не лише простих з'єднань "точка-точка" і "зірка", але також і складних мереж з топологією "дерево" і "багаточарункова мережа", здатних підтримувати ретрансляцію і пошук найбільш ефективного маршруту для передачі даних. Мережі ZigBee є такими, що самоорганізуються і самовідновлюються. Завдяки вбудованому програмному забезпеченню їх пристрої при ввімкненні живлення вміють самі знаходити один одного. В разі виходу з ладу якого-небудь приладу вони здатні відшукати нові маршрути для передачі повідомлень [16-18].

Отже, можна навести основні характеристики ZigBee:

- частотний діапазон – 2.4 ГГц, 16 частот з шириною 5 МГц;
- DSSS – пряме розширення спектру сигналу;
- O-QPSK – квадратична фазова маніпуляція із зсувом;
- дозволена потужність – 100 мВт;
- оцінка рівня потужності сигналу в ефірі – RSSI і підтвердження про успішну доставку для кожного пакету даних;
- автоматичне регулювання вихідної потужності в широких межах;

- mesh-мережева технологія, що забезпечує самоорганізацію і самовідновлення радіомережі, – надійність і гнучкість маршрутизації;
- механізм множинного доступу в ефір з контролем несучої і запобіганням колізіям – CSMA (Carrier Sense, Multiple Access), тобто пристрій спочатку перевіряє, чи не зайнятий ефір, і лише після цього починає передачу;
- 128-бітове шифрування даних по протоколу AES 128 (АТЕЕ і АТКУ)
- кодування і обмеження доступу в мережу;
- задання ключів шифрування "Network" і "link";
- до 65536 вузлів (модемів) в мережі;
- швидкість передачі даних – до 250 Кбіт/с.;
- простота в експлуатації і установці.

### 1.2.3 Операційні системи і програмні засоби

Основна функціональна обробка даних, що збираються сенсорами, здійснюється на вузлі, або шлюзі, який є досить потужним комп'ютером. Але для того, щоб обробити дані, їх треба спочатку отримати. Для цієї мети вузол обов'язково оснащується антеною. Але у будь-якому разі доступними для вузла виявляються тільки ті вузли, що знаходяться досить близько від нього; іншими словами, вузол не отримує інформацію безпосередньо від кожного вузла. Проблема з отриманням сенсорної інформації, що збирається вузлами, вирішується таким чином. Вузли можуть обмінюватися між собою інформацією за допомогою приймачів, працюючих в радіодіапазоні. Це, по-перше, сенсорна інформація, що зчитується з датчиків, а по-друге, інформація про стан пристроїв і результати процесу передачі даних. Інформація передається від одних вузлів до інших по ланцюжку, і у результаті найближчі до шлюзу вузли скидають йому усю інформацію. Якщо частина вузлів виходить з ладу, робота сенсорної мережі після реконфігурації повинна тривати. Але в цьому випадку, природно, зменшується число джерел інформації.

Для виконання функцій на кожен вузол встановлюється спеціалізована операційна система. Операційна система для безпроводних вузлів сенсорної

мережі, як правило, менш складна, ніж загального призначення операційної системи, яка більше нагадує вбудовувану систему. На даний час у більшості безпроводних сенсорних мереж використовується TinyOS, яка розроблена в Університеті Берклі, вона відноситься до програмного забезпечення з відкритим кодом; воно доступне за адресою: [www.tinyos.net](http://www.tinyos.net). TinyOS — це керована подіями операційна система реального часу, розрахована на роботу в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Ця ОС дозволяє вузлам автоматично встановлювати зв'язки з сусідами і формувати сенсорну мережу заданої топології [19].

Додатки в TinyOS написані на nesC, діалекті мови C, оптимізованому відповідно до обмежень на об'єм пам'яті в сенсорних мережах. Її додаткові інструменти представлені в основному у формі Java- додатків і інтерфейсів для shell – скриптів. Супутні бібліотеки і інструменти, такі як компілятор nesC і інструментарій для програмування AVR, головним чином написані на C.

TinyOS надає вбудовані інтерфейси, модулі і специфічні налаштування, залежні від сенсора, які дозволяють програмістам створювати програму як набір модулів, які виконують визначені для програми завдання. Модулі TinyOS забезпечують інтерфейс до стандартних апаратних засобів введення, виведення і датчиків [20].

Компілюються написані застосування за допомогою спеціальних програм — кроскомпіляторів на звичайних ПК, а потім завантажуються на безпроводні вузли. Для повноцінного тестування ПЗ, розробленого для БСМ, потрібна мережа, що містить велику кількість сенсорних вузлів. Розгортання такої мережі пов'язане з великими витратами. Виходом з положення є використання спеціальних програм-емуляторів. Існує кілька емуляторів, за допомогою яких можна моделювати бездротові сенсорні мережі. Найбільш відомими є NS2 і TOSSIM. Розглянемо ключові особливості кожного з них.

NS2 є універсальним і може бути використаний для моделювання як провідних, так і бездротових мереж. Він моделює роботу на мережному рівні й не може моделювати поведінку додатків, тому не зовсім підходить для сенсорних мереж.



Розглянемо емулятор TOSSIM (TinyOS SIMulator), який розроблений у рамках одного проекту с TinyOS і входить в стандартний набір інструментальних засобів розробки додатків для цієї операційної системи [21].

Як і у більшості інших ОС, в TinyOS основним механізмом, що управляє, є подія. Подія сигналізує про отримання повідомлень сенсора, про вступ пакету даних по безпроводному зв'язку, про спрацьовування таймера або про завершення обчислень. Обробка апаратної події лежить в основі усіх операцій в TinyOS. Таким чином, для моделювання роботи вузлів БСМ необхідно уміти імітувати апаратні події, що відбуваються на них. Таким чином, основне завдання TOSSIM — емуляція подій для БСМ, вузли які працюють під управлінням TinyOS. TOSSIM встановлюється на звичайний ПК разом з набором інструментальних засобів, необхідних для створення, компіляції, установки і відладки додатків для БСМ. Робота з цими інструментами здійснюється за допомогою командного інтерфейсу, характерного для ОС UNIX.

Приведемо загальні характеристики емулятора TOSSIM:

- масштабованість — емулятор може моделювати роботу як окремих вузлів, так і великих мереж, що складаються з декількох тисяч вузлів;
- повнота — емулятор в змозі моделювати різні схеми взаємодії елементів БСМ, причому не лише алгоритми і мережеві протоколи, але і структуру сенсорної мережі, що змінюється;
- точність — емулятор може представляти поведінку мережі з необхідною точністю. Визначення точного часу настання подій важливе як для аналізу, так і для тестування додатків для БСМ;
- достовірність — емулятор реалізує адекватний перехід від модельованої до реального середовища виконання додатка, надаючи розробникові можливість тестувати код, який призначений для реального устаткування.

До складу емулятора TOSSIM входять наступні елементи (додаток Б) [21]:

- засіб вбудовування самого тестованого додатка TinyOS в структуру емулятора;
- черга подій;

- набір програмних компонентів, які замінюють відповідні апаратні компоненти реальних вузлів;
- механізми опису моделей радіоканалів і аналого-цифрових перетворювачів(ADC);
- засоби зв'язки, що надають можливість зовнішнім програмам взаємодіяти з емулятором.

Засіб вбудованого додатка TinyOS в структуру емулятора дозволяє моделювати роботу додатків, написаних для реальних вузлів. Компілятор, що входить до складу TOSSIM, замінює декілька низько рівневих компонентів, додатки, які взаємодіють з апаратними ресурсами вузла, компонентами, що взаємодіють з програмними реалізаціями цих пристроїв в емуляторі. Завдяки цьому емулятор виконує той же код, що і реальні сенсорні вузли.

TOSSIM перетворює переривання комп'ютера в події емулятора і вибудовує їх в чергу; ця черга подій емулятора управляє виконанням додатка TinyOS для окремого модельованого вузла. Іншими словами, згенерована подія емулятора в черзі є замінником апаратного переривання для модельованого вузла. Виникаючу подію викликає обробник переривання, який посилає сигнали подіям і викликає команди TinyOS, імітуючи те, що відбувається в реальних вузлах. Ці події і команди TinyOS запускають завдання і ініціюють подальшу генерацію подій емулятора.

Для визначення моменту настання події в TOSSIM використовується внутрішній годинник, працюючий з тактовою частотою 4 МГц. Кожна подія відбувається строго свого часу, виконується негайно і пов'язане з певним вузлом. Оскільки на усіх вузлах виконується однакова програма, при моделюванні можлива штучна синхронізація їх роботи. Для відвертання подібної ситуації емулятор запускає програму на кожному модельованому вузлі з деякою затримкою.

У TOSSIM змінні, що описують компоненти вузла (а вони одні і ті ж для усіх вузлів), представляються у вигляді масивів. Елементом такого масиву є змінна окремого модельованого вузла, індекс якого дорівнює індексу цього

елементу в масиві. Коли ядро емулятора обробляє подію, в глобальну змінну-стан встановлюється індекс вузла, працюючого у даний момент. Цей індекс використовується для вибірки з масивів даних тих елементів, які відносяться до активного вузла.

TOSSIM використовує дуже просту, але неймовірно потужну модель безпроводної мережі. Мережа представляється у вигляді орієнтованого графа, в якому кожна вершина — безпроводний вузол і кожній дузі між вузлами поставлено у відповідність деяке значення — вірогідність помилки. Кожен вузол має локальну змінну, куди заноситься те, що приймається їм по радіоканалу. Така модель дозволяє проводити тестування в умовах, коли вірогідність помилки при передачі даних дорівнює нулю, моделювати приховані обмеження (наприклад, для вузлів  $a$ ,  $b$ ,  $c$  існує зв'язок  $(a, b)$  і  $(b, c)$ , але немає зв'язку  $(a, c)$ ), а також безліч різних проблем, які трапляються при передачі (не знайдений початковий символ, порушена цілісність даних і тому подібне).

Як вже було сказано, TOSSIM встановлюється на звичайний ПК разом з набором інструментальних засобів, що утворюють середовище розробки, які можна викачати з сайту [www.tinyos.net](http://www.tinyos.net). Управління інструментальними засобами робиться через командний інтерфейс, характерний для ОС UNIX. Тобто для успішного освоєння середовища розробки, зокрема емулятора TOSSIM, потрібне знання ОС UNIX хоч би на рівні користувача.

Писати додатки TinyOS можна у будь-якому текстовому редакторі, рядок в якому закінчується одним символом LF, як прийнято в ОС UNIX. Компіляція написаного коду робиться за допомогою команди `make`, параметром для якої служить ім'я платформи (`mica`, `mica2`, `iris`, і тому подібне). Для роботи команди `make` необхідно створити файл з інструкціями `makefile`, що є окремим і дуже нетривіальним завданням. Але спершу можна скористатися вже написаним файлом інструкцій, який знаходиться в каталозі `/opt/tinyos-2.x/apps/`.

Команда `make ps` викликана з каталогу, що містить початковий файл додатка і файл інструкцій, створить виконуваний файл (`main.exe`) для виконання додатка в середовищі емулятора. Щоб запустити процес моделювання, треба скористатися командою: `./main [опції] <кількість_вузлів_в_мережі>`.

Список опцій доступний у відповідному розділі довідкової системи.

Для зупинки TOSSIM можна використати комбінацію клавіш Ctrl+C. За замовчуванням при моделюванні на екран виводяться усі повідомлення емулятора, проте, як правило, це утрудняє роботу. Для фільтрації повідомлень передбачена глобальна змінна `dbg`, список допустимих значень якої можна знайти в довідковій системі. Роботу додатка можна змоделювати і з використанням графічного інтерфейсу емулятора TinyViz. Спочатку TinyViz необхідно скомпілювати, для чого слід виконати команду `make` з каталогу `/opt/tinyos-2.x/tools/java/net/tinyos/sim`.

Після компіляції з'явиться файл – скрипт `tinyviz`, за допомогою якого і запускається моделювання з візуалізацією. Наприклад, дві команди:

```
export dbg=usr1;  
./tinyviz - run ./main.exe 30
```

та запустять графічне моделювання БСМ, що складається з 30 вузлів, на кожному з яких виконується додаток `main.exe`.

### 1.3 Постановка задачі локалізації об'єктів

Безпроводні сенсорні мережі складається з великої кількості сенсорних вузлів, які використовуються для контролю певної області. Цей тип мережі став популярною завдяки своєму застосуванню, яке включає в себе кілька напрямків, таких як екологічний, медичний, промисловий, побутовий, сільськогосподарський, метеорологічний і військовий.

Визначення локалізації системи серед вузлів є одним з необхідних передумов, для того, щоб зробити функціональну БСМ. Проблема локалізації полягає у визначенні фізичного місця розташування (наприклад, широта, довгота і висота) об'єкта, який визначається. Таке завдання є дуже важливим і актуальним, що стосуються таких областей, як робототехніка, однорангових мереж, бездротових сенсорних мереж, стільникового зв'язку, військової, авіаційної та астрономії.

Системи локалізації були визначені в якості ключових технологій для розвитку і функціонування БСМ.

Математична постановка завдання визначення координат в сенсорній мережі зазвичай виглядає таким чином. Припустимо в деякій області простору  $S$  розміром  $S = A \times B$ , випадковим чином однорідно розподілені об'єкти безпроводної сенсорної мережі  $\{i\}$ , де  $i \in M = [1 \dots M]$  (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Схема розташування вузлів БСМ в просторі

Об'єкти мають радіо засоби, завдяки яким кожен об'єкт може спілкуватися і визначати відстані  $d$  до найближчих "сусідів" (об'єкти з якими є зв'язок в радіусі  $L$ ), при цьому (виходячи із методу визначення відстаней) відома точність вимірів, що проводяться. Кожен об'єкт  $i$  збирає інформацію про відстані до усіх доступних "сусідів"  $j$  і заносить її в таблицю  $T_i = \{j, d_{ij}\}$ . Виходячи з цих даних потрібно визначити координати об'єктів  $\vec{r}_i$ . Іншими словами потрібно вирішити систему рівнянь  $|\vec{r}_i - \vec{r}_j| = d_{ij}$ , де  $d_{ij}$  – виміряна відстань від  $i$  до  $j$ , як правило містить похибку вимірювання, яка описується розподілом  $F(d_{ij}, \sigma_{ij})$ , де  $i, j = [1 \dots M], i \neq j$ . Як правило, в якості функції розподілу  $F$  використовується нормальний розподіл  $N(0, \sigma_{ij})$ , при цьому дисперсія помилки виміру  $d$

визначається способом оцінки відстані, і може бути оцінена апріорі теоретично, на основі імітаційного моделювання або з експерименту.

Результатом рішення поставленої задачі незалежно від алгоритму визначення координат залежить від ряду початкових умов: наявність базису (об'єктів з відомими координатами), точність вимірювання відстаней, рівномірність і щільність розподілу об'єктів мережі  $i \in M$ .

Точність вимірювання відстаней залежить від способу оцінки відстані.

Потрібно затвердити деякі терміни які можуть бути використані, щоб визначати поточний стан вузла.

*Визначення 1.* Невідомі вузли –  $U$ . Також відомі, як невизначені або німі вузли, невідомі вузли звертається до вузлів мережі, які не знають інформацію про їх локалізацію. Дозволити цим вузлам оцінювати свою позицію – основна мета систем локалізації.

*Визначення 2.* Визначені вузли –  $S$ . Ці вузли були спочатку невідомими вузлами, але зуміли оцінити їх позиції, використовуючи систему локалізації. Число визначених вузлів і передбачувана помилка позиції цих вузлів - основні параметри якості системи локалізації.

*Визначення 3.* Якірні вузли –  $B$ . Також відомі як орієнтири або прив'язки, це – вузли, які не потребують системи локалізації, щоб оцінити їх фізичні позиції. Їх локалізація отримана ручним розміщенням або зовнішніми засобами, такими як універсальна система. Ці вузли формують ядро систем локалізації більшості для БСМ.

*Визначення 4.* Вузли додаткової інформації. Це - вузли, в яких інформація локалізації використовуватиметься невідомим вузлом, щоб оцінити його місце розташування. Вузол додаткової інформації має також бути якорем або визначеним вузлом.

Проблема локалізації може тоді бути спрощена і визначена за наступним визначенням:

*Визначення 5.* Проблема локалізації. Враховуючи декілька переходів мережі, і набір якірних вузлів  $B$  та їх позиції  $(x_b, y_b)$  для всіх  $b \in B$ , нам потрібно

знати позицію розташування невідомого вузла  $U(x_u, y_u)$  також для всіх  $u \in U$ , перетворюючи ці *невідомі* вузли у визначені вузли  $S$ .

Положення вузлів не повинні бути розроблені і визначені. Це дозволяє випадкове розгортання мережі в недоступних місцях або при операції допомоги запобігання лиха (пожежі). Таким чином, системі локалізації потрібно надати інформацію про позиції до вузлів. Важливість інформації локалізації є результатом декількох коефіцієнтів. Деякі з цих коефіцієнтів включають:

- ідентифікація даних: полягає у відображенні подій до їх місця розташування. Одна з основних цілей БСМ полягає в тому, щоб контролювати область, що представляє інтерес. Проте, як тільки дані зібрані, стає важливо ідентифікувати область, якій належать ці дані;

- кореляція даних: дозволяє проміжним вузлам корелювати і виконувати інформаційний сплав даних, зібраних на тій же самій області, тоді як ці дані відправлені через мережу [22, 23];

- адресація вузлів: відноситься до можливості використання фізичного розташування вузлів, які мають унікальну ідентифікацію в мережі [24];

- управління мережею: дозволяє управляти запитом вузлів локалізованих в певному регіоні, оцінки охоплення вузлів [25];

- географічні алгоритми: Це – алгоритми, які використовують інформацію локалізації - вузлів, щоб оптимізувати використання мережевих ресурсів. Деякі з цих алгоритмів включають маршрутизацію, управління щільністю мережі [26].

Також потрібно виділити основні вимоги системи локалізації, які необхідні для побудови БСМ:

- самоорганізація, яка незалежна від будь-якої інфраструктури;
- масштабованість, де алгоритми можуть бути застосованими до великомасштабних і/або щільних мереж;

- надійність складається з допуску до проблем комунікації і також до неточної відстані і інформації позиції

– ефективність при використанні мережевих ресурсів, тому що навіть, будучи необхідним для більшості БСМ, система локалізації не основна мета цих мереж.

## Висновки до розділу

Ознайомившись із безпроводними сенсорними мережами, важливо звернути увагу на те, що вони дуже стрімко розвиваються та з появою нового стандарту бездротового зв'язку IEEE 802.15.4 (ZigBee) привернули значну увагу через надзвичайно широкого кола вирішуваних завдань: створення мереж систем моніторингу та контролю, автоматизації і управління.

