

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Засоби комп'ютерного екомоніторингу великорозмірних об'єктів
(тема)

Виконав: студент 2 курсу, групи СКСм-22-1

Деєв С.Д.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____
Спеціалізовані комп'ютерні системи
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Кривуля Г.Ф.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Чумаченко С. В.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Комп'ютерної інженерії та управління _____
Кафедра _____ Автоматизації проектування обчислювальної техніки _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність _____ 123 Комп'ютерна інженерія _____
(шифр і назва)
Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма _____ Спеціалізовані комп'ютерні системи _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«03» _____ вересня 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Дєєву Сергію Дмитровичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Засоби комп'ютерного екомоніторингу великорозмірних об'єктів _____

затверджена наказом по університету від _____ 03.11.2023 р. № _____ 1288СТ _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 27.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

Структури великорозмірних мереж _____

Параметри контролю середовища _____

Засоби комп'ютерного екомоніторингу _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Аналіз предметної області та постановка задачі _____

Огляд засобів вирішення задачі _____

Реалізація системи _____

Робота та тестування системи _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) 15 слайдів


6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

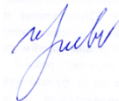
Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

7. Дата видачі завдання 02.09.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз проблеми та огляд існуючих рішень	03.11.23-08.11.23	
2	Вибір засобів розробки	09.11.23-15.11.23	
3	Розробка структури системи	16.11.23-22.11.23	
4	Реалізація системи	23.11.23-01.12.23	
5	Тестування системи	02.12.23-03.12.23	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	04.12.23-14.12.23	
7	Перевірка кваліфікаційної роботи керівником	15.12.23-21.12.23	
8	Захист роботи	12.01.24-20.01.24	

Студент  _____
(підпис)

Керівник роботи  _____
(підпис)

проф. Кривуля Г.Ф.
(посада, прізвище, ініціали)

(підпис)

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра оформлена на 82с., включає 33рис., табл., 2 додатка, 8 посилань.

У даній роботі проводиться дослідження існуючих технологій та проектування оптимальної системи для віддаленого екомоніторингу в великомасштабних об'єктів з використанням сенсорних мереж, що є складним комплексним завданням і вимагає тривалих періодів спостереження з використанням великої кількості датчиків. Використання бездротових сенсорних мереж стає широко поширеною практикою при виконанні цього завдання, здебільшого через їх ефективність та швидкість роботи. Відповідно, з розвитком різноманітних мініатюрних сенсорів і датчиків, об'єднаних в бездротові сенсорні мережі, можна дистанційно контролювати такі параметри, як температура і вологість повітря, ґрунту та багато інших.

Перелік ключових слів: ДАТЧИК, СИСТЕМА, БЕЗДРОТОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ, МОНІТОРИНГ, РОСЛИННИЦТВО, ТЕМПЕРАТУРА, ВОЛОГІСТЬ, ПРОТОКОЛ, АЛГОРИТМ.

ABSTRACT

Explanatory note for this thesis contains 82 pages, 33 figures, 2 tables, 8 sources.

This master's degree thesis is to study existing technologies and design the optimal system for remote monitoring agricultural crop parameters, that is difficult complex task and requires long periods of observation using a large number of sensors. The process of tracking and control the distribution of rain water, in order to obtain a good harvest, is important for farmers because of the unevenness of its natural distribution. The use of wireless sensor networks is widespread practice in this task, mainly because of their efficiency and speed. Accordingly, in this context, the development of a variety of miniature sensors, integrated in the wireless sensor network, you can remotely control parameters such as temperature, humidity of air and soil, and many others.

The key words: SENSOR, SYSTEM, WIRELESS SENSOR NETWORKS, MONITORING, PLANT GROWING, TEMPERATURE, HUMIDITY, PROTOCOL, ALGORITHM.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ.	8
ВСТУП.	9
1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.	10
1.1 Екологічний моніторинг.	11
1.2 Автоматизовані системи екологічного моніторингу.	12
1.3 Постановка задачі.	13
2 БЕЗДРОТОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ.	16
2.1 Топологія і стек протоколів.	18
2.2 Збір розподілених даних в БСМ.	21
2.3 Актуальні проблеми побудови і використання БСМ.	22
2.4 Стандарт IEEE 802.15.1 і Bluetooth.	24
2.5 Стандарт IEEE 802.15.4 і ZigBee.	25
3 ДАТЧИКИ.	29
3.1 Температурні датчики.	29
3.2 Датчики вологості.	31
4 ПРОТОКОЛИ МАРШРУТИЗАЦІЇ БСМ.	34
4.1 Фактори вибору протоколу маршрутизації БСМ.	34
4.2 Класифікація протоколів маршрутизації БСМ.	35
4.3 Плоські протоколи маршрутизації.	37
4.4 Ієрархічні протоколи маршрутизації.	38
4.5 Порівняння плоских та ієрархічних протоколів маршрутизації.	39
5 РОЗМІЩЕННЯ ЯКІРНИХ ВУЗЛІВ.	40
5.1 Поведінковий алгоритм TPSMA.	41
5.2 Розміщення вузлів БСМ на основі алгоритму TPSMA.	42
5.3 Модель зондування й цільова функція.	43
5.3.1 Двійкова модель зондування.	43
5.4 Модель проектованої БСМ.	43

5.5 Результати моделювання.	45
5.6 Розташування сенсорних вузлів.	47
5.7 Локалізація невідомих вузлів БСМ.	50
6 ОПИС АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ.	56
6.1 Сенсорні вузли та базова станція.	56
6.2 Джерело живлення.	60
6.3 Аналогова схемотехніка та схема підключення ЦПУ.	61
6.4 Радіомодуль.	63
6.5 Використовувані типи датчиків.	64
6.6 Інтерфейс USB та інші компоненти.	65
6.7 Накопичувальний реєстратор Decagon EM50.	67
ВИСНОВКИ.	69
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	70
ДОДАТОК А.	72
ДОДАТОК В.	75

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

АЦП - Аналогово-Цифровий Перетворювач;

БСМ – Бездротова Сенсорна Мережа;

УК - Управляющий Комп'ютер;

ЦПУ – Центральний Процесорний Пристрій;

AODV - Спеціальний вектор відстані на вимогу;

IEEE - Інститут інженерів з електротехніки та електроніки;

GPIO - (General Purpose Input Output) система вводу/виводу загального призначення;

MAC - (Media Access Control) управління доступом до середовища;

MMC - мультимедійна карта;

TPSMA - Алгоритм позначення запаху територіального хижака;

WLAN - Бездротова локальна мережа;

WPAN - Бездротова персональна мережа.

ВСТУП

На теперішній час для збирання даних широко використовуються бездротові сенсорні мережі (БСМ). Застосування БСМ для моніторингу складних та великих об'єктів пов'язане з розташуванням великої кількості вимірювальних сенсорів. Оскільки кожен поточний вимір пов'язаний з розташуванням вузла датчика у просторі, процес локалізації (визначення координат) по відношенню до локальної (глобальної) системи координат для кожного вузла має бути виконаний з необхідною точністю. Сенсорні вузли зазвичай випадково розгортаються мобільним роботом або літаком, тому вони не мають попередньої інформації про своє місцезнаходження. Для великорозмірного розгортання оснастити кожен сенсорний вузол пристроєм глобальної системи позиціонування (GPS) через високу вартість та енергоспоживання неможливо. Тому визначення положення сенсорних вузлів, яке називається локалізацією, є однією з ключових технологій БСМ. Таким чином, мета локалізації - знайти фізичні координати для всіх вузлів датчиків [1,2]. Нехай невелика частина датчиків - якірні пристрої, які знають своє положення. Вони можуть бути оснащені GPS або розміщені точно в певних місцях із запрограмованою в них інформацією про місцезнаходження. Завдання полягає в тому, щоб локалізувати інші датчики за допомогою цих якорів. При випадковому розгортанні локалізація вузлів без вихідних координат ускладнюється, але для вирішення завдання використовують спеціальні вузли, які можуть визначати розташування інших вузлів автоматично. Ці конкретні вузли називають опорними, маяковими або якірними, вони оснащені системою GPS й використовуються методами локалізації у глобальних координатах. Число якірних вузлів повинно бути таким, щоб забезпечити необхідну адресацію для всіх вузлів БСМ. Мінімальна кількість таких якірних вузлів дорівнює числу Хеммінга в залежності від загального числа вузлів мережі. Наприклад, для тисячі сенсорів достатньо десяти якірних вузлів.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Основна мета роботи є дослідження існуючих технологій для збору і інформації з використанням бездротових сенсорних мереж (БСМ) для подальшої її відправки на віддалену базову станцію. Також визначення оптимального способу моніторингу параметрів навколишнього середовища, який може подолати наявні в сучасних системах БСМ.