Привабливість таких мереж полягає у використанні великої кількості мініатюрних енергозберігаючих пристроїв як об'єктів що самоорганізуються. Технологія Zigbee може бути використана як для реалізації простих з'єднань "точка-точка" і «зірка», так і для утворення складних мереж з топологіями «дерево» і «багаточарункова мережа».

Також розглянуто проблему локалізації БСМ, важливо зазначити що при локалізації мережі необхідно щоб ціна сенсорних вузлів була як найнижчою.



## 2 МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ

### 2.1 Компоненти системи локалізації

Системи локалізації можуть бути розділені на три відмінні компоненти:

1. Оцінка відстані або кута: цей компонент відповідальний за оцінку інформації відстаней і/або кутів між двома вузлами. Така інформація використовуватиметься іншими компонентами системи локалізації.

2. Обчислення позиції розташування: цей компонент відповідальний за обчислення позиції вузла, заснованої на доступній інформації відстаней/кутів і позиціях вузлів довідкової інформації.

3. Алгоритм локалізації: це – основний компонент системи локалізації. Він визначає, яким чином наявна інформація буде оброблятися, з тим щоб всі або майже всі вузли БСМ оцінили свої позиції.

На рисунку 2.1 зображено складовий розподіл компонент. Крім того, що дидактичні точки зору, значення такого поділу на компоненти приходить, як ми побачимо, з необхідністю визнати, що фінальний виступ локалізації системи безпосередньо залежить від кожного з цих компонентів.

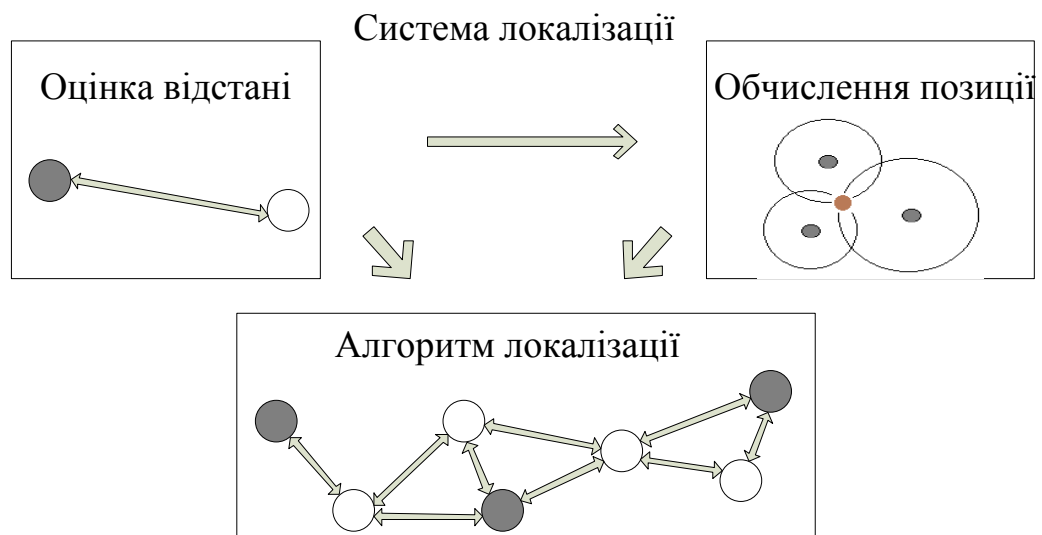


Рисунок 2.1 – Компоненти системи локалізації: оцінка відстань/кут, обчислення позиції розташування та алгоритм локалізації

Крім того, кожен компонент має свою власну мету і методи рішення. Їх можна розглядати як під області локалізації проблеми, які повинні бути окремо проаналізовані та вивчені. Стрілки вказують на залежність відносини, тобто потік інформації від одного компонента до іншого [27].

## 2.2 Методи визначення координат

Отримана оцінка відстані/кута, ідентифікує відстань або кут між двома вузлами. Такі оцінки складають важливий компонент систем локалізації, тому що їх використовує обчислення позиції, а також алгоритмом локалізації.

Можуть використовуватися різні методи, для щоб оцінити таку інформацію. Деякі з них дуже точні, але з додатковою вартістю на обладнання, тоді як інші менш точні, але вже доступні на більшості вузлів.

У наступних розділах будуть вивчені деякі з основних методів, використовуваних системами локалізації, щоб оцінити відстані/кути. Ці методи включають RSSI, ToA/TDoA, AoA, і діапазон комунікації.

### 2.2.1 Метод визначення координат на основі вимірювання потужності сигналу

Найбільш простим методом визначення дальності до вузла є індикація рівня прийнятого сигналу (Received Strength Signal Indication, RSSI). RSSI – в телекомунікації, пристрій для вимірювання рівня потужності сигналу. Найпростіші схеми розробляються, щоб прийняти вхідний сигнал і сформувати аналогову вихідну напругу (або відповідний цифровий код, отриманий після подачі цієї напруги на АЦП), пропорційне потужності прийнятого сигналу. Можна використовувати даний показник, щоб оцінити відстань до передавача (від стільникових телефонів – до базової станції).

Як правило, сигнал вимірюється на проміжних частотах перед підсилювачем (наприклад, у стільникових телефонах і інших GSM-пристроях). У

пристроях, які працюють без використання проміжних частот, вимірювання ведеться на основній частоті [28].

Будь-який безпроводний канал за стандартом IEEE 802.15.4 має протокольну функцію оцінки якості зв'язку (Link Quality Indicator), дія якого зводиться до визначення потужності прийнятого сигналу. Результат цього виміру можна вивести, відкалібрувати по відомій відстані і оцінити дальність до джерела.

Як зображено на рисунку 2.2, вузол посилає сигнал з певною силою, яка зменшена, оскільки цей сигнал розмножений. Чим більше відстань до вузла одержувача, тим нижче потужність сигналу, у вузлі отримувачі.

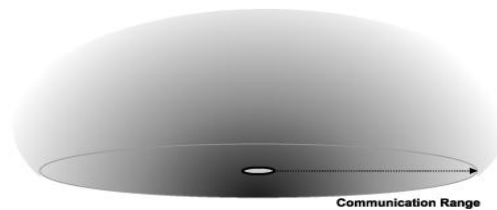


Рисунок 2.2 – Зменшення потужності сигналу. Сигнал посилають з певною потужністю, яка зменшується, теоретично, пропорційно з довжиною відстані

Втрати на трасі при розповсюдженні найкраще описуються моделлю втрат на трасі вільного розповсюдження. Модель втрат на трасі вільного розповсюдження припускає, що передавальна антена є ізотропною, тобто, передавач випромінює енергію з рівною інтенсивністю у всіх напрямках, і немає ніяких об'єктів на трасі розповсюдження між передавачем і приймачем, які могли б блокувати сигнал або створювати умови для його відображення. Також передбачається, що середовище передачі не поглинає енергію.

Потужність, прийнята приймальною антеною в моделі вільного простору визначається за формулою Фрісса для вільного простору [29]:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L}, \quad (2.1)$$

де  $P_t$  – передана потужність,  $P_r(d)$  – прийнята потужність, яка є функцією відстані між передавачем і приймачем,  $G_t$  – посилення передавальної антени,  $G_r$  – посилення приймальної антени,  $\lambda$  - довжина хвилі сигналу,  $d$  - це відстань між передавачем і приймачем і  $L$  - коефіцієнт втрат системи, не пов'язаних з розповсюдженням.

Можна бачити, що потужність прийнятого сигналу назад пропорційна квадрату відстані між передавальною і приймальною антенами. Отже, якщо відстань між передавачем і приймачем збільшується, потужність сигналу, що приймається, зменшується. Рівняння 2.1 може бути записано у такому вигляді:

$$P_r(d) = \left( \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \right) \left( \frac{d_0}{d} \right)^2, \quad (2.2)$$

де  $d_0$  – гранична відстань для дальньої області антени. Втрати на трасі,  $PL(d)$  – це ослаблення сигналу між передавальною і приймальною антенами і визначається як:

$$PL(d) = \frac{P_t}{P_r(d)}, \quad (2.3)$$

$$PL(d) = \left( \frac{(4\pi d_0)^2 L}{G_t G_r \lambda^2} \right) \left( \frac{d}{d_0} \right)^2. \quad (2.4)$$

Цьому методу властивий ряд істотних обмежень, оскільки рівень сигналу є дуже мінливим параметром із – за впливу наступних чинників:

- швидкі і повільні затухання сигналів на трасі за зміни умов поширення радіохвиль;
- багатопроменеве поширення, внаслідок віддзеркалень від різних металевих предметів;
- розкид вихідної потужності передавачів і чутливості приймачів;

- вплив орієнтації антен за нерівномірності діаграми спрямованості.

Також даний метод, як і інші, має певні переваги і недоліки. Основна перевага – низька ціна, тому що більшість одержувачів здатна до оцінки отриманої сили сигналу.

Недолік цього методу – те, що це дуже підпорядковано спотворенням і втручанням, що призводить до вищих погрішностей на оцінках відстані. Деякі експерименти, помилки показу від 2 до 3 м. у сценаріях, куди усі вузли поміщені в поле площини, 1.5 м. від основи, і з діапазоном комунікації 10 м [30].

Хоча RSSI показує деякі результати в моделюваннях і експериментах, його використання в реальних застосуваннях не завжди оправдане. Але, розглядаючи його низьку ціну, використання даного методу має певні переваги. При використанні складних і точних пристроїв (наприклад, з кращими передавачами) RSSI є найбільш доступною технологією оцінки відстані з точки зору вартості/точності.

### 2.2.2 Метод визначення координат на основі часу прибуття сигналу

Різні методи намагаються оцінити відстань між двома вузлами, використовуючи час, виміри часу поширення сигналу від передавача до приймача так, щоб на його основі можна було розрахувати відстань між передавачем і приймачем. Найпростішим є ToA – Time of Arrival [31]. В цьому випадку, відстань між двома вузлами безпосередньо пропорційно часу, коли сигнал використовується, щоб поширитися від одного пункту до іншого. Ця відстань, якщо сигнал послали вчасно  $t_1$  і досяг вузла приймача вчасно  $t_2$ , відстань між відправником і приймачем визначається за формулою:

$$d = s_r(t_2 - t_1), \quad (2.5)$$

де  $s_r$  - швидкість поширення радіо – сигналу (швидкість світла), і  $t_1$  і  $t_2$  – часи, коли сигнал відіслано і отримано (рисунок 2.3, а). Цей тип оцінки вимагає

точно синхронізованих вузлів, і час, коли сигнал залишає вузол, має бути в пакеті, який посилають [32].

TDoA (Time Difference of Arrival) заснований на відмінності часів коли єдиний сигнал від одного вузла прибуває в три або більше вузли або різниці часу, коли кілька сигналів від одного вузла надходять в інший вузол.

Перший випадок, більш поширений в стільникових зв'язках, вимагає точно синхронізованих вузлів приймача (в цьому випадку, базові станції).

У другому випадку, більш поширеному і підходящому для БСМ, вузли повинні бути обладнані додатковими апаратними засобами, здатними до відправлення двох типів сигналів одночасно. У цих сигналів повинні бути різні швидкості поширення, як радіо/ультразвук або радіо/акустичний. Зазвичай, перший сигнал – пакет безпосередньо, який із швидкістю світла ( $\sim 300,000 \text{ km/c}$ ), і другий сигнал - деякий звук, через його повільніше поширення ( $\approx 340 \text{ м/c}$ ) [32].

На рисунку 2.3,б наведений приклад методу TDoA який використовується для обчислення координат БСМ, де ультразвуковий імпульс передається одночасно з радіосигналом. В цьому випадку, вузли вираховують різницю часу прибуття двох сигналів. Відстань може тепер бути обчислена наступною формулою:

$$d = (s_r - s_s)(t_2 - t_1), \quad (2.6)$$

де  $s_r$  і  $s_s$  - швидкість поширення радіо та ультразвукового сигналу, і  $t_1$  і  $t_2$  - час прибуття радіо та ультразвукових сигналів, відповідно.

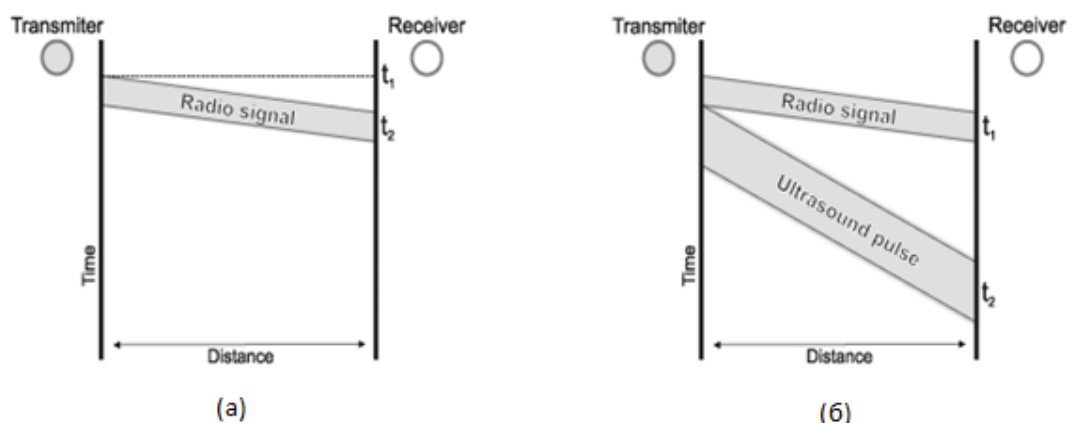


Рисунок 2.3 – Визначення відстаней за допомогою методів: а) TOA – (Time of Arrival); б) TDOA (Time Difference of Arrival)

Оцінка помилки на відстані, отримані TDOA, вимірюються в сантиметрах. Експерименти з ультразвуком, показують помилки приблизно два або три сантиметри (менші ніж вузол).

Незважаючи на більш низькі помилки, у цих методах є певні недоліки. Перший – потреба додаткових апаратних засобів щоб надсилати другий сигнал, який збільшує вартість вузла. Другий – діапазон другого сигналу, який зазвичай менший між 3 м. і 10 м. з більш потужними передавачами [33].

### 2.2.3 Метод визначення координат на основі кута отриманого сигналу

Метод визначення координат на основі кута отриманого сигналу (від англ. Angle of Arrival, AOA), координати мобільних вузлів розраховуються за законами гоніометрії [34]. За допомогою спрямованих антен або набору антен мобільним вузлом вимірюються кути приходу сигналів від стаціонарних вузлів з відомими координатами (рисунок 2.4). По вимірних напрямках обчислюється координати рухливого об'єкту. Точність цього підходу обмежена можливими затуханнями сигналу на вимірюючій апертурі, а так само із – за багатопроменевих відображень сигналу, коли приходять з неточних напрямів.

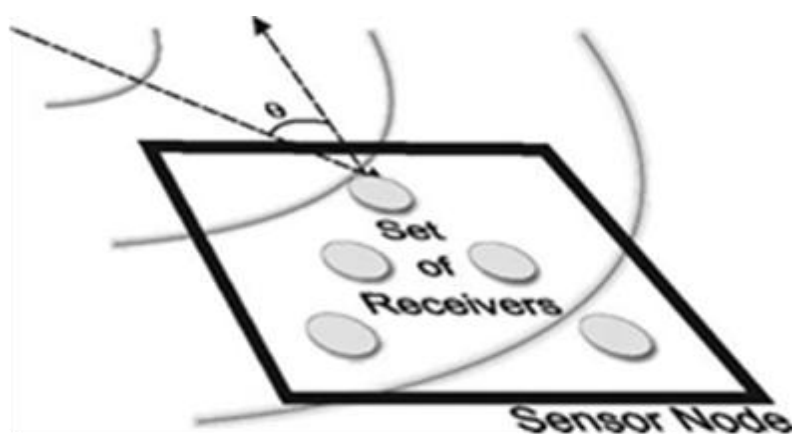


Рисунок 2.4 – Angle of Arrival

Експерименти показують, що цей метод має похибку в кілька градусів (близько  $5^\circ$  на практиці до  $36^\circ$ ) [34]. Недоліками цього методу є необхідність додаткового обладнання та необхідність мінімальної відстані між приймачами.

#### 2.2.4 Метод визначення координат на основі дальності сигналу

В деяких випадках, тільки інформацію для оцінки відстані є дальність зв'язку вузлів. Якщо вузол отримує пакет даних з іншого вузла, то відстань між цими вузлами між нулем і максимальної дальності зв'язку.

Як правило, методики, які використовують цей метод оцінки відстані не потрібно точну відстань, але тільки інтервал. Щоб отримати тільки один відстань (а не інтервал), ми можемо вибрати одну точку з інтервалу, як в середній точці, наприклад. В цьому випадку максимальна похибка цієї оцінки буде наполовину менша від дальності зв'язку.

Цей метод визначення відстані має ту перевагу, що найпростіший і з найменшими витратами. Немає додаткового обладнання не потрібно, так само як і додаткових обчислень, необхідних для оцінки відстані. З іншого боку, помилка половини дальності зв'язку для кожної відстані, є не придатною для більшості систем локалізації. Візьмемо, наприклад дальність зв'язку до 100 метрів. У цьому випадку похибка цього методу може бути близько 50 м [34].

### 2.3 Методи обчислення позиції розташування

Коли у вузла є досить інформації про відстані або кути позицій, тоді можна визначити свою власну позицію, використовуючи один з методів, які будуть розглянуті в цьому розділі.

Декілька методів можуть використовуватися, щоб вирахувати позицію вузла. Такі методи включають: трилатерацію, мультилатерацію, триангуляцію, імовірнісні підходи, обмеження квадратом. Вибір якого метод використовувати також дії кінцева продуктивність системи локалізації. Такий вибір залежить від



доступної інформації і від обмежень процесора. У подальших розділах будуть розглянуті вище наведені методи.

### 2.3.1 Трилатерація та мультилатерація

Трилатерація – найосновніший та найпростіший метод. Цей метод обчислює позицію вузла перетином трьох кіл, як зображено на рисунку 2.5. Щоб оцінити його позицію, використовуючи трилатерацію, вузол повинен знати положення трьох довідкових вузлів і відстані до кожного з цих вузлів. Відстані можуть бути обчислені, використовуючи один з методів, розглянутих у попередніх розділах.

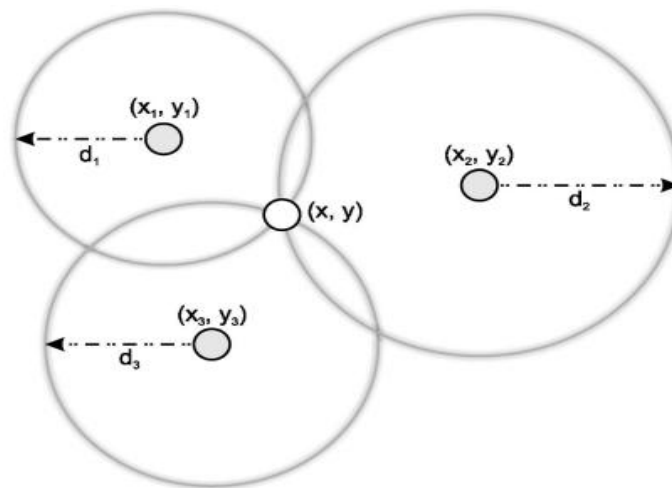


Рисунок 2.5. Теоретична модель трилатерації: положення невідомого вузла відповідає перетинанню цих трьох кіл, сформованих положень і відстанями до якірних вузлів

Круги, які сформовані положенням і відстанню до кожної точки виражаються за формулою:

$$\begin{aligned}(\hat{x} - x_1)^2 + (\hat{y} - y_1)^2 &= d_1^2 \\(\hat{x} - x_2)^2 + (\hat{y} - y_2)^2 &= d_2^2 \\(\hat{x} - x_3)^2 + (\hat{y} - y_3)^2 &= d_3^2,\end{aligned}\tag{2.7}$$

де  $(\hat{x}, \hat{y})$  – позиція яку потрібно знайти,  $(x_i, y_i)$  – позиція якірних вузлів, та  $d_i$  – відстань якірного вузла до невідомого вузла. В цьому випадку, у нас є три квадратичні рівняння з двома невідомими, які можуть бути вирішені, теоретично, в одно рішення.

У практичному застосуванні важко оцінити відстані і точну інформацію про розташування довідкових вузлів, щоб обчислити координати. Як зображено на рисунку 2.6,а круги не перетинаються лише в одній точці, що призводить до нескінченних набору можливих рішень.

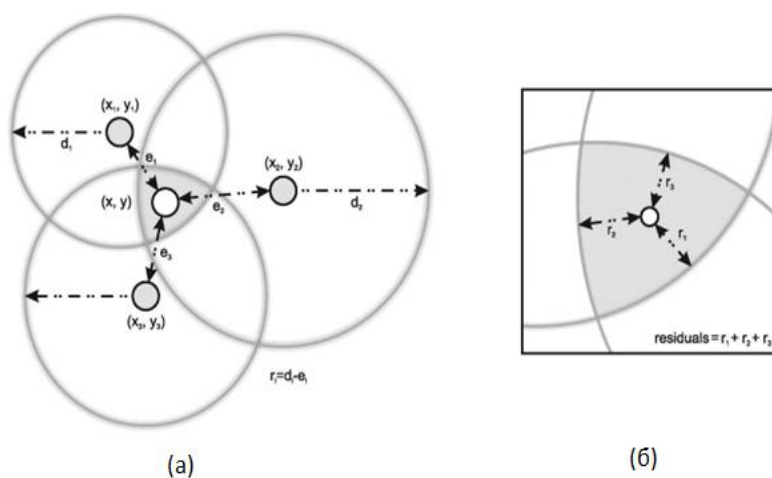


Рисунок 2.6 – Практична модель трилатерації: а) невідповідність позицій і відстаней генерують систему з нескінченними рішеннями; б) залишкове значення, як сума квадратів різниць між передбачуваними і обчисленими відстанями

Крім того, коли доступно більше трьох вузлів з відомими координатами, ми можемо використати метод мультилатерації, щоб обчислити положення вузла. Тоді невизначена система рівнянь, де число рівнянь більше (за рахунок збільшення числа якірних вузлів), числа невідомих повинна бути вирішена. На рисунку 2.7 зображений цей випадок. Зазвичай, у таких систем не має унікального вирішення.

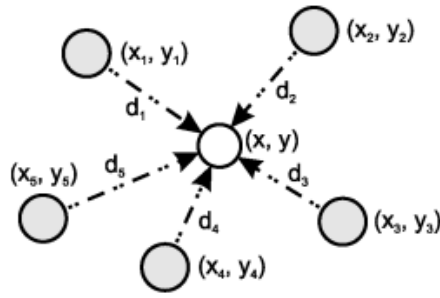


Рисунок 2.7 – Модель мультилатерації, застосовується тільки тоді коли використовується більше ніж три якірні вузли

Розглянувши  $n$  якірних вузлів і похибку оцінки відстані, яка робить  $d_i = \hat{d}_i - \epsilon$ , система рівнянь виглядатиме наступним чином:

$$\begin{aligned}
 (\hat{x} - x_1) + (\hat{y} - y_1) &= \hat{d}_1^2 - \epsilon \\
 \vdots & \\
 (\hat{x} - x_n) + (\hat{y} - y_n) &= \hat{d}_n^2 - \epsilon,
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

де,  $\epsilon$  - зазвичай вважається незалежна нормальна випадкова величина.

Враховуючи останню рівність, систему рівнянь можна спростити до лінійної,  $Ax \approx b$ , або:

$$\begin{aligned}
 &\begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} \approx \\
 &\approx \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_1^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_{n-1}^2 - d_n^2 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Ця лінійна система може бути легко вирішена, використовуючи стандартні методи як підхід найменших квадратів. Це може бути зроблено наступним чином:

$$x = (A^T A)^{-1} (A^T b). \quad (2.10)$$

Основна ідея цього методу полягає в мінімізації суми квадратів різниці між розрахунками (наприклад, за допомогою RSSI) і обчислені відстані (за оцінками, положення). Сума відмінностей відома як залишки, як показано на рисунку 2.6,б. Математично записується так:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \min \left( \sum_{i=1}^n \left( \sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2} - d_i \right)^2 \right), \quad (2.11)$$

де  $(x_i, y_i)$  позиція опорного вузла,  $d_i$  – оцінка відстані,  $\sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2}$  – відстань між обчисленою позицією і позицією опорного вузла, який є обчисленим відстанню.

Необхідно обчислити декілька операцій з плаваючою комою в залежності від методу який вираховує положення, що використовується для вирішення системи рівнянь. У випадку методу найменших квадратів  $\left(m + \frac{n}{3}\right) n^2$ , операцій з плаваючою комою (де  $m$  – кількість невідомих і  $n$  – кількість рівнянь) необхідні для визначення позиції [35].

### 2.3.2 Тріангуляція

В методі тріангуляція, використовується інформація кутів замість відстаней. Обчислення позиції може бути зроблене віддалено або вузлом безпосередньо. У обох випадках позиція обчислюється з використанням тригонометрії законам синусів і косинусів.

У першому випадку, віддаленого позиціонування, зображено на рисунку 2.8,а принаймні два опорні вузли оцінюють кут прибуття і віддалено обчислюють положення невідомого вузла як місце, де лінії кутів від кожного опорного вузла перетинаються. Цей тип тріангуляції в основному використовується у стільникових зв'язках [34].

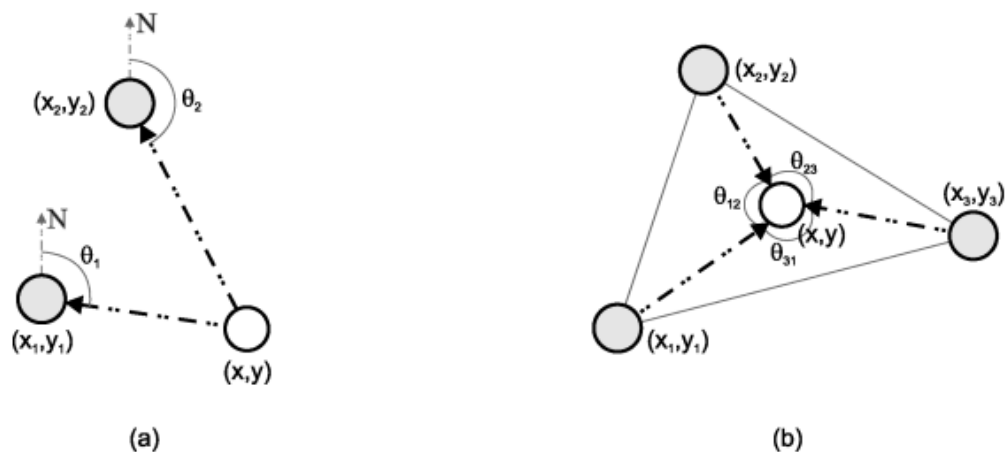


Рисунок 2.8 – Триангуляція: а) двома якорними вузлами; б) трьома якорними вузлами

Але для сенсорних мереж, найважливіше – те, що сам вузол обчислює свою власну позицію, тому для цього необхідно мати принаймні три вузли з відомими координатами (рисунок 2.8,б). Невідомий вузол оцінює свій кут до кожного з трьох опорних вузлів, заснований на цих кутах і на позиціях опорних вузлів (які формують трикутник), обчислює свою власну позицію, використовуючи прості тригонометричні співвідношення [36]. Цей метод подібний до методу трилатерації.

### 2.3.3 Імовірнісний підхід

Невизначеність на відстані призвела до появи методу імовірнісних підходів для обчислення позиції вузла. У імовірнісному підході обчислення позиції не призводить до одного єдиного пункту, як в інших випадках, але у ряді пунктів і їх вірогідності того, щоб бути реальною позицією невідомого вузла.

Оцінка відстані імовірнісного підходу змодельована як нормальна випадкова змінна. Коли невідомий вузол отримує пакет від опорного вузла, це може бути у будь – якому місці навколо опорного вузла з імовірністю як зображено на рисунку 2.9,а. Коли інший пакет отриманий від іншого опорного вузла, невідомий вузол обчислює свою позицію знову як зображено на рисунку 2.9,б. Коли нова інформація розташування інших вузлів отримана, тоді стає

можливим, щоб ідентифікувати імовірне місце розташування невідомого вузла, як зображено на рисунку 2.9,в.

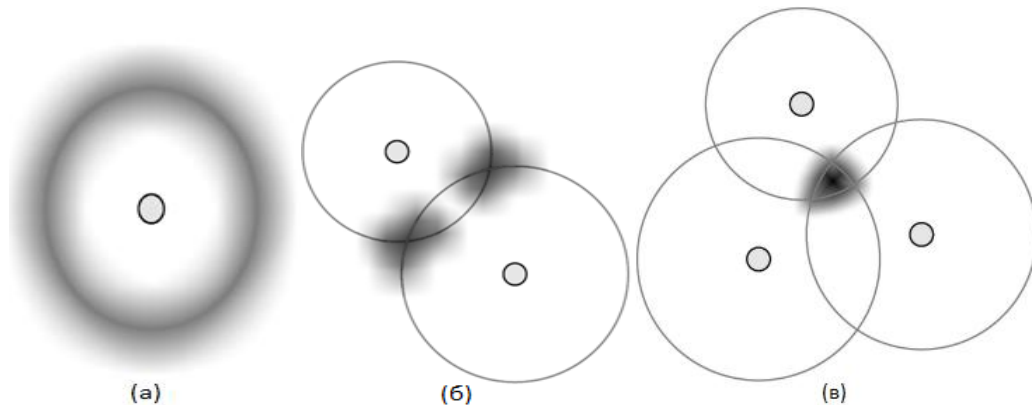


Рисунок 2.9 - Імовірнісний підхід

Основна проблема цього підходу - висока обчислювальна вартість і простір куди потрібно зберігати інформацію. Досліди цього методу показують, що, якби ми розглядали типовий розмір як матрицю  $d \times d$ , складність цього методу була б  $O(3d^2)$ . Вся суть роботи цього методу полягає в переданні зібраної інформації до центрального вузла, на якому проводяться обчислення позицій [37].

#### 2.3.4 Обмеження квадрату

Метод обмеження квадрату (Bounding Box), використовує квадрати – замість кругів, які використовуються наприклад в методі трилатерації, – обмежуючи можливі положення вузла. Приклад цього методу зображений рисунку 2.10 [38].

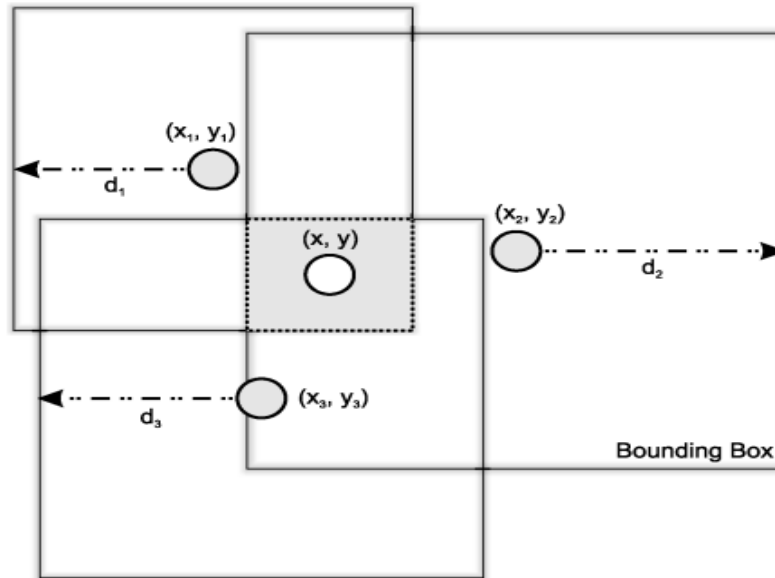


Рисунок 2.10 – Метод Bounding Box

Для кожного  $i$  опорного вузла, обмежуючий квадрат, визначений як квадрат з центром у позиції цього вузла  $(x_i, y_i)$ , із сторонами розміру  $2d_i$  (де  $d$  – передбачувана відстань), з координатами:

$$(x_i - d_i, y_i - d_i) \text{ та } (x_i + d_i, y_i + d_i). \quad (2.12)$$

Перетин усіх обмежуючих квадратів може бути легко обчислений без потреби обчислень з плаваючою комою, беручи максимально низькі і мінімально високі координати усіх зв'язуючих квадратів:

$$(\max(x_i - d_i), \max(y_i - d_i)) \text{ та } (\min(x_i + d_i), \min(y_i + d_i)) \quad (2.13)$$

Отримуємо заштрихований прямокутник який можна побачити на рисунку 2.10. Позиція невідомого вузла потім обчислюється як центр перетину усіх зв'язуючих квадратів:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \left( \frac{\max(x_i - d_i) + \min(x_i + d_i)}{2}, \frac{\max(y_i - d_i) + \min(y_i + d_i)}{2} \right). \quad (2.14)$$

Незважаючи на помилку цього методу при завершенні обчислення, яка більша, ніж у методі трилатерації але значно менша кількість ресурсів процесора використовується для обчислення перетину квадратів, ніж обчислення перетину кругів.

### 2.3.5 Метод центрального положення щодо опорних вузлів

Відповідно до припущення, що найвірогідніше розміщення вузла – центральна точка серед усіх опорних вузлів, ми можемо обчислити позицію невідомого вузла без потреби оцінки відстаней або кутів, але тільки при використанні методу на основі дальності сигналу який розглядали вище.

В цьому випадку, позиція вузла вичислена при використанні наступного рівняння [28]:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right), \quad (2.15)$$

де  $n$  – кількість опорних вузлів.

Цей метод є найбільш простим з точки зору обчислювальних ресурсів та необхідної інформації. Тільки  $2n + 2$  операції з плаваючою комою (де  $n$  – кількість опорних вузлів), обов'язкові для обчислення позиції. З іншого боку, отримані рішення не точні, головне щоб кількість опорних вузлів була невеликою.

## 2.4 Алгоритми локалізації

Алгоритм локалізації – головний компонент системи локалізації. Цей компонент визначає, як інформацією відстаней і положень будуть використовувати, щоб обчислити розташування вузлів сенсорної мережі із найменшими помилками.



Алгоритми локалізації класифікуються по таких категоріях:

- розподілені чи централізовані (Distributed or Centralized)

Розташування вузлів можуть бути обчислені розподіленим способом вузлами мережі (само позиціонування), або єдиним центральним вузлом (наприклад, більш потужнішим вузлом – маршрутизатором) [31];

- з або без інфраструктури. Якщо немає ніякої потреби в інфраструктурі чи якщо є потреба перепроектувати попередню інфраструктуру, щоб дозволити функціонування алгоритму локалізації (наприклад, ручне розміщення якірних вузлів) [34];

- відносне або абсолютне розташування. Обчислені позиції можуть бути пов'язані з глобальними координатами (наприклад, широта, довгота), або пов'язані з вузлом або пунктом мережі [36];

внутрішні або зовнішні локалізація. Якщо система більше пристосована для закритого приміщення або для відкритої повітрі місцевості;

One Hop або Multi Hop. Якщо всі невідомі вузли мають прямий зв'язок з опорними вузлами або потрібно необхідно здійснити декілька переходів по мережі [30].

Для оцінки продуктивності використовують наступні визначення:

- вартість зв'язку. Визначає складність алгоритму з точки зору обміну пакетами. Він також визначає вартість локалізації системи в сенсорної мережі;

- кількість визначених вузлів. Визначає відсоток мережевих вузлів, які змогли обчислити свої позиції в кінці локалізації алгоритму. В ідеалі, щоб всі вузли повинні бути в змозі розрахувати свої позиції, але в багатьох випадках не можливе;

- кількість якірних вузлів. Визначає кількість якірних вузлів для роботи алгоритму локалізації. Якірні вузли, як правило, дорожчі, ніж звичайні вузли, і їх використання повинно бути зведене до мінімуму.

Деякі мережеві характеристики можуть торкнутися продуктивності алгоритму локалізації. Важливо зробити експерименти для кожної запропонованої

системи локалізації, щоб оцінити їх поведінку, змінюючи характеристики, які включають:

- щільність мережі. У щільних мережах, невеликі відстані між вузлами, що призводить до зниження помилок в оцінці відстані, а також в помилках локалізації системи. Крім того, великим числом сусідів призводить до додаткової інформації, яка може бути використана невідомими вузлом щоб краще обчислити його положення;

- масштаб мережі. Збільшення кількості вузлів (зберігання і щільність мережі, що збільшує площу) призводить до підвищення кількості хопів. Як правило, великим числом хопів призводить до більш неточних розрахунків розташуванням, підвищення середньої помилки локалізації системи;

- кількість якірних вузлів. Розгортаючи більш високе число якірних вузлів маяка в мережі, помилка системи локалізації має тенденцію зменшуватися, і число опорних вузлів має тенденцію збільшуватися;

- точність GPS. GPS не дає ідеальної локалізації, особливо в сенсорних мережах. Оскільки більша частина якірних вузлів використовують GPS, щоб отримати свої координати, точність GPS вплине на остаточне положення про помилки локалізації системи, які залежать від цієї послуги.

Ознайомившись з головними визначеннями. В наступних розділах будуть розглянуті такі алгоритми локалізації: Ad Hoc Positioning System (APS), Recursive Position Estimation (RPE), Directed Position Estimation (DPE), Localization with a Mobile Beacon (LMB).