Передбачувана система заснована на модулі IEEE 802.15.4/ZigBee для передачі даних на вибраний сервер. Модуль ZigBee/IEEE 802.15.4 з'єднаний з різними датчиками, що мають аналогові виходи через мультиплексор, який використовується для стробування сигналу. Таким чином можна вибрати два конкретних сигналу на основі значення системи вводу/виводу загального призначення (GPIO).

Сигнали вимірюються і відображаються в значеннях, які потім передаються на вибраний сервер, підключений до тієї ж мережі через шлюзовий елемент, наприклад стандартний маршрутизатор Wireless-G.

Сервер може бути підключений до мережі або бездротовим способом, або через проводне Ethernet-підключення. Він зберігає отримані дані у текстовому файлі формату Comma-Separated Values (CSV), призначеному для представлення табличних даних, які можуть бути безпосередньо імпортовані у файл бази даних типу Excel або будь-яке інше програмне забезпечення для аналізу та відображення даних.

На рисунку 1.1 наведено зображення системи для збору даних.

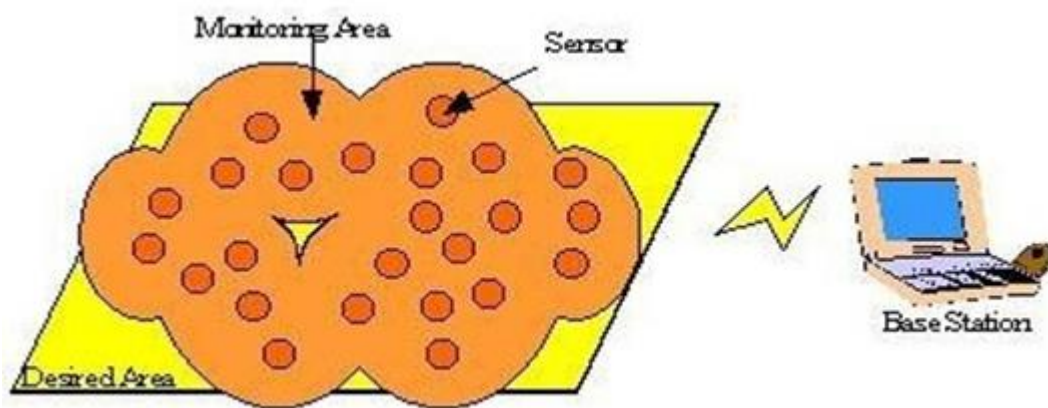


Рисунок 1.1 Система для збору даних.

На теперішній час стан навколишнього середовища – одне з найактуальніших питань сучасності й воно винесено на рівень державного контролю. Державна система моніторингу довкілля – це система спостереження, збирання, обробки, передачі, збереження та аналізу інформації про стан довкілля, прогнозування його змін і розроблення науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття рішень про запобігання негативним змінам стану довкілля та дотримання вимог екологічної безпеки.

Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища» (ст. 20, 22) передбачено створення системи моніторингу та проведення спостережень за станом навколишнього природного середовища, рівнем його забруднення.

1.1 Екологічний моніторинг

Екологічний моніторинг — це систематичне збирання, аналіз та інтерпретація інформації про стан навколишнього середовища з метою визначення його якості, змін та впливу людської діяльності на природу. Метою екологічного моніторингу є забезпечення інформацією для прийняття рішень у сфері охорони довкілля, розвитку ефективних стратегій управління та зменшення негативного впливу на природу.

1.2 Автоматизовані системи екологічного моніторингу

Автоматизовані системи екологічного моніторингу (АСЕМ) стану атмосферного повітря, води та земель (ґрунтів) повинні відповідати всім вимогам системи моніторингу. АСЕМ виконують довгострокові систематичні спостереження екологічного стану довкілля, надають інформаційно-аналітичну підтримку в прийнятті рішень у галузі раціонального використання природних ресурсів й екологічної безпеки. Система екологічного моніторингу складається із **аналітичних приладів та програмного забезпечення та** дозволяє в режимі реального часу обробити і вивести оперативну інформацію про стан □ навколишнього середовища

Показники, які визначають системи екомоніторингу

Показники атмосферного повітря

- Концентрація пилу
- Одоранти та сірковмісні сполуки
- Швидкість вітру
- Напрямок вітру
- Температура
- Відносна вологість
- Атмосферний тиск

Показники поверхневих вод

- Каламутність
- Забарвленість
- Нітрати (селітра)
- Нітрити
- Азот амонійний $\text{NH}_4\text{-N}$
- Калій
- Водневий показник
- Температура води

- Провідність
- Завислі речовини

Показники морської води

- Каламутність
- Електропровідність
- Солоність
- Швидкість звуку
- Температура води

Показники ґрунту

- Фосфати
- Амоній
- Нітратний азот
- Нітрити вільного та загального хлору
- Сульфати
- Загальне залізо

Система моніторингу навколишнього середовища має різні виконання

- Мобільна лабораторія (аналіз повітря, води, ґрунту)
- Стаціонарний пост моніторингу стану атмосферного повітря
- Стаціонарний пост моніторингу стану поверхневих вод
- Стаціонарний пост моніторингу стану морської води

Крім того, разом із мобільною лабораторією або стаціонарним постом може бути встановлена метеостанція для безперервного вимірювання температури, відносної вологості і тиску повітря, інтенсивності, типу і кількості опадів, напрямку і швидкості вітру, вимірювання тривалості сонячного сьйва.

1.3 Постановка задачі

Розвиток мікроелектронної бездротової комунікації привело до застосування великомасштабних бездротових сенсорних мереж (БСМ), що

містять сотні, навіть тисячі вузлів датчиків, розміщених у великій області. БСМ можуть мати проблеми (аномалії) під час роботи з-за динамічних факторів навколишньої середовища або збоїв апаратного та програмного забезпечення вузлів. Ці аномалії вимагають надійної стратегії виявлення для підтримки довгострокового крупномасштабного розгортання БСМ Існуючі методи для діагностування сенсорних мереж, як правило, засновані на приймачах та активному виведенні інформації про стан усіх сенсорних вузлів для проведення централізованого аналізу. Однак приймальні засоби діагностування мають великі труднощі для сенсорних мереж. Із-за ненадійної безпроводної мережі приймач часто отримує неповну та іноді спотворену інформацію, що призводить до неточних висновків. Щоб вирішити проблеми, пропонуємо концепцію самодіагностики, яка допомагає кожному окремому датчику приєднуватися до процесу прийняття рішень.

Новий клас великих мережевих систем (Large Wireless Sensor Network - LWSN), що містять сотні й навіть тисячі вузлів датчиків, розміщені у великому регіоні. Наприклад, проект CitySee розгорнув 1200 вузлів датчиків у міській місцевості [1]. Застосування LWSN для моніторингу складних об'єктів пов'язане з розташуванням вимірювальних сенсорів. Контроль поточного стану складних об'єктів із застосуванням LWSN вимагає великої кількості сенсорів і є складним технічним завданням. Збір даних для заданого простору в реальному часі здійснюється сенсорною мережею, при цьому кожен наданий вимір пов'язаний з розміщенням вузла датчика в просторі, процес локалізації (визначення координат) по відношенню до локальної (глобальної) системи координат для кожного вузла має бути виконаний з необхідною точністю.

Сенсорні вузли на великому просторі зазвичай випадково розгортаються наприклад автомобільним роботом або літаком, тому вони не мають попередньої інформації про своє місцезнаходження. Оснастити кожен сенсорний вузол пристроєм глобальної системи позиціонування (GPS) через

високу вартість та енергоспоживання неможливо для великомасштабного розгортання. Тому визначення положення з невідомими координатами сенсорних вузлів, яке називається локалізацією, є однією з ключових технологій LWSN. Процедура локалізації часто носить ітераційний характер, оскільки якорів значно менше, ніж невідомих вузлів, тому деякі невідомі вузли локалізуються сусідніми локалізованими. Оскільки розподілена локалізація дозволяє кожному вузлу датчика оцінювати власне місце розташування без будь-якого центрального блоку управління або обчислень, що полегшує великі накладні витрати на зв'язок, тож вони більше підходять для вузлів локалізації LWSN, ніж централізовані методи. Таким чином, мета локалізації – знайти фізичні координати для всіх вузлів датчиків [2, 3]. Через загальне випадкове розгортання вузлів LWSN якорі також розподіляються нерівномірно, тому на продуктивність локалізації істотно впливають дві проблеми. По-перше, деяким невідомим вузлам не вистачає сусідніх якорів для точної локалізації. По-друге, деякі інші невідомі вузли мають багато сусідніх якорів, що створює великі обчислювальні навантаження під час локалізації. Метою роботи є створення сенсорної мережі з використанням стандарту IEEE802.15.4 ZigBee на основі мікроконтролерів Arduino для екологічного моніторингу великорозмірного середовища.

Об'єкт дослідження – бездротова сенсорна мережа . для екомоніторингу навколишнього середовища.