#### 2.4.1 Система позиціонування в Ad Hoc

В алгоритм локалізації Ad Hoc Positioning System (APS), кожен вузол оцінює свою відстань до опорних вузлів в хопах. Як тільки ці відстані оцінені, вузли можуть обчислити свої позиції, використовуючи трилатерацію. Розглянемо два методи: DV-Hop, DV-Distance [33].

У методі DV-Hop якірні вузли в радіусі своєї дії передають серії повідомлень (рисунок 2.11,а). Працюючи як розширення векторного алгоритму

відстані, усі вузли отримують інформацію про розташування усіх якорних вузлів так само як кількість хопів до цих якорів. Коли якорний вузол отримує інформацію позиції від інших якорних вузлів, у нього є достатньо інформації, щоб вчислити середній розмір одного хопу, заснованого на його власній позиції, на позиції інших якорних вузлів, і також на кількості хопів серед них (рисунок 2.11,б).

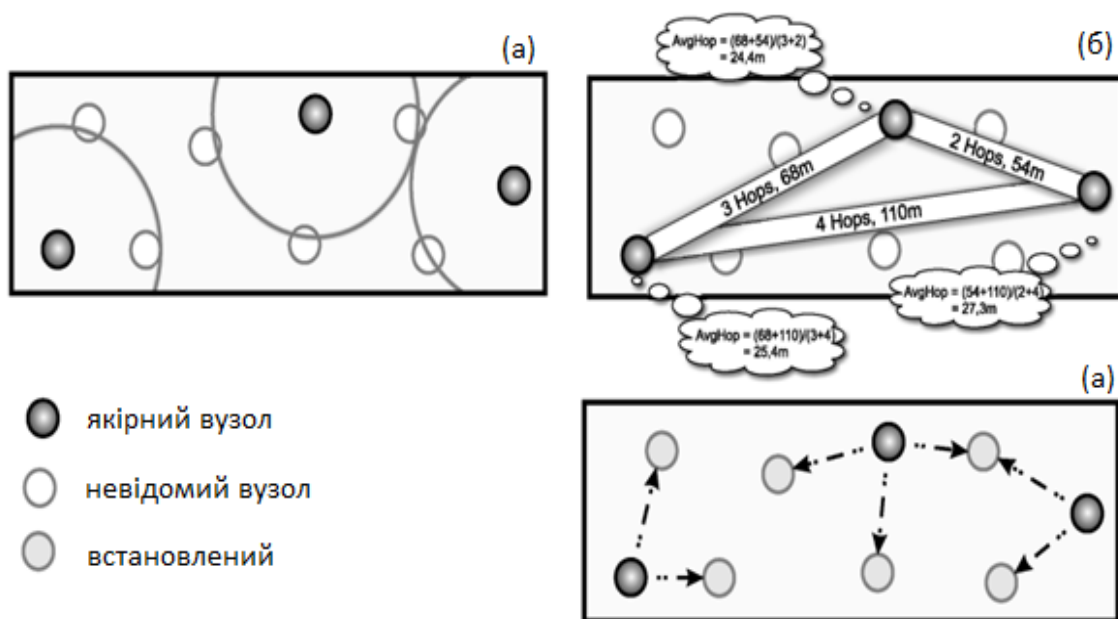


Рисунок 2.11 – Метод DV-Нор

Коли невідомий вузол отримує виправлення, він у змозі перетворити його відстань до якорного вузла від кількості хопів у метри (рисунок 2.11,в). Отже, алгоритм локалізації DV можна представити сукупністю наступних кроків [36]:

1:  $positionns_i = \emptyset$ ; {встановлення якорних вузлів}

2:  $correction_i = -1$ ;

3:  $msg_i = nil$ .

4: **if**  $n_i \in B$  **then** {якщо це якорний вузол}

5:  $(x_i, y_i) := getGpsPositions()$ ;

6: *Send beaconPos*( $i, x_i, y_i, 0$ ) to all  $n_j \in N_i$ .

7: **end if**

8:  $msg_i = beaconPos(k, x_k, y_k, h_k)$ .

9: **if**  $k \notin R_i$  **then** {якщо цей вузол не отримав пакет}

10:  $R_i := R_i \cup \{k\}$ ;

11:  $positions_i := positions_i \cup \{(x_k, y_k, h_k)\}$ ;

12: **if**  $n_i \in B$  **then** {якщо це якорний вузол, чекати більше пакетів}

13: *StartwaitTimer*.

14: **end if**

15: *send beaconPos*( $k, x_k, y_k, h_k + 1$ ) to all  $n_j \in N_i$ .

16: **end if**

17: *waitTimer timeout* {тільки для якорних вузлів}

18:  $correction_i = \frac{\sum \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sum h_j}, (x_j, y_j, h_j) \in positions_i$ ;

19: *sendcorrection\_i* to all  $n_j \in N_i$ .

20:  $msg_i = correction_k$

21: **if**  $n_i \in U$  **then** {якщо це невідомий вузол}

22:  $correction_i := correction_k$ ;

23:  $h_j := h_j * correction_i$  to all  $(x_j, y_j, h_j) \in positions_i$ ;

24:  $(x_i, y_i) := positionComputation(positions_i)$ ;

25: *send correction\_i* to all  $n_j \in N_i$ .

26: **end if**

Складність обміну повідомлення цим алгоритмом управляється загальною кількістю якорів і невідомих вузлів, яка вираховується як  $O(n * (m + 1))$ , де  $n$  – кількість вузлів, і  $m$  – кількість якорних вузлів.

Метод DV-Distance працює так само як DV-Нор. Але, замість того, щоб поширювати кількість хопів, він поширює передбачувані відстані (наприклад, використовуючи RSSI) і кожен вузол, перш, ніж відправити інформацію позиції якорних вузлів, додає свою передбачувану відстань до того, що містилося в пакеті. В цьому випадку, немає ніякої потреби в коефіцієнті виправлення, тому що відстані до якорних вузлів вже знаходяться в метрах.

Перевага специфікації система позиціонування Ad Hoc, полягає в тому, що її алгоритм локалізації вимагає невеликої кількості якірних вузлів, щоб працювати. Проте, спосіб, яким відстані передаються, так само як шлях відстані, - перетворений з хопів до метрів в DV-Hop, результати в помилковому обчисленні позиції, збільшують кінцеву помилку локалізації системи.

#### 2.4.2 Рекурсивна оцінка позицій

В алгоритмі рекурсивної оцінки позиції (від англ. Recursive Position Estimation, далі RPE), вузли обчислюють своє положення за допомогою якірних вузлів. Обчисливши своє розташування невідомий вузол стає опорним. Кількість опорних вузлів ітераційно збільшується.

Алгоритм RPE може бути розділений на чотири рівні як зображено на рисунку 2.12 [39]. У першому рівні вузол визначає свої якірні вузли. На другому рівні вузол оцінює свою відстань до опорних вузлів, наприклад, RSSI. В третьому рівні вузол обчислює своє положення, використовуючи трилатерацію. На останньому рівні вузол стає опорним вузлом, передаючи своє місце положення своїм сусідам.

Коли невідомий вузол стає опорним, він може допомогти іншим вузлам також обчислювати свої позиції. На рисунку 2.12,а вузол 14 має тільки два якірні (вузли 9 і 13), які не можуть допомогти вузлу обчислювати свою позицію. Як бачимо, восьмий вузол також не знає свого розташування, але може його обчислити (рисунок 2.12,б), обчисливши свою позицію стає третьою опорною точкою (рисунок 2.12,в) для вузла 14, який може обчислити позицію потрібного вузла (рисунок 2.12,г).

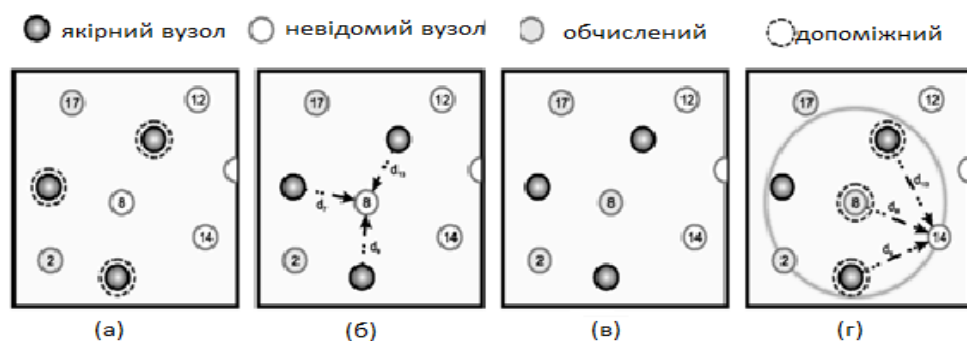


Рисунок 2.12 - Чотири рівні алгоритму RPE

На основі розглянутих чотирьох рівнів алгоритм локалізації можна записати таким чином:

```

1:  $positionns_i = \emptyset$ ;
2:  $references_i = \emptyset$ ;
3:  $msg_i = nil$ .
4: if  $n_i \in B$  then {якщо це якірний вузол}
    5:  $(x_i, y_i) := getGpsPositions()$ ;
    6:  $Send\ beaconPos(x_i, y_i, 0)$  to all  $n_j \in N_i$ .
7: end if
8:  $msg_i = position(x_k, y_k, r_k)$  such that  $dist_k = distanceEstimation$ .
9: if  $n_i \notin U$  then {якщо цей вузол не отримав пакет}
    10:  $positions_i := positions_i \cup \{(x_k, y_k, r_k, dist_k)\}$ ;
    11:  $StartwaitTimer$ .
12: end if
13:  $waitTimer\ timeout$ 
14: if  $size(positions_i) \geq 3$  then {якщо є достатньо позицій}
    15:  $references_i := chooseThreeBestPositions(positions_i)$ 
    16:  $(x_i, y_i, r_i) := positionComputation(references_i)$ ;
    17:  $send\ positions_i(x_i, y_i, r_i)$  to all  $n_j \in N_i$ .
18: end if

```

Перевага цього алгоритму полягає в тому, що число опорних вузлів швидко збільшується, у такий спосіб, яким більшість вузлів можуть вичислити їх позицію. Але у цьому методі є недолік розмноження похибки локалізації. Це означає, що низька неточна оцінка позиції вузла може використовуватися іншими вузлами, щоб обчислити їх розташування, збільшуючи цю похибку. Прикладом цієї проблеми - те, що вузол 14 в рисунку 2.12 отримає помилку локалізації, більшу

ніж вузол під номером вісім. Крім того, у вузла мають бути принаймні три опорні вузли, щоб обчислити його позицію.

### 2.4.3 Локалізація з мобільним вузлом

Мобільний вузол це – вузол, який знає про свою позицію (наприклад, обладнаний Gps навігатором), у якого є здатність рухатися серед вузлів. Цим вузлом може бути людина, безпілотний транспортний засіб, літак, або робот. Алгоритм локалізації з використанням мобільного вузла, дозволяє вузлам обчислювати свою позицію. Системна операція дуже проста, як тільки вузли розгорнуті, мобільний вузол рухається через поле вузлів і передає ширококомвні повідомлення, які містять його поточні координати. Коли нерухомий вузол отримує більше ніж три повідомлення від мобільного вузла, він обчислює свою позицію, використовуючи імовірнісний підхід, заснований на отриманих координатах і на оцінках відстані RSSI. На рисунку 2.13 показано даний приклад і зображено три можливі траєкторії для мобільного вузла [37].

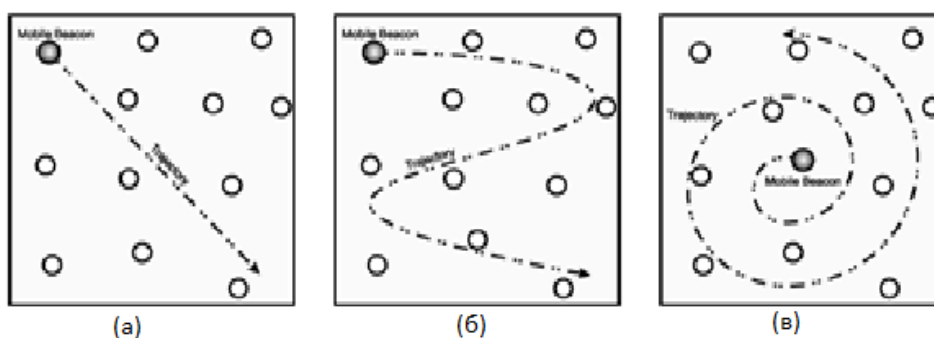


Рисунок 2.13 – Системна операція мобільного вузла і можливі траєкторії для локалізації: а) прямолінійна траєкторія; б) менш прямолінійна траєкторія; в) траєкторія в формі спіралі

Алгоритм локалізації з використанням мобільного вузла можна записати таким чином:

- 1:  $positionns_i = \emptyset$ ;
- 2:  $msg_i = nil$ .
- 3: **if**  $n_i \in U$  **then** {якщо це якірний вузол};
- 4: StartWalking();

- 5: start posTimer.
- 6: **end if**
- 7: posTimer timeout.
- 8:  $(x_i, y_i) := \text{getGpsPosition}()$ ;
- 9: Send  $\text{position}(x_i, y_i)$  to all  $n_j \in N_i$ .
- 10: Restart posTimer.
- 11:  $\text{msg}_i = \text{position}(x_k, y_k)$  such that  $\text{dist}_k = \text{distanceEstimation}(\text{msg}_i)$ ;
- 12:  $\text{positions}_i := \text{positions}_i \cup \{(x_k, y_k, \text{dist}_k)\}$ ;
- 13: **if**  $\text{size}(\text{positions}_i) \geq 3$  **then** {якщо є достатньо позицій};
  - 14:  $(x_i, y_i) := \text{positionComputation}(\text{references}_i)$ ;
- 15: **end if**

Перевага цього алгоритму полягає в тому, що обчислення позиції засновані на тому ж самому вузлі (мобільному вузлі), із збереженням низької помилки локалізації і запобіганню поширенню цієї помилки. Крім того, алгоритм LMB уникає використання вузлів, обладнаних універсальною системою, за винятком мобільного вузла. З іншого боку, вузол може оцінити тільки свою позицію, коли мобільний вузол проходить біля цього вузла, що може зайняти певний час залежно від коефіцієнтів як розміру вузла, особливості руху, і траєкторії вузла.

Важливим аспектом, який безпосередньо впливає на оцінку розташування, є траєкторія мобільного вузла. Чим менш прямолінійний траєкторія, тим краща оцінка. Тому, що чим нижче колінеарність серед вузлів, тим нижча помилка. Таким чином, прямолінійних траєкторій, таких як зображено на рисунку 2.13,а треба уникнути [40].

## Висновки до розділу

Проведено порівняльний аналіз методів та алгоритмів локалізації з використанням наступних компонентів систем локалізації: оцінка відстані/кута, обчислення позиції та алгоритм локалізації.



Вибір методу оцінки відстані між вузлами в системі локалізації є важливим коефіцієнтом, який впливає на продуктивність системи. Зазвичай, щоб оцінити точне розташування вузла потрібно використовувати принаймні три оцінки відстані. Але з іншої сторони, якби тільки точність таких методів була важлива, то ми могли б тільки використовувати TDoA, у якому є найнижчі помилки. Але коефіцієнти, такі як розмір і вартість (в термінах апаратних засобів, процесора, і енергії) вузлів мають також бути враховані. Таким чином, вибраний метод мав звичай оцінювати, що відстані залежатимуть від прикладних вимог і також від доступних ресурсів. У таблиці 2.1 порівнюється кожний метод який ми розглянули [33-36].

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика методів визначення координат

Метод	Точність	Максимальна відстань	Додаткове обладнання	Недоліки
RSSI	2 – 4м	необмежена	–	зміна RSSI, перешкоди
ToA	2 – 3см	необмежена	–	синхронізація
TDoA	2 – 3см	декілька метрів	ультразвуковий передавач	обмежена відстань роботи
AoA	5°	необмежена	комплект приймачів	габаритність
Дальність зв'язку	половина дальності зв.	необмежена	–	–

Також не мало важливо є вибір методу обчислення позиції. Тому що обраний може також впливати на кінцеву продуктивність системи локалізації. Залежно від використовуваного алгоритму локалізації ця помилка в обчисленні позиції може завдати шкоди у великій або незначній мірі системі локалізації в цілому. У деяких алгоритмах, наприклад, вузли які були невідомими обчисливши свою позицію розташування використовуються, щоб допомогти іншим невідомим вузлам обчислювати свої позиції. В цьому випадку, маленька помилка в обчисленні позиції може привести до системи локалізації з високими помилками.

Інформація розташування і відстаней, зібраних вузлом і доступними ресурсами процесора також, обмежує вибір який метод використовувати. У таблиці 2.2 наведені основні характеристики для обчислення позиції [34-38].

Таблиця 2.2 Основні характеристики методів обчислення позицій

Метод	Мінім к-ть даних	Відстань	Кут	Недоліки
Трилатерація	3	так	ні	сприйнятливий до неточних відстаней
Мультилатерація	$n \geq 3$	так	ні	обчислювальна складність
Триангуляція	3	ні	так	необхідність додаткового обладнання
Імовірнісний	$n \geq 3$	так	ні	обчислювальна складність
Bounding Box	$n \geq 2$	так	ні	похибка
Централізований	$n \geq 1$	ні	ні	велика похибка

Алгоритм локалізації - основний компонент системи локалізації. Цей компонент визначає, яким чином інформація, дана від якірних вузлів, за оцінками відстаней, і по обчисленнях позиції, буде управлятися, щоб дозволити інформації про локалізацію розповсюджуватися від якірних вузлів до вузлів мережі.

Вибір якого алгоритму який використовуватиметься залежить від доступних ресурсів, від сценарію, на вимогах додатка, і також на помилці локалізації, прийнятої вузлами. В таблиці 2.3 наведені основні характеристики кожного з цих алгоритмів [36-39].

Таблиці 2.3 - Порівняльна характеристика алгоритмів локалізації

Алгоритм локалізації	К-ть якірних вузлів	Позиція обчислення	Інфра-структура?	Позиціонування	Multihop
APS	$\geq 3$	розподілена	ні	абсолютне	так
RPE	5% вузлів	розподілена	ні	абсолютне	так
LMB	1 мобільний	розподілена	ні	абсолютне	ні

Отже, в цьому розділі ми розглянули основні компоненти системи локалізації, та проаналізували їхні переваги та недоліки.

## 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ В СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

### 3.1 Дослідження RSSI сигналу в залежності від відстані

Розглянувши декілька методів визначення координат найпростішим є метод основі вимірювання потужності прийнятого сигналу – метод RSSI. Так званий пристрій який вимірює потужність сигналу.

Якість сигналу як при прийомі, так і при передачі в дуже великій мірі залежить від антени. Антена — радіотехнічний пристрій для приймання і передавання електромагнітних хвиль.

Передавальна антена перетворює електричний струм радіочастотного діапазону на електромагнітні хвилі відповідної частоти. Відповідно приймальна антена перетворює електромагнітні хвилі на струм відповідної форми. Приймальна антена від передавальної відрізняється лише застосуванням.

Дія антени основана на дипольному випромінюванні. Сигнал, який передається на антену від високочастотного генератора, створює в ній коливання густини заряду, що призводить до випромінювання електромагнітних хвиль. Відповідним чином при прийманні сигналу електромагнітні хвилі наводять в антені струми, які потім підсилюються і демодулюються приймачами [41].

Існує три основних категорії антен бездротових сенсорних мереж: неспрямовані, напівспрямовані і сильно спрямовані:

- неспрямовані — антени створено для поширення сигналу у всіх напрямках. Хоча, згідно до законів фізики, ідеальне поширення антеною сигналу у всіх напрямках з однаковою потужністю неможливе, при створенні антен цього типу намагаються досягти якомога рівномірнішого поширення сигналу. Цей тип антен є найпоширенішим у сенсорних вузлах, клієнтських адаптерах та точках доступу, оскільки за умов неспрямованого поширення досягається найкраще рівномірне покриття у сферичній області навколо антени (рисунок 3.1);

– напівспрямовані — антени розроблено для спрямованого покриття сигналом великих площ (рисунок 3.2);



Рисунок 3.1 – Неспрямовані антени



Рисунок 3.2 – Напівспрямована антена

– сильно спрямовані — антени використовують для встановлення зв'язку типу «точка-точка», наприклад, між двома будинками. Такі антени поширюють дуже вузький сигнал-промінь на велику відстань. Їх часто використовують для створення спеціальних каналів зв'язку (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Сильно спрямована антена

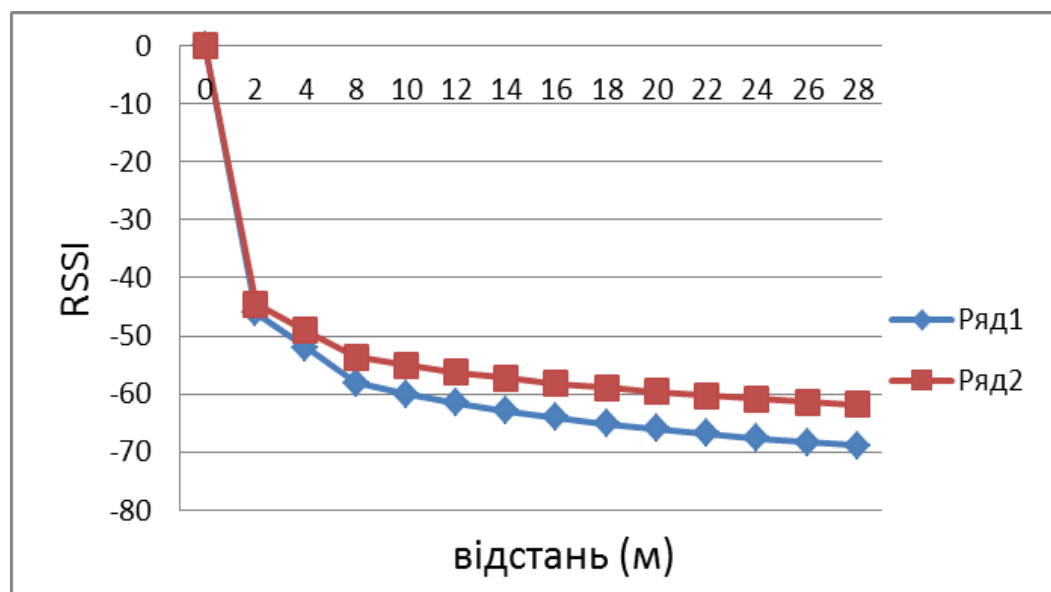
З найбільш фундаментальних рівнянь в теорії антен, для розрахунку потужності сигналу застосовують рівняння Фрісса (2.1). Не мало важливим є те, що сигнал посиляється з певною силою, яка зменшена, оскільки цей сигнал розмножений. Чим більше відстань до вузла одержувача, тим нижче потужність сигналу, у вузлі отримувачі.

Величина RSSI вимірюється в dBm, формула (2.1) набуде такого вигляду:

$$RSSI = -(10 n \log_{10}(d) - A), \quad (3.1)$$

де  $n$  - константа (для відкритого простору  $n < 2$ );  $d$  – відстань, м;  $A$  - потужність сигналу, dBm.

Теоретичні дослідження значення RSSI для модулів JN5148 фірми Jennic для закритого (Ряд1) та відкритого (Ряд2) простору представленні на рисунку 3.4. Як видно з рисунку 3.4 потужність прийнятого сигналу обернено пропорційна квадрату відстані між передавальною і приймальною антенами. Отже, якщо відстань між передавачем і приймачем збільшується, потужність сигналу, що приймається, зменшується [42].



### Рисунок 3.4 – RSSI значення вузла JN5148, в теорії

Як зображено на рисунку 3.4 значення RSSI є рівномірно затухаючим, та варто зазначити, що при побудові алгоритмів локального позиціонування доцільно враховувати дані стаціонарних коливань значення сили сигналу, на рисунку 3.5 побудовано графік із реальними даними з вузла (Ряд 2) [42].

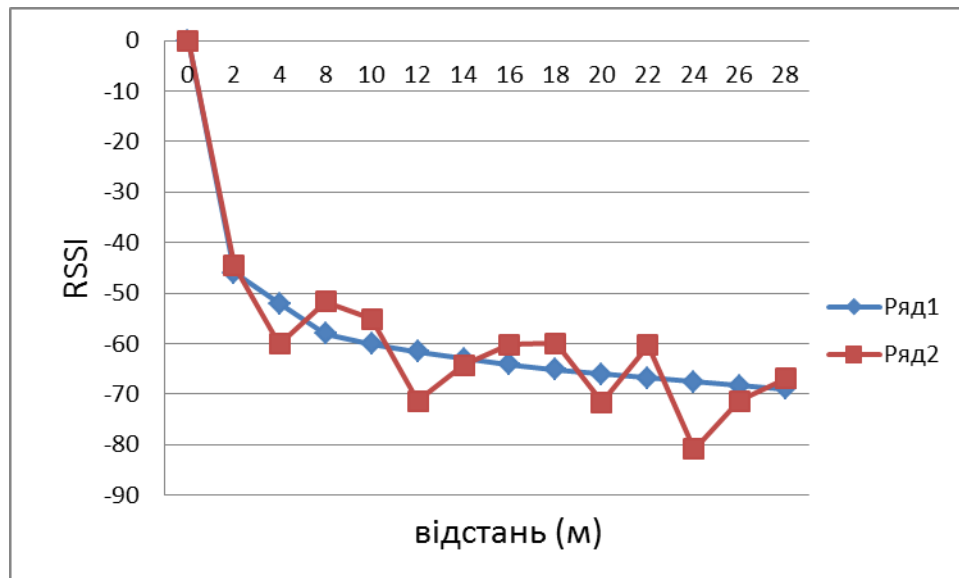


Рисунок 3.5– Порівняння реальних та теоретичних значень RSSI

Одержані дані RSSI при нерухомому приймачі та передавачі, як видно з рисунка 3.5, не є постійні, а варіюються в межах інтервалу 10дБм. Якщо звернутися до опису передавачів, то, виявляється, що дані коливання співвідносяться з помилкою виробника. Але все ж не варто всі ці коливання списувати на виробників. Так як система не була ізольована від зовнішніх перешкод, і змін при багатопроменовому проході сигналу то зміни відбуваються за рахунок пересування дослідників і деяких коливань самих датчиків.

### 3.2 Алгоритм на основі вимірювання потужності сигналу

Визначення локалізації системи серед вузлів є одним з необхідних передумов, для того, щоб зробити функціональну БСМ. Проблема локалізації

полягає у визначенні фізичного місця розташування об'єкта, який визначається. Таке завдання є дуже важливим і актуальним, що стосуються таких областей, як робототехніка, однорангових мереж, бездротових сенсорних мереж, стільникового зв'язку, військової, авіаційної та астрономії.

Локалізації в сенсорних мережах можна досягнути, використовуючи знання про поведінку сигналу та отримання характеристик між двома вузлами датчика. Якість сигналу, тобто його потужність при прийомі, виражається RSSI: чим вище значення RSSI, тим краще прийом сигналу. Головною перевагою використання методів локалізації на основі радіо, що не потрібно ніяких додаткових апаратних засобів для вузлів. Основним недоліком методу є те, що виміряні значення сигналу, як правило, нестійкі і змінюються в часі, що призводить до локалізації помилок.

Алгоритм локалізації на основі вимірювання потужності складається з двох етапів.

1. Детермінований етап. На цьому етапі відбувається калібрування RSSI значень кожного з якірних вузлів, для знаходження невідомих вузлів. Моделі поширення радіохвиль володіють різними втратами, пов'язані з різними середовищами передачі і напрямками. Значення RSSI збираються на різних визначених відстанях від якірних вузлів, тоді використовується калібрування значень, щоб визначити постійне розповсюдження для кожного з якірних вузлів.

Різні середовища (вільний простір, стіна і т.д.) оточення якірних вузлів приводять до різного ослаблення сигналу. Тому, якщо тільки єдине постійне поширення використовується для якірного вузла, відбувається вирахування відстані. Каліброване постійне значення з врахуванням перешкод обчислюється наступним чином:

$$n_i = \left[ \frac{RSSI_i - A}{10 \log_{10} d_i} \right], \quad (3.2)$$

де  $n$  - константа (для відкритого простору  $n < 2$ );  $d$  - відстань, м;  $A$  - потужність сигналу, dBm.

Значення сили сигналу  $A$  отримане при однометровому вимірюванні відстані без перешкоди з якірним вузлом.

2. Імовірнісний етап. Цей етап включає в себе оцінювання відстані і положення за допомогою постійного розповсюдження яке знаходиться у попередньому етапі.

*Оцінка відстані:* Цей метод заснований на факті, що вузол не рухається, швидше є кореляція між справжніми положеннями і попередніми розташуванням.

Оскільки сила отриманого сигналу змінюється динамічно, навіть якщо невідомий вузол не переміщається, важливо застосувати низький алгоритм згладжування складності, щоб мінімізувати динамічне коливання радіо – сигналу, отриманого від кожного якоря, коли невідомий вузол переміщається. Однак, для нерухомого вузла, простого вирішення місця розташування вузла при пошуку зазвичай достатньо.

Основне припущення для цього алгоритму згладжування полягає в тому, що постійний швидкісний рух призведе до постійного рівня зміни даних і постійним шумовим процесам.

Оцінка (estimate) і стадії передбачення (predicted) для алгоритму згладжування розраховуються за такими формулами:

$$\begin{aligned}\hat{R}_{est(i)} &= \hat{R}_{pred(i)} + a [R_{prev(i)} - \hat{R}_{pred(i)}], \\ \hat{V}_{est(i)} &= \hat{V}_{pred(i)} + \frac{b}{T_s} [R_{prev(i)} - \hat{R}_{pred(i)}],\end{aligned}\quad (3.3)$$

$$\hat{R}_{pred(i)} = \hat{R}_{est(i)} + \hat{V}_{est(i)} T_s,$$

$$\hat{V}_{pred(i+1)} = \hat{V}_{est(i)},\quad (3.4)$$

де  $\hat{R}_{est(i)}$  – оцінка згладження діапазону;



$\hat{R}_{pred(i)}$  – передбачений діапазон;

$R_{prev(i)}$  – вимірюваний діапазон;

$\hat{V}_{est(i)}$  – згладжена оцінка дальності;

$\hat{V}_{pred(i)}$  – швидкість передбаченого діапазону;

$a, b$  – передані константи;

$T_s$  – відрізок часу  $i$ -го оновлення.

*Оцінка положення:* для оцінки положення невідомого вузла, необхідно принаймні три якірні вузли в мережі, які повинні виявити і виміряти силу сигналу невідомо вузла.

Трилатерації - метод, який використовується, щоб визначити положення об'єкту, заснованого на одночасних вимірюваннях діапазону від трьох якірних вузлів у відомих місцях розташування. Крім методу трилатерації, відомий також метод тріангуляції. Наприклад, якщо ми можемо виміряти відстані від трьох якірних вузлів, тоді у нас буде трикутник, але ми повинні знайти, що середня точка того трикутника отримує початкове положення вузла, якого ми хочемо визначити місцезнаходження. Ми можемо тоді почати одну з відомої оцінки розташування повторюючи методи.

Таким чином за даним алгоритмом ми можемо локалізувати сенсорну мережу та побачити похибку наскільки не точно вузли обчислюють координати своїх сусідів.

### 3.3 Імітаційне моделювання локалізації сенсорних вузлів з використанням MATLAB

Поняття моделі (в широкому значенні) — образ (в тому числі умовний — зображення, опис, схема, креслення, графік, план, мапа) або прообраз (зразок) якогось об'єкту або системи об'єктів, що застосовується за певних умов у якості їх «замінника». Таким чином, модель є вираженням уявлення про оригінал, що

уточнюється в процесі її використання. Чим більше проводяться експериментів з моделлю, тим більші знання про систему.

Імітаційна модель — це різновид математичних моделей, що описують динамічні процеси в реальних системах і піддаються перевірці. Вони можуть бути різних рівнів: глобального, національного, регіонального, локального.

Середовище, в якому побудована імітаційна модель є MATLAB. MATLAB — це назва продукту для числового аналізу а також мова програмування. Створена компанією The MathWorks, це досить потужний засіб для роботи з математичними матрицями, малювання функцій, роботи з алгоритмами, створення робочих оболонок (user interfaces) з програмами в інших мовах програмування. Хоча цей продукт спеціалізується на чисельному обчисленні, спеціальні інструментальні засоби працюють з програмним забезпеченням Maple, що робить його повноцінною системою для роботи з алгеброю.

MATLAB має більше ніж мільйон користувачів на виробництвах і науковців. Ціна базової комерційної версії без інструментів близько 2000 дол. США і лише 100 дол. США для навчальних закладів з мінімальним набором інструментів. MATLAB повинен опрацювати обчислювальні операції швидше ніж такі традиційні мови, як Сі, Сі++ або Фортран.

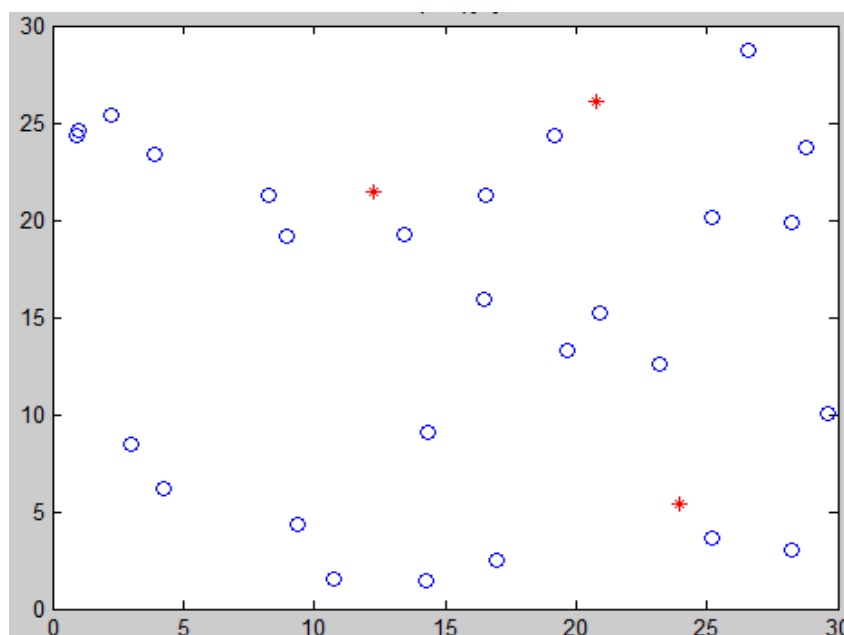
Застосування MATLAB надає користувачеві велику кількість функцій для аналізу даних, які покривають майже всі області математики, зокрема:

- матриці та лінійна алгебра — алгебра матриць, лінійні рівняння, власні значення і вектора, сингулярності, факторизація матриць та інше;
- многочлени та інтерполяція — корені многочленів, операції над многочленами та їх диференціювання, інтерполяція та екстраполяція кривих;
- математична статистика і аналіз даних — статистичні функції, статистична регресія, цифрова фільтрація, швидке перетворення Фур'є та інші;

- обробка даних — набір спеціальних функцій, включаючи побудову графіків, оптимізацію, пошук нулів, чисельне інтегрування та інші;
- диференціальні рівняння – вирішення диференціальних і диференціально-алгебраїчних рівнянь, диференціальних рівнянь із запізнюванням, рівнянь з обмеженнями, рівнянь в часткових похідних та інші;
- розріджені матриці - спеціальний клас даних пакету MATLAB, що використовується у спеціалізованих доданках;
- цілочисельна арифметика - виконання операцій цілочисельної арифметики в середовищі MATLAB.

Отже, при такому великому наборі функцій MATLAB дає можливість змодельовати імітаційну модель безпроводної сенсорної мережі.

Нехай у нас є площина на якій розміщені вузли (рисунок 3.6). Ми знаємо координати кожного вузла в топології, і, звичайно, ми знаємо, матрицю відстаней між кожним вузлом. Однак, як моделювання входу, ми використовуємо тільки частину матриці відстаней і вибір трьох типових вузлів в якості якорів. Метою локалізації є з'ясувати невідомі координати інших вузлів, крім якорів. Після цього ми можемо оцінити помилку, порівнюючи координати кожного вузла та їх вихідними координатами.



### Рисунок 3.6 – Розміщення сенсорних вузлів

Моделювання сенсорної мережі в системі MATLAB складається з наступних кроків:

а) Створення типової топології мережі. Визначається кількість вузлів, відстані, і випадковий шум щодо відстані між кожною сіткою, можна запрограмувати для генерації випадкових структур мережі, що означає, що ми можемо отримати масив вузлів з відомими координатами, а також ми знаємо, повну матрицю відстаней між будь-якими вузлами. Щоб моделювати процес локалізації, замість того, щоб використовувати повну матрицю відстані, ми повинні будемо зменшити пряму можливість з'єднання в повній матриці відстані. Для моделювання процесу локалізації, замість використання повної матриці відстаней, ми будемо змушені скоротити прямі зв'язки в повній матриці відстаней. Наприклад, ми можемо визначити, що, якщо відстані між двома вузлами є більшою ніж поріг, відстань недоступна, і відповідний елемент на відстані, матриці -1.