Предмет дослідження – розміщення вузлів мережі та вибір компонентів сенсорної мережі для існуючої апаратної бази.

В результаті роботи будуть розроблені основні елементи сенсорної мережі екологічного призначення. Основною сферою застосування даного апаратно - програмного комплексу є моніторинг параметрів закритих приміщень, повітря робочої зони, визначення стану фізичних середовищ і об'єктів при проведенні робочої діяльності.

2. БЕЗДРОТОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ

Бездротова сенсорна мережа (БСМ) є мережа просторово розподілених автономних датчиків, що використовуються для моніторингу будь-яких фізичних параметрів, зокрема параметрів навколишнього середовища, та спільної передачі даних на головний сервер. Контрольовані параметри залежать від функції сенсорних вузлів у мережі, наприклад, фізичні датчики (температури, вологи, радіохвильової частоти датчиків), хімічні датчики (розчиненого кисню, електропровідності, датчик рН), біологічні датчики (наприклад, датчик мікроорганізмів), датчики, орієнтовані на національну безпека, а також багато інших знову і знову винайдені датчики. В даний час датчик бездротової сенсорної мережі є не тільки одиночним елементом, він оснащений безліччю сенсорних елементів і називається сенсорним вузлом.

Бездротові сенсорні мережі зазвичай складаються з двох основних частин: системи для генерації та збору значень із розподілених датчиків; системи обробки та локального зберігання значень з датчиків, перед відправкою цих даних користувачеві.

- система генерації і збору значень (сенсорна мережа) складається з сотень сенсорних вузлів, що самоорганізуються, які взаємодіють і обмінюються інформацією між собою за допомогою радіосигналів, і створюють мережу типу ad hoc. Ці датчики є невеликими блоками, здатними зберігати обмежену кількість даних і мають обмежену швидкість обробки даних і ширину каналу радіозв'язку. Сенсорні вузли можуть бути розгорнуті певним або випадковим чином і можуть покривати велику площу з високою щільністю в залежності від необхідних вимог до розміщення.

- система обробки та локального зберігання може бути звичайним сервером, що зберігає значення датчиків і перетворює його у формат, зручний для розпізнавання та подальшого відтворення користувачеві.

Як правило, бездротові сенсорні мережі створюються для вирішення конкретної задачі (моніторингу навколишнього середовища, стеження за

метою тощо) та призначені для оптимізації та підвищення продуктивності базового сценарію розгортання. Значення датчиків можуть бути попередньо оброблені системою генерації та збору значень під оптимальну продуктивність мережі та далі передані сенсорною системою на сервер обробки через Інтернет або локальну мережу. Крім того, сервер обробки надає користувачам сервіси управління та контролю даними, а також зручний інтерфейс користувача.

У БСМ існує багато різновидів пристроїв та сенсорних вузлів, які використовуються для забезпечення стабільної роботи мережі з високою продуктивністю. На основі функціональних та комунікативних ролей вони поділяються на чотири основні типи.

- Sub-node (кінцевий пристрій): вузол без маршрутизації. Цей вузол може лише збирати дані з контрольованого навколишнього середовища та передавати їх на інші вузли.

- Head-node (маршрутизуючий вузол): вузол, здатний приймати дані від іншого вузла та направляти їх до подальшого вузла, вузла-шлюзу. Залежно від топології мережі цей вузол може виконувати функції звичайного вузла збору даних із контрольованого навколишнього середовища або бути точкою маршрутизації.

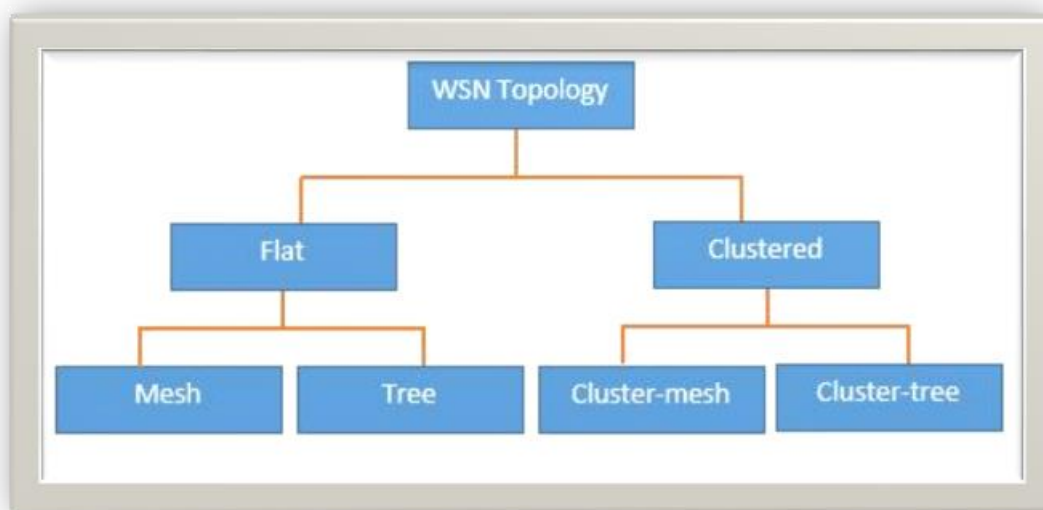
- Sink-node (gateway, вузол-шлюз): вузол, який збирає або запитує дані з інших вузлів та передає їх в іншу мережу. Може виконувати функції звичайного вузла збору даних із контрольованого навколишнього середовища, за винятком пересилання даних іншим вузлам мережі.

- Controller (контролер чи координатор): центральний орган управління координації адресації вузлів і з'єднань у мережі, маршрутизації, передачі за розкладом, синхронізації між вузлами тощо. Залежно від топології мережі, цей елемент може як використовуватися, так і зовсім відсутні в БСС.

Оскільки сенсорний вузол складається з багатьох елементів, він може виконувати в бездротовій сенсорній мережі більше однієї функції одночасно, і також, залежно від застосування, БСС може містити ці типи вузлів, або

тільки деякі з них.

2.1 Топологія та стек протоколів



БСМ це технологія, спрямована на виконання певних, часто специфічних, завдань, тобто орієнтована певне застосування. Вибір та підтримання відповідної топології мережі відіграє важливу роль у підвищенні продуктивності подібної мережі. Це може бути топологія типу точка-точка, зірка, сітка, дерево або гібридна топологія, залежно від мети застосування та підтримуваної комунікаційної технології, що використовується в мережі. Відповідна топологія дозволить підвищити продуктивність мережі, покращити енергоефективність, оптимізувати ширину смуги пропускання та вартість розгортання мережі. Як правило, топології БСС поділяються на плоскі топології та кластерні топології.

Площинні топології: кожен вузол здатний самостійно відправляти свої дані на сервер, підтримувати зв'язок із будь-якими вузлами в межах встановленого діапазону, всі вузли рівні та відіграють однакову роль у мережі. Прикладами плоских топологій може бути дерево (tree), сітка (mesh) чи його поєднання

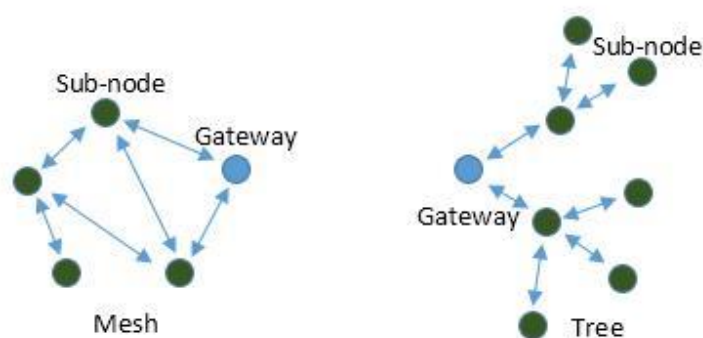


Рисунок 2.2 – Приклади площинних топологій

- Кластерні топології: тільки підмножини вузлів (head-nodes) можуть маршрутизувати дані між усіма вузлами, решта вузлів лише надають дані вузлам, що маршрутизують, до яких вони підключені до маршрутизації. Мережа зазвичай розділена на основі географічного положення вузлів. Вузли, що знаходяться на близьких відстанях, можуть бути згруповані в кластери. Топологіями між такими кластерами може бути сітка (cluster-mesh), дерево (cluster-tree) або їх поєднання.