б) Додавання шуму до матриці відстані. Насправді, там існує помилки на відстані вимірювання між двома вузлами. Ми можемо експериментувати, додаючи зазвичай розподілений шум до матриці відстані.

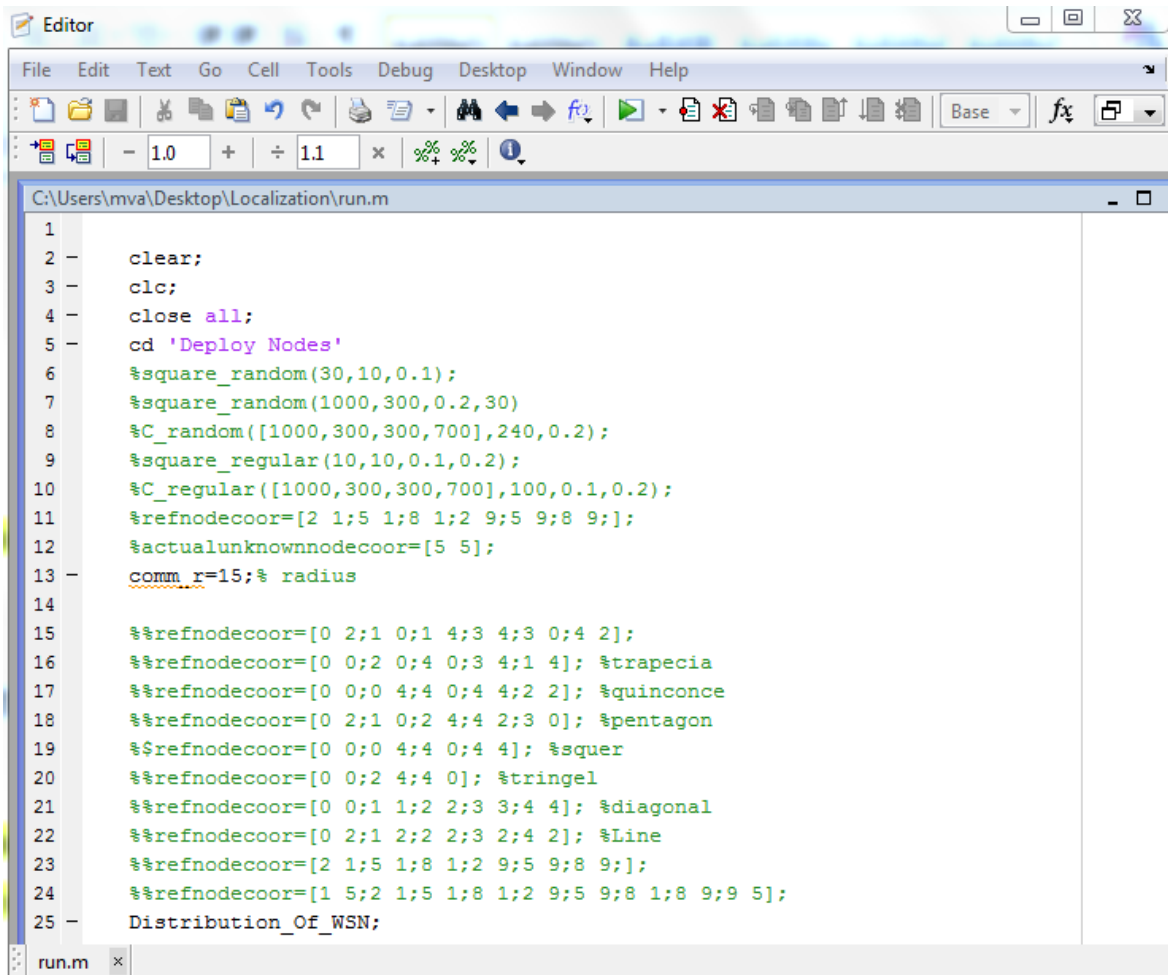
в) Вказати координати розташування для трьох і більше якорів, інші вузли в мережі будуть намагатися обчислити найкоротшу відстань до цих якорів.

г) Визначити відстань від будь-якого вузла до якорів, на основі вимірювання потужності сигналу.

д) Обчислення координат кожного вузла, використовуючи один із методів: трилатерації, муьтилатерації, триангуляції, обмеження квадрату та імовірнісного підходу (які розглянуті у розділі 2.3).

е) Оцінка похибки обчислених координат на основі алгоритму.

Для виконання програми необхідно запустити файл із розширенням *m*, «*run.m*» (додаток В). Даний файл дозволяє налаштувати структуру параметрів моделі для локалізації сенсорної мережі (рисунок 3.7). Основними параметрами для налаштування моделі є:



```
1
2 - clear;
3 - clc;
4 - close all;
5 - cd 'Deploy Nodes'
6   %square_random(30,10,0.1);
7   %square_random(1000,300,0.2,30)
8   %C_random([1000,300,300,700],240,0.2);
9   %square_regular(10,10,0.1,0.2);
10  %C_regular([1000,300,300,700],100,0.1,0.2);
11  %refnodecoor=[2 1;5 1;8 1;2 9;5 9;8 9];
12  %actualunknownnodecoor=[5 5];
13 - comm_r=15;% radius
14
15  %%refnodecoor=[0 2;1 0;1 4;3 4;3 0;4 2];
16  %%refnodecoor=[0 0;2 0;4 0;3 4;1 4]; %trapecia
17  %%refnodecoor=[0 0;0 4;4 0;4 4;2 2]; %quinconce
18  %%refnodecoor=[0 2;1 0;2 4;4 2;3 0]; %pentagon
19  %%refnodecoor=[0 0;0 4;4 0;4 4]; %squar
20  %%refnodecoor=[0 0;2 4;4 0]; %stringel
21  %%refnodecoor=[0 0;1 1;2 2;3 3;4 4]; %diagonal
22  %%refnodecoor=[0 2;1 2;2 2;2 3;2 4 2]; %Line
23  %%refnodecoor=[2 1;5 1;8 1;2 9;5 9;8 9];
24  %%refnodecoor=[1 5;2 1;5 1;8 1;2 9;5 9;8 1;8 9;9 5];
25 - Distribution_Of_WSN;
```

Рисунок 3.7 – Приклад налаштування файла «run.m»

- вибір середовища, прямої видимості (створюється середовище без завод) та відсутності прямої видимості (середовище із заводами, в якості завод вибирається розмір об'єкту через який не поширюється радіо сигнал вузлів);
- розташування вузлів, із заданими координатами (координати вузлів задаються вручну) та випадковим розміщенням (координати вузлів генеруються випадковим чином), приклад розташування вузлів приведено на рисунку 3.8 ;
- встановлення кількості вузлів (задається кількість вузлів для всієї мережі, кількість якірних вузлів встановлюється певним процентом від всієї кількості вузлів, що дає можливість визначити яку кількість якірних вузлів необхідно для локалізації сенсорної мережі із найменшою помилкою);
- вибір радіуса дії вузла.

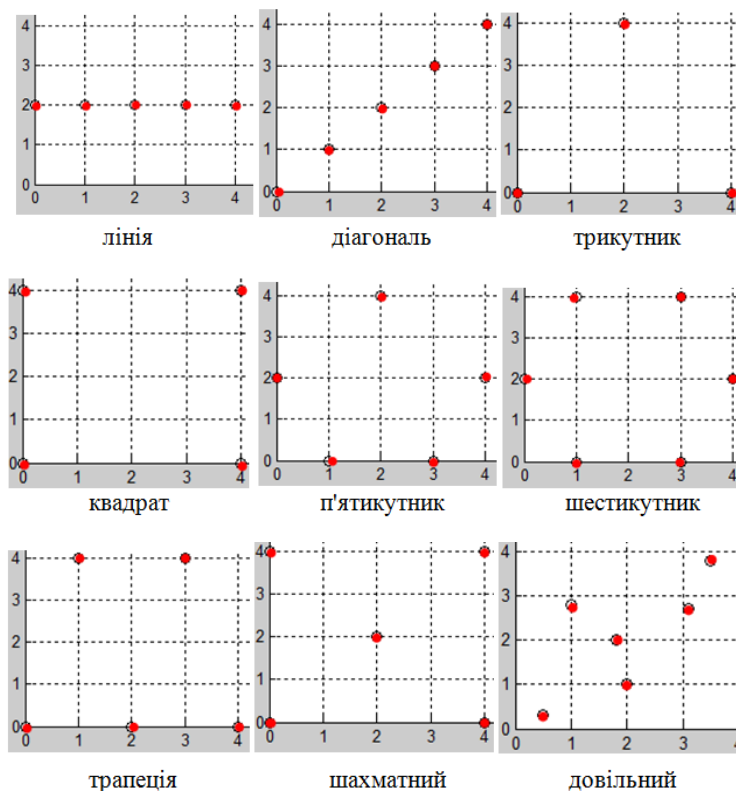


Рисунок 3.8 – Приклад розташування вузлів

Файл «run.m» викликає функцій та процедури, що знаходяться у зовнішніх файлах – бібліотеках. Серед них:

– Topology\_Of\_WSN – в даному файлі виконується ряд певний ряд операцій (додаток Г):

- розташування сенсорів на полі координат;
- визначення координат якірних вузлів;
- обчислення позицій розташування невідомих вузлів;
- генерується локалізація мережі та виводиться на екран.

– calculate\_localization\_error – даний файл виконує операцію обчислення помилки локалізації мережі (додаток Д). Зчитуючи дані про положення вузлів перед локалізацією і після неї та виводить на екран зображення із розташуванням вузлів після локалізації (кружечки) та початкове розташування (початок лінії яка з'єднується з кружечком), зірочками позначено розташування якірних вузлів (рисунок 3.9).

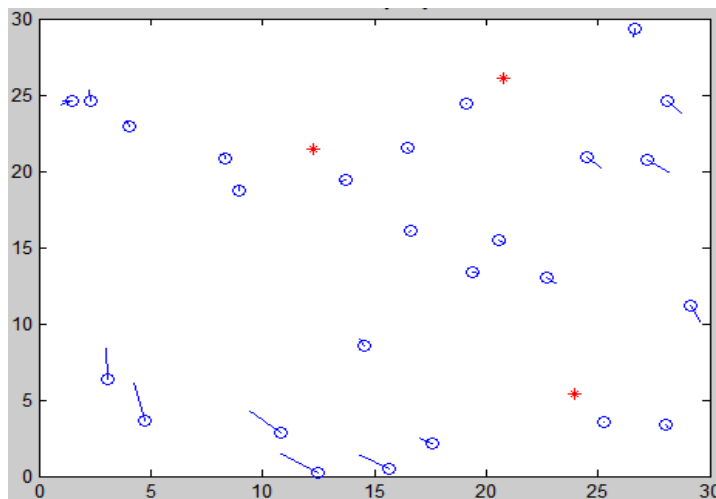


Рисунок 3.9 – Оцінка помилки локалізації сенсорної мережі

Для того щоб оцінити описані підходи до локалізації сенсорної мережі, не обхідно провести багато експериментів в умовах прямої видимості та відсутності прямої видимості. Також необхідно охопити широкий спектр мережевих конфігурацій системи, включаючи розмір мережі (кількість вузлів), число якірних вузлів (розташування), розгортання вузлів якоря, радіо діапазон, похибка вимірювання відстані і часу обчислень.

Виконавши моделювання MATLAB ми зможемо графічно побачити недоліки системи локалізації. У наступному розділі приведені приклади експерименту в умовах прямої видимості та відсутності прямої видимості.

### 3.4 Експеримент в умовах прямої видимості вузлів

Дослідження локалізації вузлів проводилось для середнього значення відхилення при ранжируванні в 1м (20 вимірювань), а також за прогресивною функцією необхідної кількості транзакцій. Для калібрування ранжируючих вимірювань, був розрахований мінімальний період двостороннього проходу по середньому значенню, коли приймачі знаходяться в безпосередній близькості один до одного (0,01 м). Це середнє значення далі було обчислено з кожного

ранжируючого вимірювання перед конвертацією в безпосереднє значення відстані.

Лінійний характер роботи алгоритму в умовах прямої видимості - розповсюдження зображень на рисунку 3.10. Результати підтверджують поліпшення ефективності ранжування за допомогою усереднення множини вибірок до значення помилки в 6,0 м. Точність методу була постійна у всьому діапазоні тестування розповсюдження (в радіусі 250 м.).

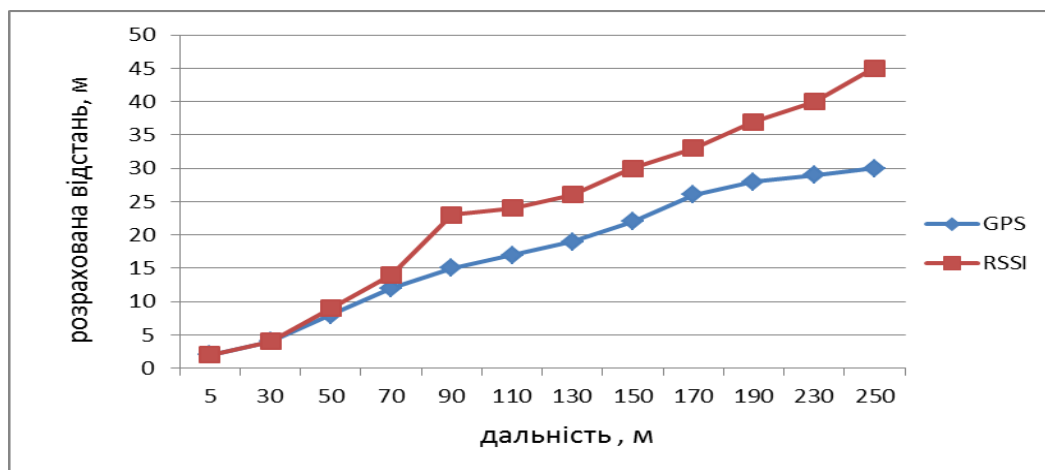


Рисунок 3.10 – Точність локалізації в умовах поширення сигналу в зоні прямої видимості, для RSSI і GPS

Для моделювання вибрано мережу з 200-1000 вузлів, дана мережа генерує значення у випадковій позиції на квадратній площині (250 на 250). Кількість якірних вузлів складає 10% від усіх вузлів. При фіксованому радіусі дальність передачі для всіх пристроїв, в кожній з розглянутих мереж представлено в таблиці 3.1.

Для дослідження встановимо фіксований радіус дальності передачі для всіх пристроїв розглянутих мереж (таблиці 3.1).

Таблиця 3.1 – Передбачуваний діапазон передачі для різних мереж

№	К-ть вузлів	Радіус дії сенсора
1	200	35
2	500	30
3	1000	20



Результати моделювання за даними таблиці 3.1 для мережі які складаються з 200 вузлів зображено на рисунку 3.11.

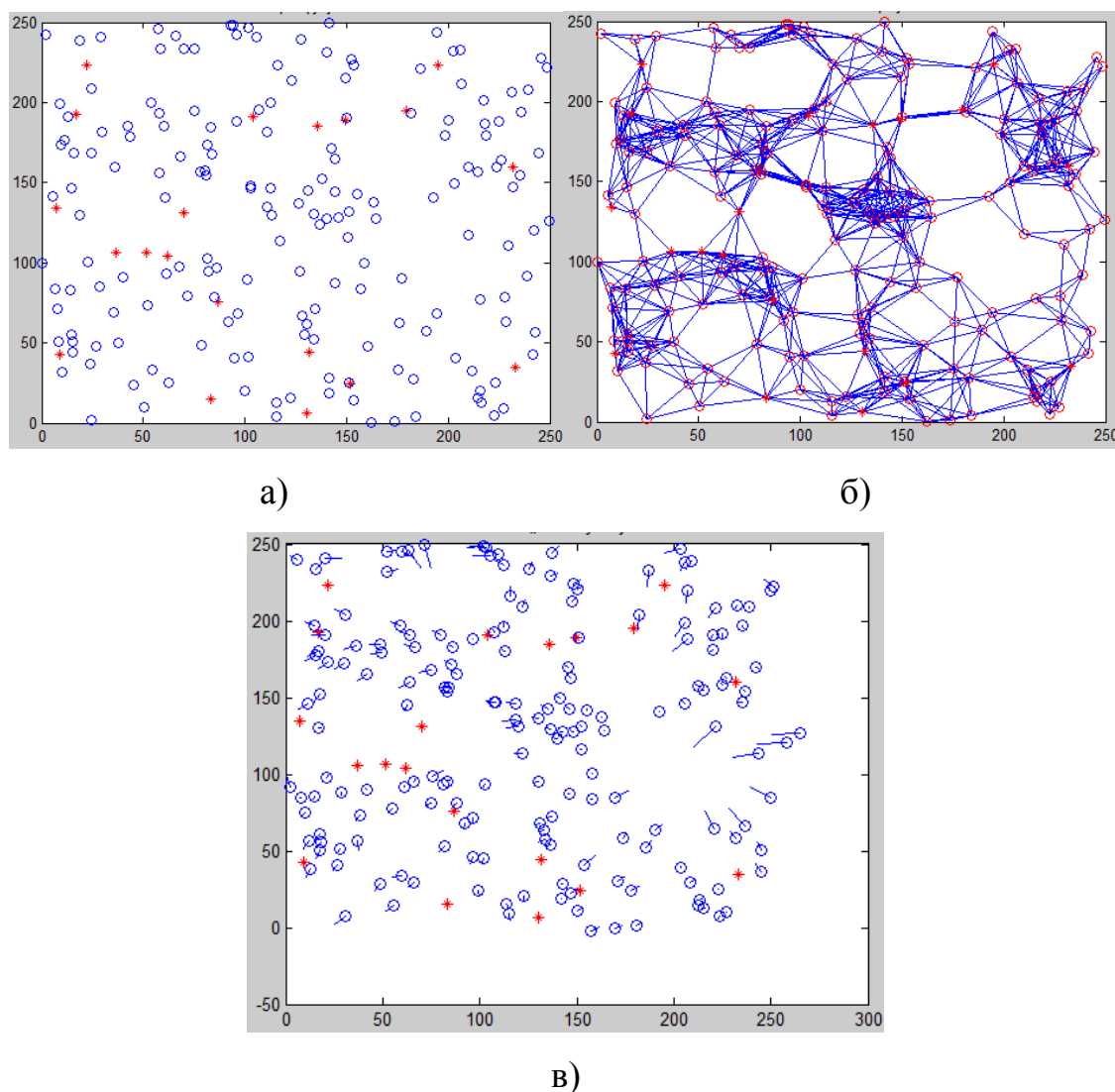


Рисунок 3.11 – Локалізація сенсорної мережі з використанням 200 вузлів: а) розташування вузлів; б) локалізація мережі; в) оцінка похибки

На рисунку 3.11,а зображено розташування вузлів яке генерується випадковим вибором, на рисунку 3.11, б показано, що мережа локалізована та знайдені всі вузли в радіусі своєї дії, якщо звернути увагу на рисунок 3.11,в то побачимо похибку при визначені координат вузлі, кружечками показане місце розташування вузла після локалізації а закінчення лінії реальне розташування вузла, це можна побачити, якщо співставити рисунки 3.11,а та 3.11,в.