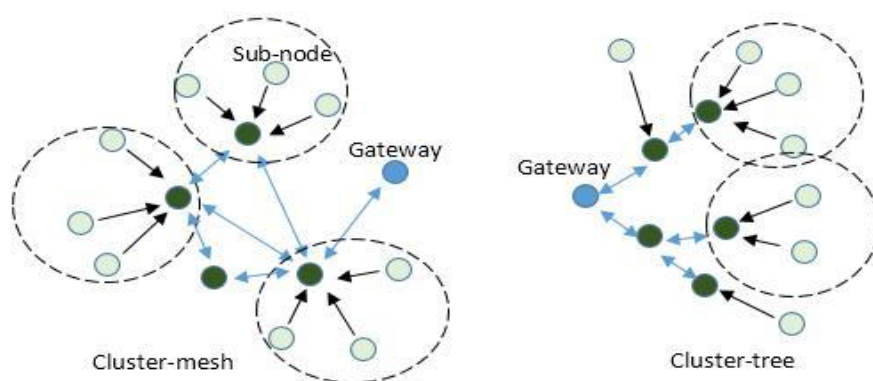


Рисунок 2.3 – Приклади кластерних топологій

Застосування кластерної топології призводить до того, що мережа стає ієрархічною, а також підвищує ефективність використання смуги пропускання, тому що лише деякі спеціалізовані вузли підтримують зв'язок каналами зв'язку. У стаціонарній БСС, топологія cluster-tree має найкращу ефективність використання енергії, тоді як топологія cluster-mesh забезпечує максимальну надійність, що дає можливість використання багатокільної

маршрутизації та безлічі вузлів-шлюзів.

Іншим аспектом, що має великий вплив на продуктивність БСС, є стек протоколів. Стек протоколів БСМ подібний до традиційного стеку протоколів і має такі шари: прикладний, проміжний, шар маршрутизації, каналний і фізичний.

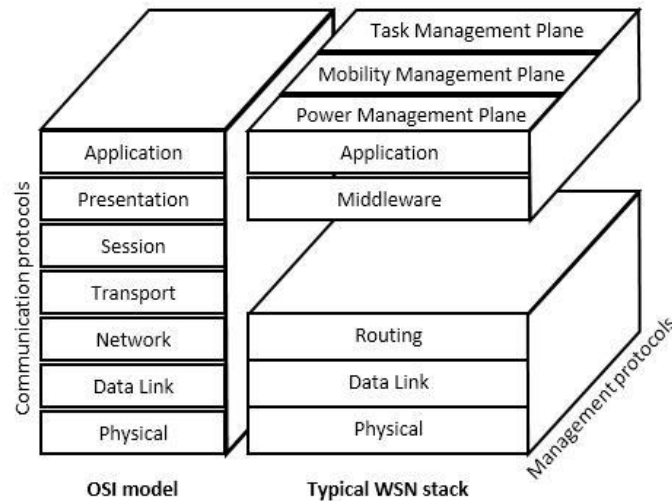


Рисунок 2.4 – Стек протоколів БСМ порівнюючи з моделлю OSI

У стеку протоколів БСМ прикладний протокол відповідає за споживання та генерацію даних, у той час як протокол маршрутизації вирішує відповідь за те, що передається і в якому напрямку. Транспортний рівень поєднано з прикладним рівнем та відповідає за надійну доставку даних, необхідних на рівні додатків.

Канальний рівень відповідає за мультиплексування потоку даних, створення та виявлення кадру даних, доступ до середовища, а також контроль помилок з метою забезпечення надійної передачі методами точка-точка та одним-багатьом. У каналному шарі стека протоколів БСМ управління доступом до середовища (MAC) відіграє важливу роль для поширення інформації в загальному середовищі та ефективною комунікації. Добре спроектований протокол MAC допомагає підтримувати продуктивність мережі на рівні рівня при розумному споживанні енергії, високу пропускну спроможність мережі та малу затримку доставки

інформації в мережі. Фізичний рівень відповідає за перетворення бітових потоків з канального рівня відповідні сигнали, що передаються через середовище зв'язку.

У поєднанні з протоколами зв'язку, в стеку протоколів БСМ застосовують також протоколи управління. Протокол управління живленням керує споживанням енергії сенсорними, зводячи його до мінімуму. З метою збереження енергії також може відключати деякі функції вузла.

Проектування ефективних і надійних протоколів зв'язку для БСМ є досить складним завданням через невизначеність і параметри навколишнього середовища, що постійно змінюються. Хоча БСМ і є ad hoc-подібними мережами, проте достатньо відрізняються від традиційних ad hoc-мереж.

Стеки протоколів БСМ мають бути розроблені таким чином, щоб звести до мінімуму споживання енергії та зберегти тривалий термін служби мережі. Оскільки сенсорні вузли немає глобальних ідентифікаторів, протоколи мають працювати зі своїми ім'ям з урахуванням атрибутів і кластеризацією. Також стек протоколів БСМ повинен мати справу з певним типом інформації, маршрутизації даних, орієнтованих та агрегації даних, що надходять із сенсорної області. І остання проблема полягає в тому, що в позиції сенсорних вузлів можуть бути не визначені до розгортання. Для вирішення цієї проблеми потрібне завдання протоколу маршрутизації з можливістю розгортання маршрутів, що самоорганізуються.

2.2 Збір розподілених даних у бездротових сенсорних мережах

Незважаючи на те, датчики в БСМ є автономними і можуть працювати незалежно від мережі, вони мають обмеження щодо споживання енергії, швидкості обробки даних та обмежений обсяг пам'яті. Як правило, значення з датчиків збираються та оброблятимуться за межами мережі. Всі програми, що знаходяться за межами мережі датчиків, підключатимуться до неї за допомогою шлюзу.

У бездротових сенсорних мережах існує два способи збору значень із

датчиків: single-hop та multi-hop, представлені на рис. 2.5.

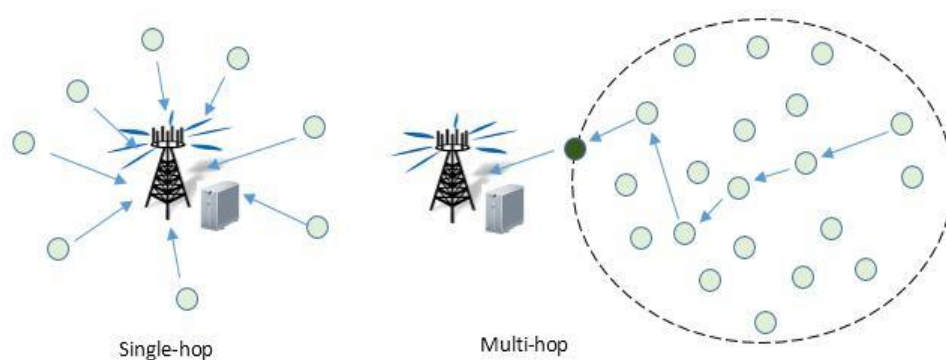


Рисунок 2.5 – Способи збору даних в БСМ

При використанні підходу single-hop сенсорний вузол безпосередньо передає дані базової станції (або шлюзу, до якого він підключений). Тим не менш, це вимагатиме значних додаткових витрат енергії, коли вузли розташовані на значній відстані від базової станції або є мобільними та віддаляються від неї.

Підхід multi-hop може вирішити цей недолік шляхом ретрансляції пакетів даних між джерелом та пунктом призначення з використанням проміжних вузлів (вузлів маршрутизації). Під час операції передачі даних проміжні вузли можуть також збирати дані та передавати їх спільно для підвищення ефективності та зменшення енерговитрат. Також, при використанні підходу multi-hop, передача даних може ґрунтуватися на трьох різних стратегіях маршрутизації: проактивної, реактивної та гібридної.

2.3 Актуальні проблеми побудови та використання БСМ

Незважаючи на те, що бездротові сенсорні мережі вже тривалий час широко використовуються в багатьох областях, в даний момент все ще існують деякі значні недоліки, які не дозволяють стати першим технологічним вибором в багатьох випадках. Можна виділити два основних недоліки, які в основному і мають такий вплив: значне енергоспоживання, а

також необхідність наявності надмірності або використання великої кількості резервних вузлів для підтримки стабільної роботи подібних високопродуктивних мереж.

Як правило, БСМ розгортаються для контролю або моніторингу протягом тривалого періоду часу (кілька місяців або років), у разі чого часта заміна джерел живлення (акумуляторів) у сотнях використовуються сенсорних пристроях не є можливою і доцільною. Таким чином, енергія, що споживається кожним сенсорним вузлом мережі, є одним з обмежень, які слід враховувати при проектуванні БСМ. При зменшенні витрат енергії кожного вузла мережі збільшується термін служби всієї сенсорної системи. Відповідно, споживана потужність БСМ може бути оптимізована зменшенням кількості енергії, що споживається окремими вузлами з продовженням їх життєвого циклу, шляхом вибору оптимальної топології мережі та протоколу маршрутизації.

Для забезпечення подібної максимальної ефективності роботи сенсорний вузол повинен перебувати в сплячому режимі 90% робочого часу (рис. 2.6) і «прокидатися» лише згідно з розкладом, або у зв'язку з примусовою активацією. Більшість енергії вузла витрачається протягом активного часу, тому дотримання належних інтервалів сплячого режиму є основною умовою його роботи протягом тривалого часу. У БСМ на основі підходу single-hop (топология зірка), де вузол безпосередньо зв'язується з базовою станцією, на відміну від мереж на основі підходу multi-hop (топологии сітка, дерево, кластерні топологии), інтервал режиму сну залежить тільки від вимог до застосування подібної мережі. На малюнку 2.6 зображено робочий цикл сенсорного вузла.



Рисунок 2.6 – Робочий цикл сенсорного вузла

Існують деякі методи, розроблені підвищення енергоефективності вузлів. Наприклад, техніки агрегування даних скорочують передачу даних проміжними вузлами, проте це призводить до можливого підвищення кількості помилок в даних, що передаються, і виникнення затримок при їх передачі.

Іншою актуальною проблемою при побудові та використанні БСВ є необхідність у досить великій кількості вузлів, необхідних для підтримки продуктивності мережі. Як правило, при розгортанні БСВ вузли розташовуються таким чином, щоб покрити всю область моніторингу. У той же час вони повинні мати можливість з'єднання з іншими вузлами для обміну даними. Часто кількість необхідних вузлів, для збереження безперервного з'єднання в мережі в кілька разів більше кількості, необхідної для підтримки оптимального покриття. Мова йде про тисячі вузлів для підтримки з'єднання у співвідношенні із сотнями вузлів, необхідних для покриття.

2.4 Стандарт IEEE 802.15.1 и Bluetooth

Bluetooth был разработан как беспроводная технология малого радиуса действия, обладающая низкой стоимостью и низким энергопотреблением, которая будет использоваться для обеспечения связи между портативными

устройствами и настольными компьютерами в качестве замены кабеля. Приемопередатчики Bluetooth работают в нелицензируемом 2,4 ГГц ISM радиодиапазоне. Bluetooth использует псевдослучайную перестройку рабочей частоты (FHSS) с частотой 1600 hops/s. На рисунке 2.8 приведены самые распространенные в наше время стандарты беспроводной связи, а также схематически отмечено их соотношение по скорости передачи данных и радиусу действия.

Bluetooth був розроблений як бездротова технологія малого радіусу дії, що володіє низькою вартістю та низьким енергоспоживанням, яка використовуватиметься для забезпечення зв'язку між портативними пристроями та настільними комп'ютерами як заміна кабелю. Приймачі Bluetooth працюють у неліцензійному 2,4 ГГц ISM радіодіапазоні. Bluetooth використовує псевдовипадкову перебудову робочої частоти (FHSS) із частотою 1600 hops/s. На малюнку 2.8 наведено найпоширеніші в наш час стандарти бездротового зв'язку, а також схематично зазначено їх співвідношення швидкості передачі даних і радіусу дії.

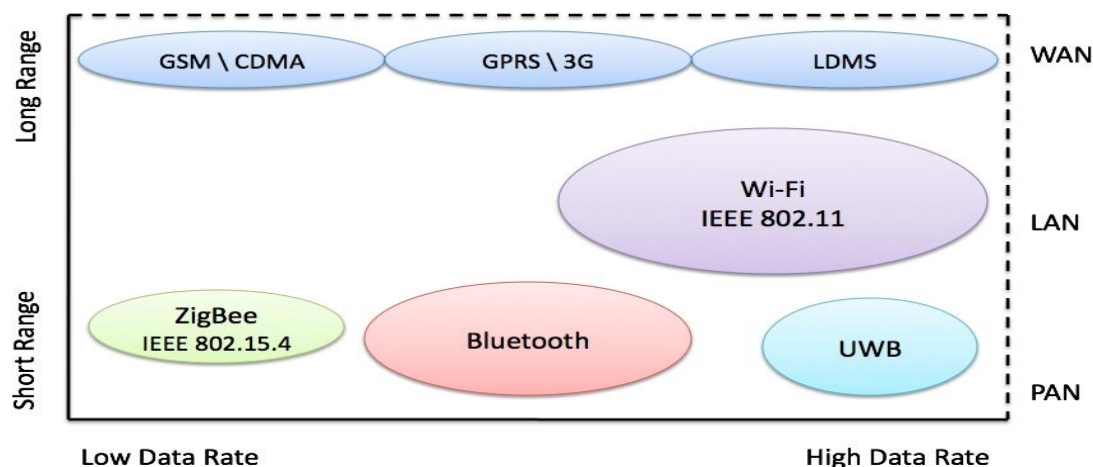


Рисунок 2.7 – Стандарти бездротового зв'язку

2.5 Стандарт IEEE 802.15.4 и ZigBee

Альянс ZigBee був утворений у 2002 році шляхом об'єднання низки компаній. Метою даного альянсу була розробка технології моніторингу та

контролю, яка була б достатньо надійною, мала низьку вартість і енергоспоживання, і підтримувала створення бездротової мережі з використанням відкритого глобального стандарту. Також незабаром після утворення альянсу четверта цільова група робочої групи IEEE 802.15 почала працювати над стандартом для створення WPAN з низькою швидкістю передачі даних. В результаті співпраці IEEE та ZigBee Alliance було вирішено, що ZigBee стане комерційною назвою технології.

Потенційні сфери застосування стандарту IEEE 802.15.4 включають бездротові сенсорні мережі, пристрої дистанційного керування, інтерактивні іграшки та багато іншого. Стандарт визначає два фізичні рівні широкосмугової модуляції з прямим розширенням спектра (DSSS) та використання трьох смуг частот з безкоштовною ліцензією. Одним з них є 868/915МГц і використовує смугу 868-870МГц з одним каналом та 902-928МГц смуги з десятьма каналами. Це дозволяє досягти швидкості передачі на рівні 20 кілобіт/сек. у смузі 868-870МГц та 40 кілобіт/сек. у смузі 902-928МГц. Інший рівень розташовується на частоті 2.4ГГц і використовує діапазон частот 2,4 - 2.4835ГГц з шістнадцятьма каналами, завдяки чому може досягатися швидкість передачі близько 250 кілобіт/сек.

Стандарт 802.15.4 підтримує два режими адресації, 16-бітову коротку і 64-бітову IEEE адресацію. Фізичний рівень також має функції індикації якості лінії зв'язку, моніторингу рівня енергії передавача та оцінки чистоти каналу. Підтримується максимальний розмір пакета 128 байт. Шар MAC використовує повне квітування для забезпечення надійності та множинний доступ з контролем несучої та уникненням колізій (CSMA-CA) для доступу до каналу.

ZigBee визначає три програмні рівні у верхній частині фізичного та MAC-802.15.4 рівнів, а саме мережі, безпеки та застосування. Мережевий рівень підтримує топології зірка, сітка, дерево, кластерні топології. На малюнку 2.8 схематично зображено приклади цих топологій.

Стандарт 802.15.4 визначає два типи пристроїв, повнофункціональні

пристрої (FFD), що мають можливість маршрутизації даних, та пристрої з урізаною функціональністю (RFD) без підтримки даного функціоналу. Стандарт також визначає, що мережа повинна координуватись принаймні одним повнофункціональним пристроєм.

Топологія зірка (Star) сприяє тривалому терміну служби батареї, оскільки кожен пристрій з урізаною функціональністю підключений безпосередньо до координатора. Топологія сітка (Mesh) або точка-точка (Point-to-point) забезпечує надійність і масштабованість, оскільки всі вузли є повнофункціональними і, отже, можуть бути пов'язані між собою, що уможливлює використання кількох шляхів маршрутизації. Топологія кластер-дерево (cluster-tree) поєднує в собі аспекти топологій зірка та сітка, що сприяє забезпеченню тривалого терміну служби батарей, а також підвищує надійність та масштабованість.

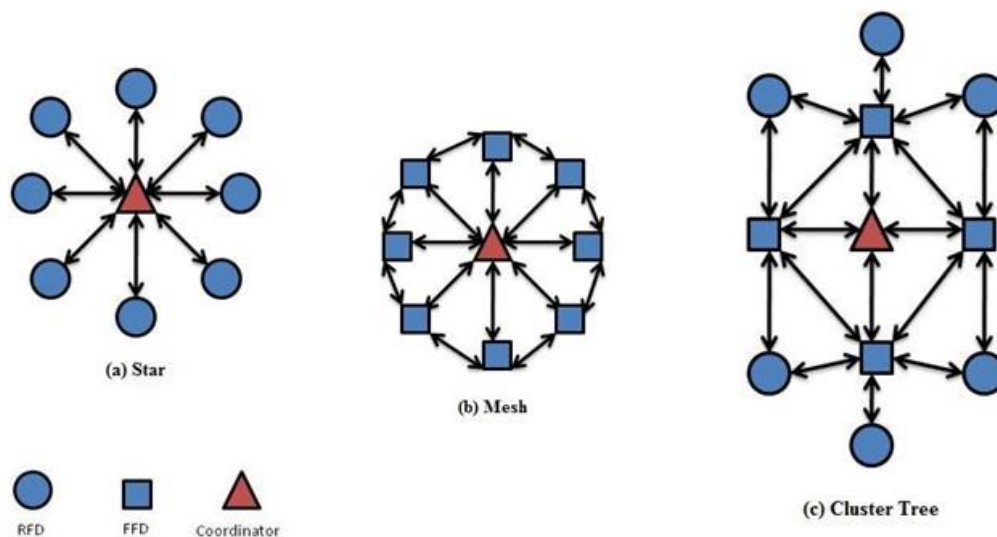


Рисунок 2.8 – Приклади топологій ZigBee

Протокол маршрутизації, що використовується в технології ZigBee, може бути заснований на протоколі динамічної маршрутизації для мобільних ad-hoc мереж (AODV), протоколі Motorola Cluster-Tree або деяких інших.