Якщо звернути увагу на мережу яка складається з 200 вузлів з точки зору відмовостійкості то її не можна назвати відмовостійкою тому, що при виході з ладу чотирьох вузлів які знаходяться у верхній правій частині рисунку 3.11,б приведуть до від'єднання значного фрагменту мережі, щоб завадити цьому потрібно збільшити радіус дії вузлів або збільшити кількість вузлів, як показано на рисунку 3.12.

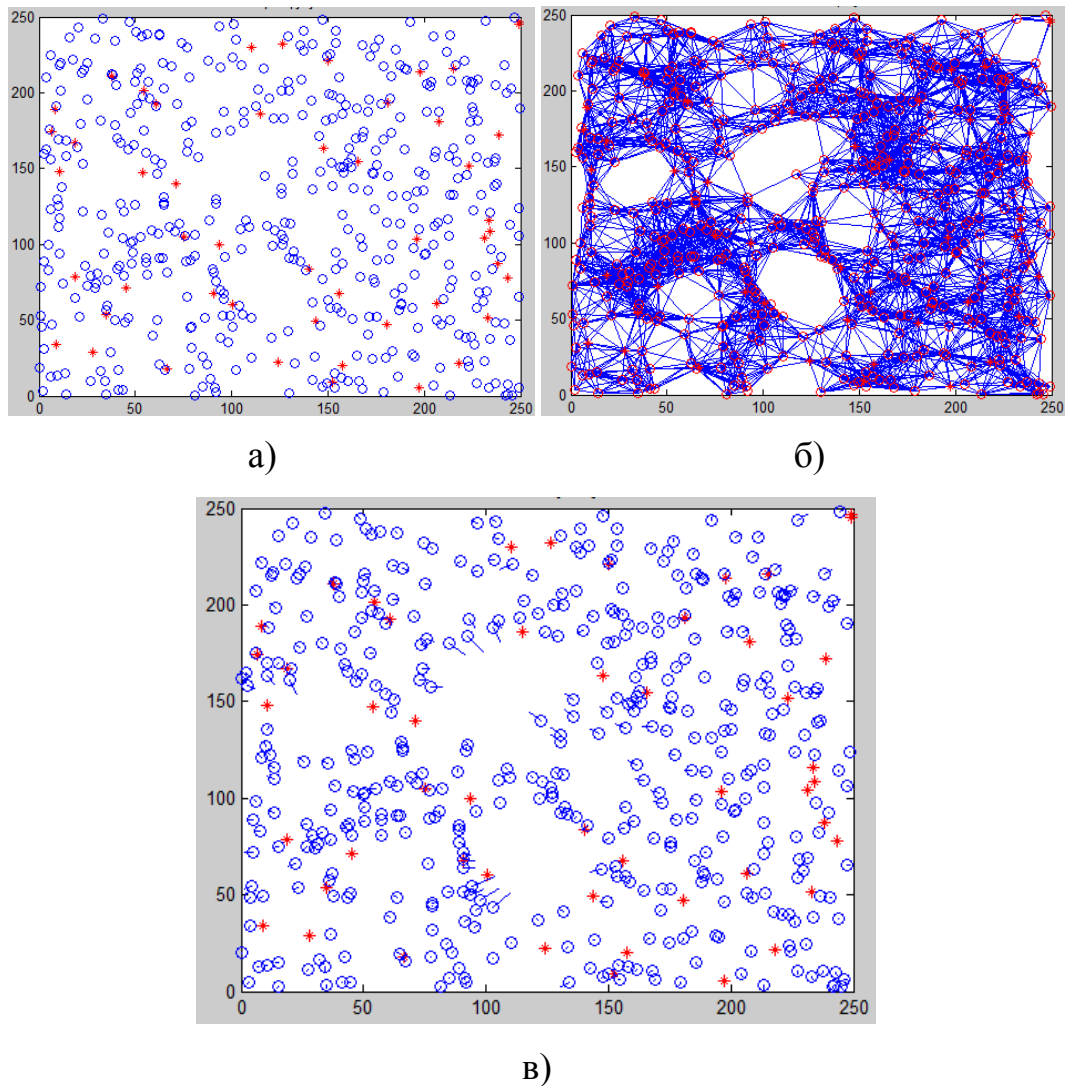
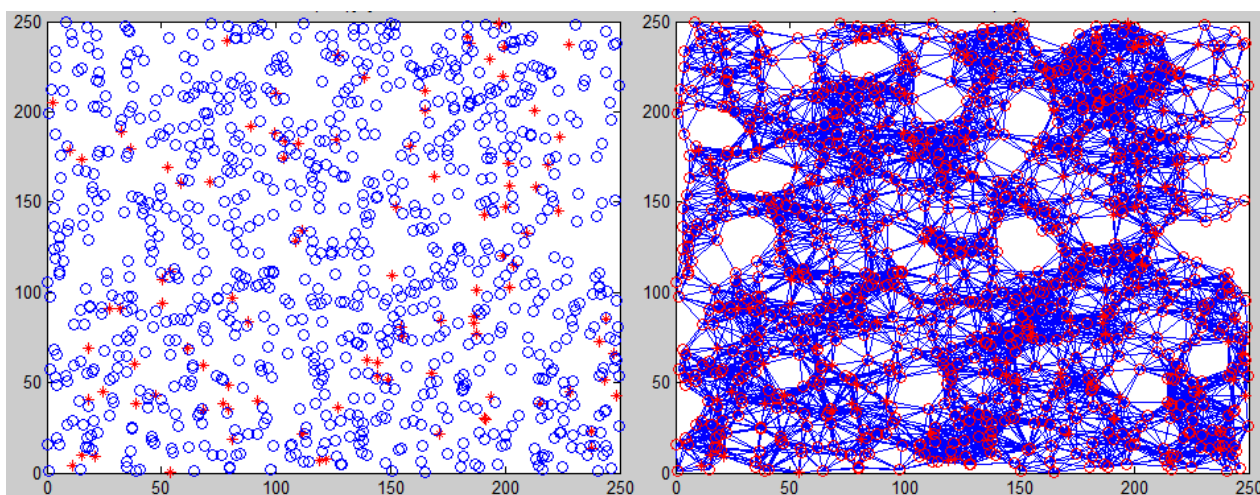


Рисунок 3.12 – Локалізація сенсорної мережі з використанням 500 вузлів:  
а) розташування вузлів; б) локалізація мережі; в) оцінка похибки

На рисунок 3.12 можна побачити, що оцінка похибки розташування вузлів мережі, яка складається із більшої кількості вузлів 500 і меншим радіусом дії

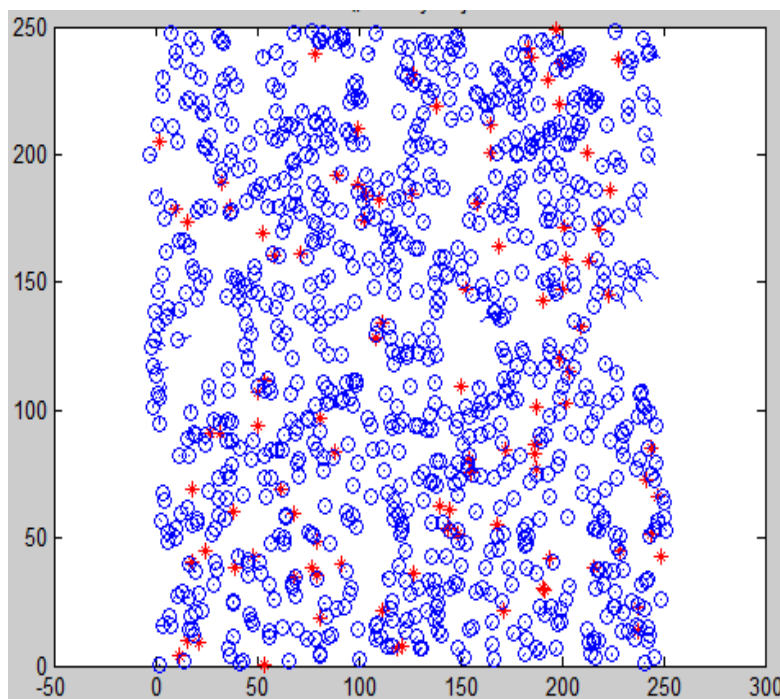
(порівнюючи із мережею – 200 вузлів), значно зменшилась відмовостійкість та підвищилась надійність мережі.

Моделювання мережі, яка складається з 1000 вузлів з радіусом дії 20м (рисунок 3.13) є відмовостійкою а похибка при розрахунку координат невідомих вузлів є мінімальною порівняно з попередніми експериментами.



а)

б)



в)

Рисунок 3.13 – Локалізація сенсорної мережі з використанням 500 вузлів:

а) розташування вузлів; б) локалізація мережі; в) оцінка похибки.

### 3.5 Експеримент в умовах відсутності прямої видимості вузлів

Ефективність алгоритму для середовища, при умові відсутності прямої видимості вузлів (далі, NLOS), радіус розповсюдження в межах 100 м показана на рисунку 3.14. При цьому пристрій було розміщено в різних точках цієї області, як і очікувалося, підтвердилося, що точність алгоритму більше залежить від середовища розповсюдження сигналу. Середнє значення помилки в умовах NLOS розповсюдження становить 13,8 метра, що майже вдвічі перевищує помилку в порівнянні з LOS розповсюдженням.

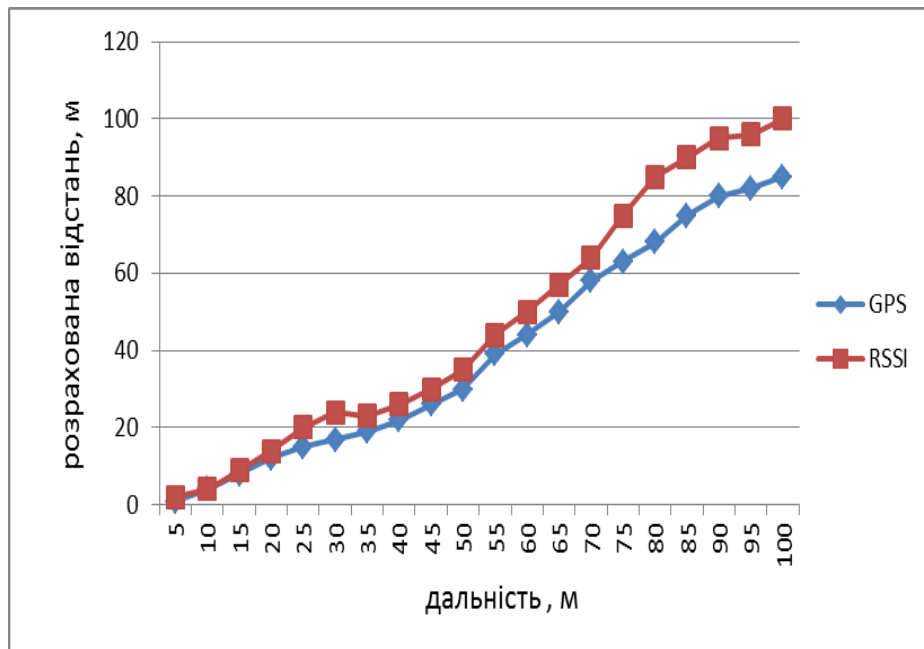
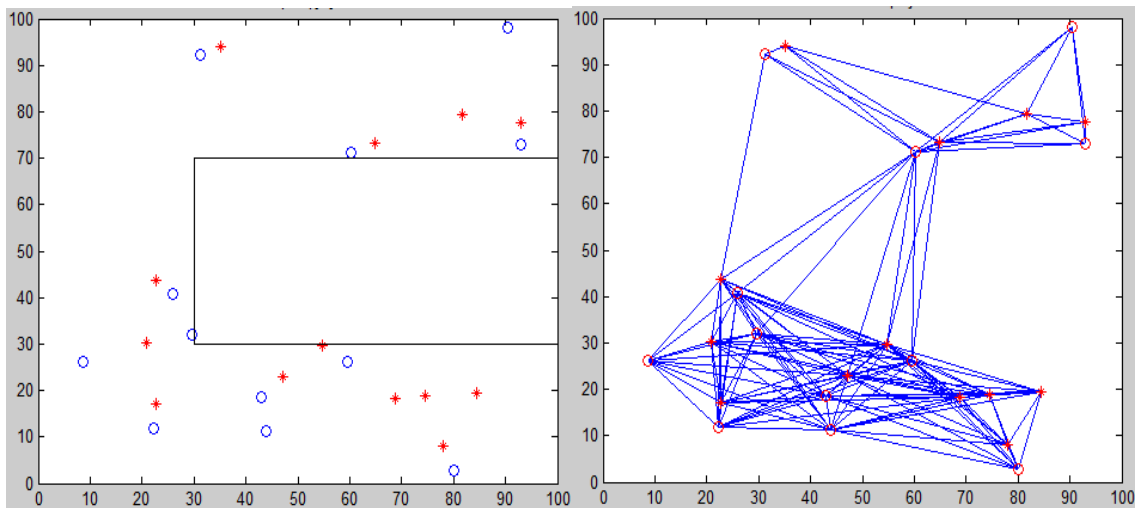


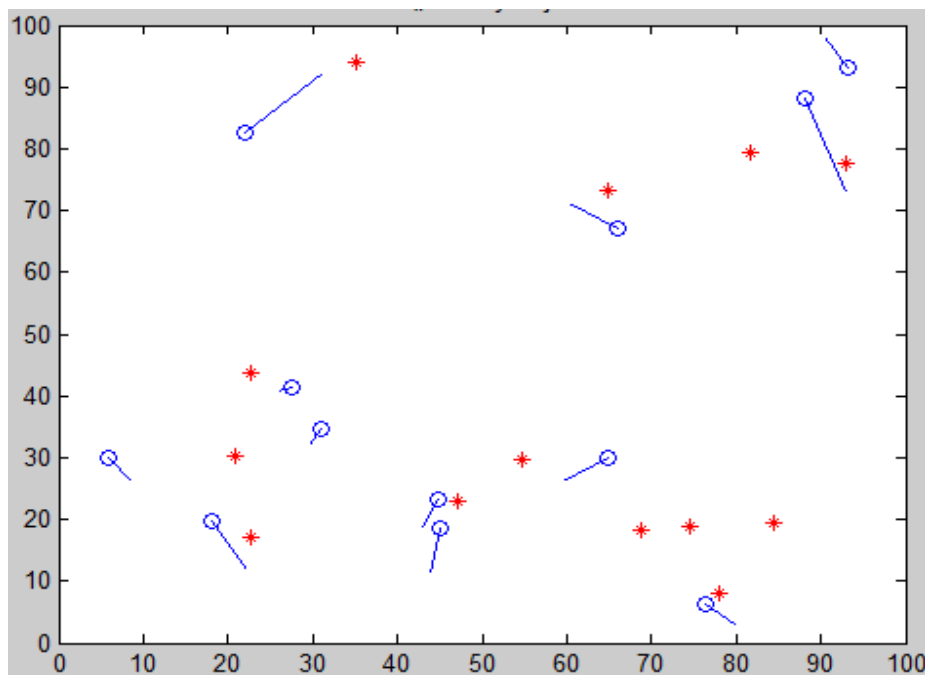
Рисунок 3.14 – Точність локалізації в умовах поширення сигналу в умовах відсутності прямої видимості NLOS, для RSSI і GPS

Для наглядності було змодельовано мережу в умовах відсутності прямої видимості, та обрано для локалізації 25 вузлів із радіусом дії 50м. Та можна побачити На рисунку 3.15 показано етапи розгортання мережі, а на рисунку 3.15,в показано, що координати кожного вузла обчислені із похибкою, причиною цього є відбивання сигналу від перешкод.



а)

б)



в)

Рисунок 3.15 – Локалізація сенсорної мережі з використанням 25 вузлів:

а) розташування вузлів; б) локалізація мережі; в) оцінка похибки

Щоб уникати великих похибок при локалізації сенсорної мережі в умовах непрямой видимості необхідно збільшувати потужність передачі сигналу. При проведенні декількох експериментів, виявлено що радіус сигналу вузлів необхідно збільшити до 75м, результат зображено на рисунку 3.16.

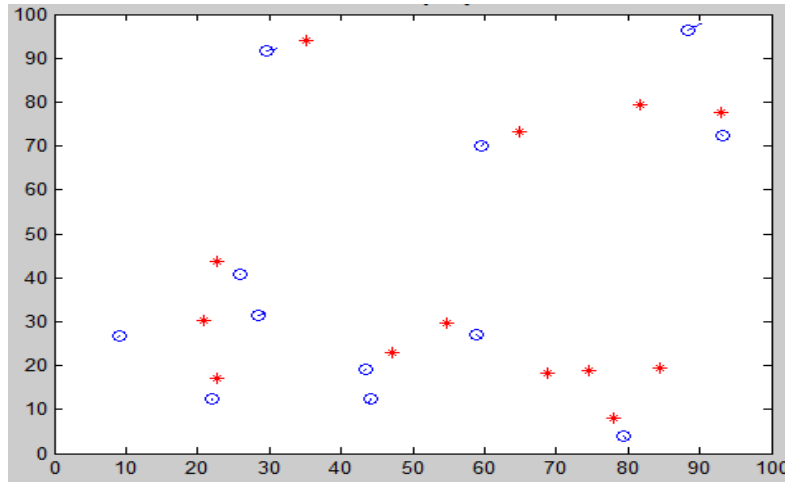


Рисунок 3.16 – Оцінка похибки, при збільшеному радіусі до 75м

Таким чином, щоб отримувати найкращий результат локалізації при умовах непрямой видимості необхідно, щоб радіус дії вузлів був максимально доступний.

#### Висновки до розділу

За результатами проведених досліджень, експериментів та розробок можна зробити наступні висновки.

Експериментально підтверджено, що потужність прийнятого сигналу обернено пропорційна квадрату відстані між передавальною і приймальною антенами. Отже, якщо відстань між передавачем і приймачем збільшується, потужність сигналу, що приймається, зменшується.

Розроблено алгоритм локалізації безпроводної сенсорної мережі на основі вимірювання потужності сигналу.

Змодельовану імітаційну модель за допомогою MATLAB на основі розробленого алгоритму для локалізації вузлів сенсорної мережі та проведені експерименти в мовах прямої видимості та відсутності прямої видимості вузлів.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання дипломної роботи одержані наступні результати.