Протокол AODV це досить поширений протокол маршрутизації ad-hoc мереж, що працює за принципом моделі запитів. На рівні безпеки додана можливість шифрувати кадри рівня MAC за допомогою 32, 64 або 128-

бітного симетричний алгоритм блокового шифрування Advanced Encryption Standard (AES). Рівень додатків визначає профілі, спрямовані на забезпечення сумісності, що також дає можливість вузлам визначати які інші вузли знаходяться в безпосередній близькості, і дозволяє зіставляти пристрої, ґрунтуючись на сервісах, що надаються.

3 ДАТЧИКИ

Датчики є складними пристроями, що найчастіше використовуються для виявлення і реагування на електричні або оптичні сигнали. Датчики перетворюють фізичні параметри (наприклад: температуру, вологість, швидкість і т.д.) сигнал, який може бути виміряний електрично. Ртуть, що використовується у скляних термометрах, при зміні температури розширюється та стискається. Цей процес надалі використовується оператором, що знімає показання, для визначення вимірної температури шляхом знаходження відповідності довжини ртутного стовпця та градування каліброваної скляної трубки.

3.1 Температурні датчики

Датчики цього типу збирають інформацію про температуру від джерела і перетворюють на форму, придатну в подальшому для розпізнавання іншим пристроєм або особою, що знімає показання. Найкращою ілюстрацією датчика температури є скляний ртутний термометр, в якому ртуть розширюється і стискається в залежності від змін температури навколишнього середовища. Для вимірювання температури глядачем спостерігається положення ртуті щодо градуйованої шкали термометра.

На рисунку 3.1 зображено типовий датчик температури

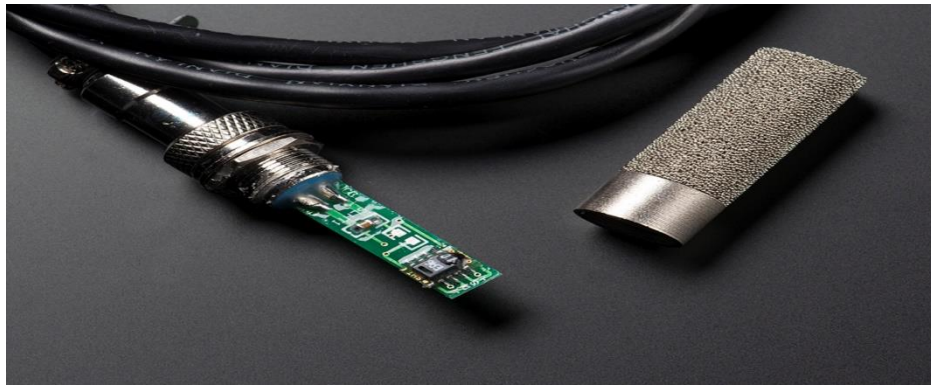


Рисунок 3.1 – Датчик температури

Пристрій, отриманий в результаті об'єднання датчика, аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), аналогового інтерфейсу та інтерфейсної шини в одному корпусі називається інтелектуальний датчик. Специфікація IEEE 1451.2 визначає інтелектуальний датчик як датчик, що забезпечує додаткові функції крім необхідних формування правильного подання сприймається чи регульованої величини. Ця функція, як правило, полегшує інтеграцію перетворювача, що застосовується в мережному середовищі. Якщо об'єднати в одному чіпі всі функції, починаючи з датчика до інтерфейсної шини, ми отримаємо інтегрований інтелектуальний датчик

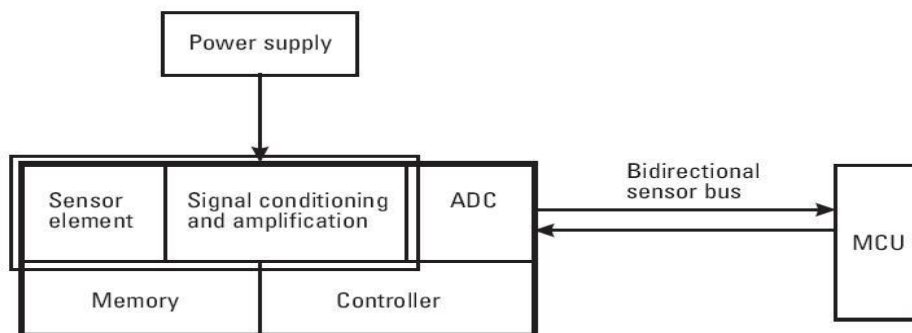


Рисунок 3.2 – Модель інтелектуального датчика

Найчастіше інтелектуальний датчик складається з шести основних елементів, що схематично зображено малюнку 3.2. Крім сенсорного вимірювального елемента з необхідною обв'язкою і підсилювальними елементами, в інтелектуальний датчик також включені аналогово-цифровий

$$d(s_j, i) = \sqrt{(x_{sj} - x_i)^2 + (y_{sj} - y_i)^2}.$$

перетворювач, контролер і елемент пам'яті. Отриманий сигнал, після перетворення цифрову форму, може бути переданий далі по двонаправленій шині з використанням декількох протоколів зв'язку. Доцільним є скорочення числа дискретних елементів зменшення форм-фактора, кількості і вартості компонентів, внутрішніх сполук, і навіть вартості сборки.

3.2 Датчики вологості

Датчики вологості використовуються для визначення вмісту вологи у навколишньому середовищі. Вологість одна із основних показників загальних умов. Контроль абсолютної та відносної вологості дуже важливий у харчовій та електронній промисловості, а також у різних галузях виробничої галузі. У багатьох випадках визначення вологості матеріалів також є дуже важливим завданням, наприклад, вологість ґрунту виступає принципово важливим параметром для здійснення діяльності в рослинництві та інших галузях сільського господарства. Відсоток вологості, що міститься в зерні, істотно впливає на ринкову вартість цього зерна, оскільки при перевищенні регламентованого діапазону воно буде продаватися за заниженою вартістю.

Таким чином, надійний і точний спосіб визначення вологи, що міститься в зерні, допоможе фермерам контролювати свої посіви. За допомогою засобів моніторингу фермери можуть сушити зерно до досягнення кращого вмісту вологи. Визначення вологості ґрунту використовується для оцінки будівельних майданчиків та ландшафтних ділянок, при видобутку корисних копалин, контролю лісових масивів, а також сільськогосподарських районів.

Моніторинг вмісту вологи у ґрунті дозволить фермерам адаптувати свою діяльність з метою досягнення оптимальної врожайності сільськогосподарських культур.

Найбільш поширеною проблемою з датчиками вологості при їх

використанні в сільському господарстві, і, зокрема, галузі рослинництва, є генерація ними великого обсягу даних, що підлягають передачі та подальшій обробці.

Цей процес вимагає витрат великої кількості енергії при невеликій ємності батареї вузла бездротової сенсорної мережі. Також існує проблема корозії роз'ємів через підвищену вологість, екстремальні або різкі перепади температури і т.д.

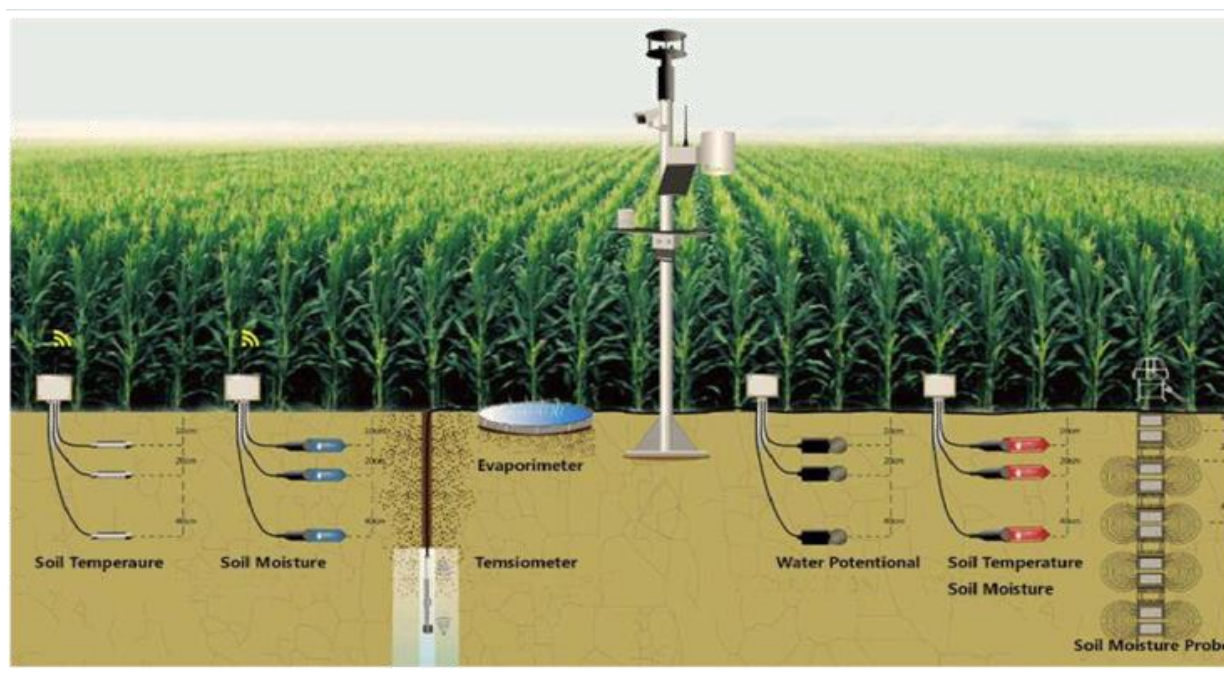


Рисунок 3.3 – Схема установки в ґрунт інтелектуальних датчиків вологості та температури

На рисунку 3.4 зображено електричний датчик із сенсором ємнісного типу в одному корпусі з інтелектуальним датчиком вологості ґрунту, що вимірює електричну ємність з подальшою передачею отриманої інформації у вбудований процесор. На малюнку 3.4 зображено електричний датчик із сенсором ємнісного типу в одному корпусі з інтелектуальним датчиком вологості ґрунту, що вимірює електричну ємність з передачею отриманої інформації у вбудований процесор.



Рисунок 3.4 – Сенсорний вузол БСМ з датчиками вологості та

Найбільш поширеною проблемою з датчиками вологості при їх використанні в сільському господарстві, і, зокрема, галузі рослинництва, є генерація ними великого обсягу даних, що підлягають передачі та подальшій обробці.

Цей процес вимагає витрат великої кількості енергії при невеликій ємності батареї вузла бездротової сенсорної мережі. Також існує проблема корозії роз'ємів через підвищену вологість, екстремальні або різкі перепади температури і т.д.

4.ПРОТОКОЛИ МАРШРУТИЗАЦІЇ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

4.1 Фактори вибору протоколу маршрутизації БСМ

Тривалість функціонування та безперебійність роботи мережі є двома основними факторами, які мають бути обов'язково враховані при виборі протоколу маршрутизації БСМ. Однак існує й безліч інших факторів, які також мають бути розглянуті. До них відносяться безвідмовність, масштабованість, енергоспоживання мережі, спосіб розгортання вузлів на території, спосіб передачі інформації та подання даних, агрегування даних та якість обслуговування.

Безвідмовність є дуже важливим фактором в БСМ, так як сенсорні вузли досить часто схильні до збоїв і відмов з безлічі різних причин, таких як вплив навколишнього середовища, виснаження джерел енергії або навіть фізичні збитки. Однак подібні збої в роботі вузлів та пошкодження мережі ні в якому разі не повинні призводити до втрати даних та ставити під загрозу її повноцінне функціонування. Щоб уникнути подібних сценаріїв, протокол маршрутизації повинен мати можливість перенаправляти пакети в обхід несправного вузла при виявленні його відмови або збою в роботі.

Масштабованість може бути визначена як можливість мережі адаптуватися до збільшення розмірів мережі. Кількість вузлів у БСМ може коливатися від кількох одиниць до кількох тисяч. Протокол маршрутизації повинен мати можливість ефективно працювати з будь-якою кількістю вузлів та підтримувати динамічне приєднання нових вузлів без необхідності переустановки всієї мережі.

Управління енергоспоживанням сенсорних вузлів відбувається за рахунок оптимальної комп'ютерної обробки та передачі даних. Витрата енергії також може бути мінімізована за допомогою ефективного алгоритму маршрутизації. Зменшення витрат енергії під час передачі інформації може досягатися зменшенням кількості пакетів, що проходять через мережу, обмеження їх розміру, а також шляхом обмеження кількості завдань, що

виконуються кожним окремим вузлом мережі. Втрати енергії у стані очікування можуть бути зведені до мінімуму за допомогою ефективного алгоритму планування сну.

Агрегація даних допомагає запобігти дублюванню даних у мережі. Так як БСМ мають високу густину розміщення, сенсорний вузол може отримувати ідентичні дані від кількох сусідніх вузлів одночасно. Подібні багаторазові передачі також призводять до втрат енергії. Агрегування даних може бути реалізовано за допомогою усереднення, заборони дублювання даних або методу максимумів-мінімумів. Агрегація даних з використанням максимумів-мінімумів та усереднення також називається узагальненням даних. У разі дані, одержувані від сусідніх вузлів зіставляються, і лише максимальне, мінімальне чи середнє значення з усіх отриманих передаються далі одному повідомленні.

Заборона дублювання даних - це найпростіший вид агрегування даних, у якому вузол відкидає дані, ідентичні отриманим раніше. Агрегування даних може зменшити кількість повідомлень, що передаються через мережу, але даних підхід може призвести до виникнення затримок, так як вузли повинні чекати отримання даних від всіх сусідніх вузлів до передачі об'єднаних даних. Якість обслуговування - це фактор, що залежить від затримок та надійності мережі. Виникнення затримок небажано за будь-якого типу мережі, особливо у разі наявності у ній критично важливих даних, передача яких має відбуватися у реальному масштабі часу.

Надійність може бути визначена як здатність мережі працювати ефективно за будь-яких умов. Усі вищеписані чинники прямо чи опосередковано впливають на надійність і безвідмовність роботи мережі, отже, це найважливіші параметри, які слід враховувати під час виборів протоколу маршрутизації БСМ.

4.2 Класифікація протоколів маршрутизації БСМ

Класифікація протоколів маршрутизації БСМ проводиться залежно від

принципу пошуку маршруту, структури мережі та ініціатора встановлення з'єднання. Класифікацію протоколів маршрутизації БСС наведено на малюнку 4.1.

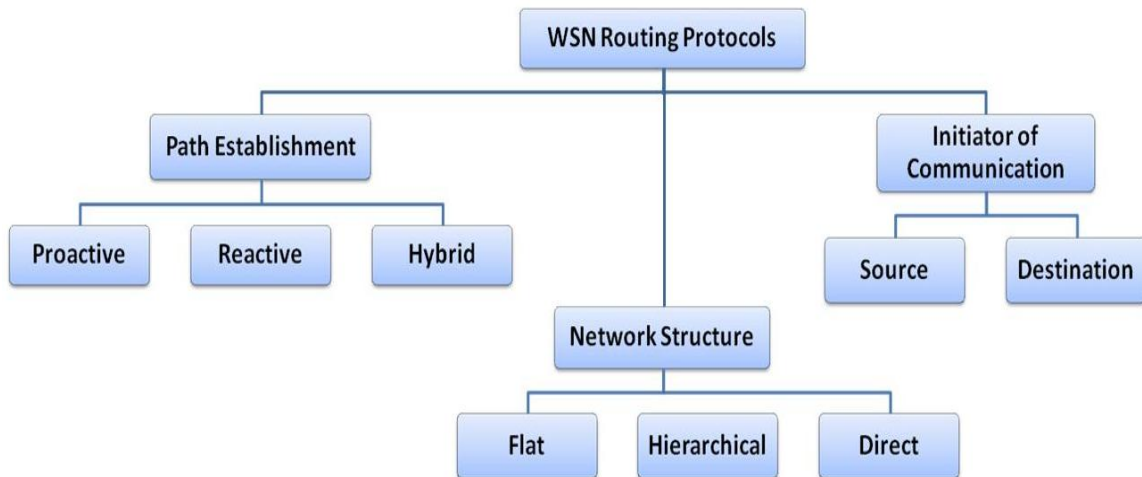


Рисунок 4.1 – Класифікація протоколів маршрутизації БСМ

Залежно від принципу пошуку шлях маршрутизації мережі може бути прокладений одним із трьох способів, а саме: проактивним (proactive), реактивним (reactive) чи гібридним (hybrid).

При використанні проактивних протоколів усі маршрути обчислюються заздалегідь та зберігаються у таблиці маршрутизації кожного вузла. Таким чином, зміни маршруту повинні бути поширені по всій мережі. Проактивні протоколи не є переважними у БСМ з високою щільністю розміщення вузлів, оскільки при такому підході збільшуються накладні витрати для підтримки актуальності таблиць маршрутизації у кожному сенсорному вузлі мережі. При використанні реактивних протоколів маршрути обчислюються лише на момент їхньої необхідності. Гібридні протоколи є комбінацією проактивних та реактивних протоколів.