Проаналізовано класичні джерела та сучасні наукові роботи, що стосуються методів та алгоритмів локалізації сенсорної мережі.

Розглянуто характеристики та основні функціональні можливості безпроводних сенсорних мереж ZigBee, що дало змогу виявити їхні основні переваги та недоліки.

Розроблено алгоритм для локалізації сенсорної мережі на основі вимірювання потужності сигналу.

На основі досліджених та розроблених алгоритмів спроектовано та програмно реалізовано імітаційну модель для аналізу та дослідження локалізації вузлів безпроводної сенсорної мережі.

Проведено дослідження локалізації вузлів сенсорної мережі в умовах прямої видимості вузлів, та відсутності прямої видимості вузлів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Akyildiz I. F. Wireless sensor networks: A survey. Computer Networks // IEEE Communications Magazine. –2002. – P.250.
2. Sound Surveillance System (SOSUS) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.fas.org/irp/program/collect/sosus.htm>. Federation of American Scientists. – Назва з титул. екрану.
3. National Oceanic and Atmospheric Administration [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.noaa.gov/index.html>. National Oceanic and Atmospheric Administration. – Назва з титул. екрану.
4. Airborne early warning and control [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://en.wikipedia.org/wiki/Airborne\\_early\\_warning\\_and\\_control](http://en.wikipedia.org/wiki/Airborne_early_warning_and_control). Wikipedia, the free encyclopedia. – Назва з титул. екрану.
5. Arampatzis T. A Survey of Applications of Wireless Sensors and Wireless Sensor Networks. – Dept. of Electr. & Comput. Eng., Patras. – 2005. – P.719 – 724.
6. SISVIA (Sistema de Seguimiento y Vigilancia Ambiental) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.dimap.es/news.html>. Technology and environment. – Назва з титул. екрану.
7. Detecting Forest Fires using Wireless Sensor Networks [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.libelium.com/wireless\\_sensor\\_networks\\_to\\_detec\\_forest\\_fires/](http://www.libelium.com/wireless_sensor_networks_to_detec_forest_fires/). Libelium word . – Назва з титул. екрану.
8. Еркин. А.Н. Особенности проектирования беспроводных ZigBee - сетей на базе микроконтроллеров фирмы Jennic / А.Н. Еркин. // Беспроводные технологии. Москва. - 2010. - №8. – С. 48-60.
9. Xinwei W., Bischoffa O. Localization in Wireless Ad-hoc Sensor Networks using Multilateration with RSSI for Logistic Applicationsn // Proceedings of the Eurosenors XXIII conference. – Since Direct. – 2009. – P. 451-464.
10. Institute of Electrical and Electronics Engineers / Inc., IEEE Std. 802.15.4-2003, IEEE Standard for Information Technology — telecommunications and



Information Exchange between Systems — Local and Metropolitan Area Networks — Specific Requirements — Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). New York: IEEE Press. — 2003. — P. 250.

11. ZIGBEE STANDARDS [Электронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.zigbee.org/Standards/>. ZigBee Technical Documents. — Назва з титул. екрану.

12. IEEE 802.15.4 vs ZigBee [Электронний ресурс]. — Режим доступу: <http://sensor-networks.org/index.php?page=0823123150>. Wireless sensor network research group. — Назва з титул. екрану.

13. Wireless Sensor Networks: a Survey on the State of the Art and the 802.15.4 and ZigBee Standards / P. Baronti, P. Prashant, V. Chook, S. Chessa / Computer Communication. — 2007. — Volume 30., Issue 7. — P. 1655-1695.

14. Zheng J. Will IEEE 802.15.4 make ubiquitous networking a reality?: A discussion on a potential low power, low bit rate standard / J. Zheng. — IEEE Communications Magazine. — June 2004. — P. 250.

15. Панфилов Д. Л. Введение в беспроводную технологию стандарта 802.15.4 // Электронные компоненты. 2004. № 12. — С.73–79.

16. Альянс ZigBee [Электронний ресурс]. — Режим доступу: <http://spectron.com.ua/ua/zigbee.html>. Безпроводні радіо мережі Zigbee . — Назва з титул. екрану.

17. Беспроводные сенсорные сети [Электронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.compress.ru/Article.aspx?id=17950>. КомпьютерПресс. — Назва з титул. екрану.

18. Nitaigour P. Sensor Networks and Configuration / P. Nitaigour // Gwangju, Republic of South Korea / Springer Berlin. — New York. — 2007. — P. 520

19. Using TinyOS [Электронний ресурс]. — Режим доступу: [http://docs.tinyos.net/tinywiki/index.php/Using\\_TinyOS](http://docs.tinyos.net/tinywiki/index.php/Using_TinyOS). TinyOS КомпьютерПресс. — Назва з титул. екрану.

20. Беспроводные сенсорные сети. Часть 3. Средства программирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.compress.ru/Article.aspx?id=19369>. КомпьютерПресс. – Назва з титул. екрану.
21. Беспроводные сенсорные сети: эмуляция работы. Часть 4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.compress.ru/Article.aspx?id=19782>. КомпьютерПресс. – Назва з титул. екрану.
22. Brooks R. R., Iyengar. S. S. Multi-Sensor Fusion: Fundamentals and Applications / R. R. Brooks, S. S. Iyengar // Prentice Hall, Englewood Cliffs. –NJ. – 2009. – P. 120.
23. Intanagonwiwat C., Govindan R., Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks // In Proceedings of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '00), Boston, MA, August 2008, ACM Press, New York, P. 56–67.
24. Yu Y., Govindan R., Estrin D.. Geographical and energy aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. Technical Report CSD-TR-01-0023, UCLA Computer Science Department, 2001.
25. Boukerche A., Oliveira H. Towards an integrated solution for node localization and data routing in sensor networks // In ISCC '07: 12th IEEE Symposium on Computers and Communications, Aveiro, Portugal, July 2007. – P. 449–454.
26. Boukerche A., Oliveira H., Nakamura E., A novel location-free greedy forward algorithm for wireless sensor networks // In Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Communications (ICC 2008), Beijing, China, May 2008.
27. Boukerche A., Nakamura E. Localization systems for wireless sensor networks. IEEE Wireless Communications Special Issue on Wireless Sensor Networks, 2007. – P. 6–12
28. He T., Huang C., Blum B. Range-free localization schemes for large scale sensor networks // In MobiCom '03: Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, New York, 2011, ACM Press, New York. – P. 81–95.

29. Derivation of Friis Transmission Formula [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.antenna-theory.com/basics/friis.php>. The Friis Equation – Назва з титул. екрану.
30. Savvides A., Han C. Strivastava M. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors // In 7th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Rome, Italy, 2010. – P. 166–179.
31. Hofmann-Wellenho B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice, 4th edition // Springer-Verlag, Berlin. – 2003.
32. Elson J. Time synchronization in wireless sensor networks // Department Computer Sciences, University of California, Ph.D. dissertation, Los Angeles. – 2003.
33. Whitehouse K. The design of calamari: An ad hoc localization system for sensor networks // M.S. thesis, University of California at Berkeley. – 2009.
34. Priyantha N., Balakrishnan H., Teller.S. The cricket compass for context aware mobile applications // In 7th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. Rome, Italy, July 2006. – P. 325.
35. Golub G., Van Loan C. Matrix Computations // 3rd edition, Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD. – 2010. – P. 213.
36. Niculescu D., Nath B. Ad hoc positioning system (aps) using aoa // I Proceedings of INFOCOM 2003, San Francisco, CA. – 2009. – P. 238.
37. Sichertiu M., Ramadurai V. Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon // In Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS 2004), FL, October 2010. – P. 174–183.
38. Simic S., Sastry S. Distributed localization in wireless ad hoc networks. //Technical Report UCB/ERL M02/26, UC Berkeley. – 2003.
39. Albowicz J., Chen A., Zhang L. Recursive position estimation in sensor networks // In The 9th International Conference on Network Protocols, November, 2003. – P. 35–41.
40. Pathirana P., Bulusu N., Savkin A. Node localization using mobile robots in delay-tolerant sensor networks / IEEE Transactions on Mobile Computing, 4(3):,2005. – P.285–296

41. Radio [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.jennic.com/support/forums/thread.php?postID=0000003464>. NXP Low Power RF. – Назва з титул. екрану.

42. Яцків Н.Г. Визначення координат вузлів безпроводних сенсорних мереж / Н.Г. Яцків, В.А Мандзій//Матеріали ІІ Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» АСІГ'2012, (4-5 травня 2012 р., м. Тернопіль). – Тернопіль: ТНЕУ, 2012. – С.80

43. Типові вимоги до оформлення дипломних робіт за освітньо-кваліфікаційними рівнями “спеціаліст” і “магістр”/ За ред. проф. Г.П. Журавля – Тернопіль: ТНЕУ, 2007. – 32 с.

44. Методичні рекомендації до виконання дипломної роботи з освітньо-кваліфікаційного рівня “Магістр”. Спеціальність „Комп'ютерні системи та мережі” / О.М. Березький, Р.Б. Трембач, Н.М. Васильків, Г.М. Мельник /Під ред. О.М. Березького – Тернопіль: ТНЕУ, 2012.– 42 с.

Додаток А

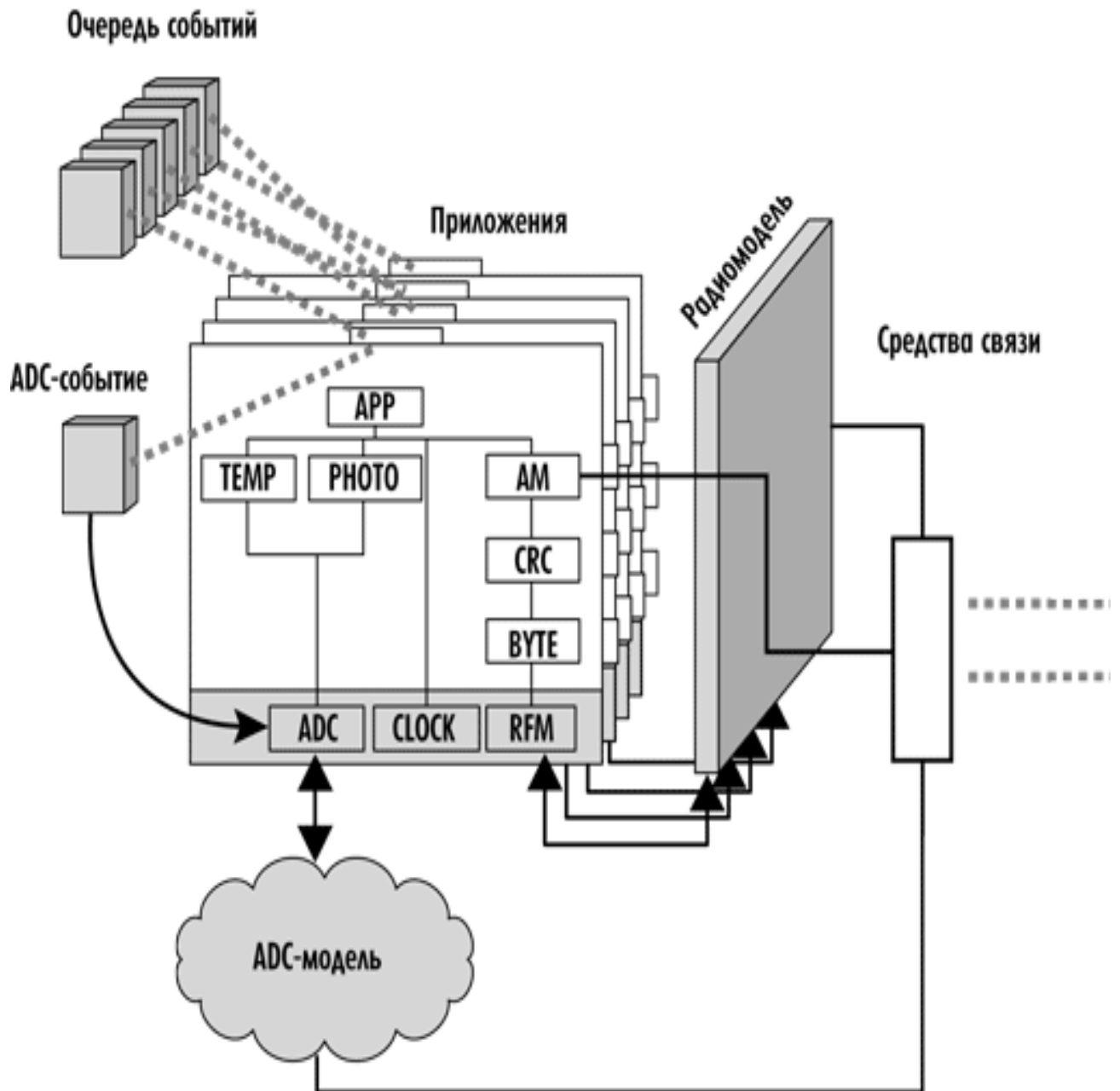
Нумерація каналів в не ліцензованому діапазонів

**Jennic**

IEEE 802.15.4 Wireless Network User guide

Діапазон частот	Номер каналу	Центральна частота (MHz)	Географічна область
868 MHz	0	868.3	Європа
915 MHz	1	906	Америка Австралія
	2	908	
	3	910	
	4	912	
	5	914	
	6	916	
	7	918	
	8	920	
	9	922	
	10	924	
2400 MHz	11	2405	Весь світ
	12	2410	
	13	2415	
	14	2420	
	15	2425	
	16	2430	
	17	2435	
	18	2440	
	19	2445	
	20	2450	
	21	2455	
	22	2460	
	23	2465	
	24	2470	
	25	2475	
	26	2480	

Додаток Б  
Архітектура емулятора TOSSIM





## Додаток В

### Текст виконуваного фалу «gum.m»

```
clear;
clc;
close all;
cd 'Deploy Nodes'
square_random(30,30,0.1);
%square_random(1000,300,0.2,30)
%C_random([1000,300,300,700],240,0.2);
%square_regular(10,10,0.1,0.2);
%C_regular([1000,300,300,700],100,0.1,0.2);
%refnodecoor=[2 1;5 1;8 1;2 9;5 9;8 9];
%actualunknownnodecoor=[5 5];
comm_r=15;% radius
%%refnodecoor=[0 2;1 0;1 4;3 4;3 0;4 2];
%%refnodecoor=[0 0;2 0;4 0;3 4;1 4]; %trapecia
%%refnodecoor=[0 0;0 4;4 0;4 4;2 2]; %quinconce
%%refnodecoor=[0 2;1 0;2 4;4 2;3 0]; %pentagon
%$refnodecoor=[0 0;0 4;4 0;4 4]; %squer
%%refnodecoor=[0 0;2 4;4 0]; %tringel
%%refnodecoor=[0 0;1 1;2 2;3 3;4 4]; %diagonal
%%refnodecoor=[0 2;1 2;2 2;3 2;4 2]; %Line
%%refnodecoor=[2 1;5 1;8 1;2 9;5 9;8 9];
%%refnodecoor=[1 5;2 1;5 1;8 1;2 9;5 9;8 1;8 9;9 5];
Distribution_Of_WSN;
cd ..;
cd 'Topology Of WSN';
comm_r=15;% radius
model='Regular Model';
%model='Logarithmic Attenuation Model';
anchor_comm_r=1;
try
    calculate_neighbor(comm_r,anchor_comm_r,model,DOI);
catch
    calculate_neighbor(comm_r,anchor_comm_r,model);
end
Topology_Of_WSN;
cd ..;
dist_available=true;cd 'MDS-MAP';MDS_MAP(dist_available);
cd ..
cd 'Localization Error'
```



## Додаток Г

### Текст файлу Topology\_Of\_WSN

```
load '../Deploy Nodes/coordinates.mat';
load neighbor.mat;
figure;
hold on;
box on;
for i=1:all_nodes.nodes_n
    for j=i+1:all_nodes.nodes_n
        if neighbor_matrix(i,j)==1
            plot(all_nodes.true([i,j],1),all_nodes.true([i,j],2),'-b');
        end
    end
end
plot(all_nodes.true(all_nodes.anchors_n+1:all_nodes.nodes_n,1),all_nodes.true(all_nodes.anchors_n+1:all_nodes.nodes_n,2),'ro');
plot(all_nodes.true(1:all_nodes.anchors_n,1),all_nodes.true(1:all_nodes.anchors_n,2),'r*');
axis([0,all_nodes.square_L,0,all_nodes.square_L]);

try
    disp(['DOI=',num2str(DOI)]);
catch

end
if anchor_comm_r==1
    disp(['',num2str(sum(sum(neighbor_matrix))/all_nodes.nodes_n)]);

disp(['',num2str(sum(sum(neighbor_matrix(1:all_nodes.nodes_n,1:all_nodes.anchors_n)))/all_nodes.nodes_n)]);
else

disp([':',num2str(sum(sum(neighbor_matrix(all_nodes.anchors_n+1:all_nodes.nodes_n,1:all_nodes.anchors_n)))/(all_nodes.nodes_n-all_nodes.anchors_n))]);

disp([':',num2str(sum(sum(neighbor_matrix(all_nodes.anchors_n+1:all_nodes.nodes_n,all_nodes.anchors_n+1:all_nodes.nodes_n)))/(all_nodes.nodes_n-all_nodes.anchors_n))]);
end
```

## Додаток Д

Текст файлу для визначення помилки локалізації

```
function [Localization_error,Unresolve_num]=calculate_localization_error()

% Localization_error
load result.mat;
figure;
hold on;
box on;
plot(all_nodes.true(1:all_nodes.anchors_n,1),all_nodes.true(1:all_nodes.anchors_n,
2),'r*');%the anchors
Unresolved_unknown_nodes_index=find(all_nodes.anc_flag==0);%the unresolved
unknown nodes
Unresolved_num=length(Unresolved_unknown_nodes_index);
plot(all_nodes.true(Unresolved_unknown_nodes_index,1),all_nodes.true(Unresolv
ed_unknown_nodes_index,2),'ko');
resolved_unknown_nodes_index=find(all_nodes.anc_flag==2);%estimated
locations of the resolved unknown nodes
plot(all_nodes.estimated(resolved_unknown_nodes_index,1),all_nodes.estimated(r
esolved_unknown_nodes_index,2),'bo');
plot(transpose([all_nodes.estimated(resolved_unknown_nodes_index,1),all_nodes.
true(resolved_unknown_nodes_index,1)]),...
transpose([all_nodes.estimated(resolved_unknown_nodes_index,2),all_nodes.true(
resolved_unknown_nodes_index,2)]),'b-');
axis auto;
try
x=0:all_nodes.grid_L:all_nodes.square_L;
set(gca,'XTick',x);
set(gca,'XTickLabel',num2cell(x));
set(gca,'YTick',x);
set(gca,'YTickLabel',num2cell(x));
grid on;
catch
end
```