БСМ також можуть бути класифіковані за типом структури мережі. За цим принципом виділяють плоскі (flat), ієрархічні (hierarchical) та

безпосередні (direct) протоколи. У плоских протоколах маршрутизації всі вузли в мережі мають однакові можливості і можуть однаково брати участь у задачах маршрутизації. Однак найближчі до базової станції вузли, як правило, задіяні більшою мірою, оскільки пакети всієї мережі надсилаються через них.

В ієрархічних протоколах мережа розбивається на кластери, у кожному з яких є свій вузол, що маршрутизує. При використанні цього підходу всі елементи кластера відправляють повідомлення тільки до вузла, що маршрутизує, який, у свою чергу, пересилає всі повідомлення свого кластера вузлу-шлюзу. При використанні безпосередніх комунікаційних протоколів сенсорні вузли БСМ надсилають пакети безпосередньо до базової станції, отже повинні розташовуватися щодо неї у сфері досяжності прийому та передачі інформації.

З'єднання БСМ може встановлюватися як джерелом (source), так і приймачем (destination) даних. У протоколах з ініціалізацією з'єднання джерелом вузли передають дані базової станції відразу після проведення вимірювань. Такі протоколи використовують тимчасовий чи подійний підхід складання та надсилання звітності звіту даних. У свою чергу, при використанні протоколів, в яких з'єднання ініціалізується приймачем, використовується запитовий підхід до звітності, коли сенсорні вузли БСМ надсилають інформацію у відповідь на запити, які отримують приймач даних. Більшість протоколів маршрутизації можна розділити на плоскі, ієрархічні чи гібридні на найвищому рівні, які, своєю чергою, можуть згодом поділятися на протоколи з ініціалізацією з'єднання джерелом чи приймачем. Також, БСМ найчастіше використовується реактивний спосіб вибору шляху маршрутизації мережі.

4.3 Плоскі протоколи маршрутизації

Серед безлічі плоских протоколів маршрутизації як приклад можна

виділити найбільш значущу групу SPIN - сенсорні протоколи отримання інформації, які працюють за допомогою взаємодії шляхом попереднього узгодження (Sensor Protocols for Information via Negotiation). Перевагами таких протоколів маршрутизації є масштабованість та простота.

Плоскі мережі масштабуються, тому що кожен вузол однаково бере участь у задачі маршрутизації, і, для її реалізації, потребує лише інформації про безпосередні вузли-сусіди. У мережі, що використовують плоскі протоколи маршрутизації, можуть бути легко додані нові сенсорні вузли. Ці протоколи не потребують вузлів маршрутизації та складних алгоритмів.

Основним недоліком плоских протоколів маршрутизації є створення гарячих точок (hotspot). Вузли, розташовані в безпосередній близькості до базової станції, витратять свої джерела енергії швидше. Цього неможливо уникнути через те, що всі пакети зрештою мають бути відправлені до базової станції. Однак у мережах із використанням кількох базових станцій ця проблема практично усувається. Також існує проблема розриву з'єднання у разі відмови вузла, що з'єднує окрему ділянку з іншою мережею, внаслідок чого деякі ділянки мережі можуть стати недоступними.

4.4 Ієрархічні протоколи маршрутизації

В ієрархічних протоколах процес пошуку шляху маршрутизації мережі зазвичай не враховується, оскільки всі сенсорні вузли, що належать до єдиного кластера, передають дані лише вузлу, що маршрутизує, використовуючи підхід single-hop. Більшість ієрархічних протоколів маршрутизації дотримуються цієї процедури, серед яких найбільш часто використовуються такі як LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy), HEAR (Hierarchical Energy Aware Routing), APTEEN (Adaptive Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol) та інші.

Переваги ієрархічної маршрутизації полягають у локалізованому енергоспоживанні та агрегації даних. Дані з окремого кластера збираються

вузлом, що маршрутизує, а потім відправляються базової станції одним пакетом.

Таким чином, зменшується загальне енергоспоживання сенсорними вузлами кластера. Однак, у такому разі проявляються такі недоліки ієрархічної маршрутизації: виникнення «гарячих точок» (hotspot), спеціальні вимоги до обладнання вузлів, що маршрутизують, складність реалізації та відсутність можливості масштабування без ускладнення мережі.

Маршрутизуючі вузли споживають більше енергії, ніж інші вузли мережі, внаслідок чого виникає виникнення «гарячих точок». Більшість ієрархічних протоколів вимагають оснащення вузлів, що маршрутизують, більш якісним радіобладнанням, більш продуктивною апаратурою, покращеною системою енергозабезпечення тощо.

При використанні ієрархічних протоколів також відсутня можливість вільного масштабування мережі, тому що зі збільшенням розміру мережі відповідно збільшується кількість вузлів, що маршрутизують.

4.5 Порівняння плоских та ієрархічних протоколів маршрутизації

Грунтуючись на раніше описаних перевагах і недоліках протоколів маршрутизації, можна зробити висновок, що плоска структура мережі краща для БСС, ніж ієрархічна, оскільки дозволяє використовувати простий і масштабований протокол маршрутизації з меншим енергоспоживанням і кількістю повідомлень в мережі.

5 РОЗМІЩЕННЯ ЯКІРНИХ ВУЗЛІВ

Розглянемо множину сенсорних вузлів, розподілених по площі. Нехай невелика частина з них - якірні пристрої, які знають своє положення. Вони можуть бути оснащені GPS або розміщені точно в певних місцях із запрограмованою в них інформацією про місцезнаходження. Завдання полягає в тому, щоб локалізувати інші датчики за допомогою цих якорів. При випадковому розгортанні локалізація вузлів без вихідних координат ускладнюється, але для вирішення завдання використовують спеціальні вузли, які можуть визначати розташування інших вузлів автоматично. Ці конкретні вузли називають маяковими чи якірними, вони оснащені системою GPS й використовуються практично всіма методами локалізації у глобальних координатах. Число якірних вузлів повинно бути таким, щоб забезпечити двійкову адресацію для всіх вузлів БСМ. Кількість таких якірних вузлів повинно бути не менше числа Хеммінга в залежності від загального числа вузлів мережі. Наприклад, для тисячі сенсорів достатньо десяти якірних вузлів. Положення сенсорних вузлів на території, що відстежується, вкрай необхідні для енергоефективного та економічно вигідного розгортання БСМ. Позиції датчиків на контрольованій ділянці повинні забезпечувати достатній ступінь покриття при збереженні тривалого терміну служби, що може бути здійснено шляхом використання ефективного механізму планування, організації та обмеження кількості задіяних сенсорних вузлів. Подібна бездротова сенсорна мережа, реалізована на основі фіксованого числа вузлів, може ефективно застосовуватися в рослинництві для високоточного контролю сільгоспугідь.

У роботі передбачається використання алгоритму розташування вузлів БСМ, відомого як territorial predator scent marking algorithm (TPSMA). Цей алгоритм використовує біологічно засновану техніку оптимізації покриття території датчиками, яка імітує поведінку територіальних хижаків у процесі

мічення (маркування) контрольованої території. Алгоритм TPSMA використовує цільову функцію забезпечення максимального покриття та передбачає максимально можливе збільшення тривалості функціонування мережі.

5.1. Поведінковий алгоритм TPSMA

Деякі види хижаків, такі як тигри, ведмеді та собаки, можуть бути визначені як територіальні через наявність у них інстинктивного поведінкового акта систематичного захисту певної території від тварин інших видів. Територія вибирається з певних чинників, у тому числі найчастішим і значним є контроль розподілу харчових ресурсів. Більшість територіальних хижаків використовують свій запах позначення меж контрольованої території, що є міткою як інших хижаків, так членів їх популяції. Подібний спосіб комунікації дозволяє цим тваринам залишати повідомлення, що мають відносну довговічність. Крім того, він також може бути використаний у нічний час, під землею, або в густій рослинності. Запахові мітки можуть полегшити комунікацію тварин, виконуючи чотири різні функції, такі як допомога в розпізнаванні родичів, репродуктивна, тимчасова або просторова сигналізація, а також захист ресурсів. Зіставлення запахів дозволяє хижакам відрізнити членів своєї популяції, які у межах контрольованої території, від самозванців, знижуючи ймовірність несподіваних сутичок з іншими тваринами. Подібні мітки можуть бути залишені за допомогою сечовипускання, дефекації, нанесенням запаху при терті про навколишні предмети, мітками та подряпинами на деревах, зминанням рослинності. Наприклад, самці тигрів і собак мітять дерева за допомогою сечовипускання та виділенням секрету із спеціальних пахучих залоз, таким чином відзначаючи маршрути обходу території.

Ведмеді, а також хижаки сімейства котячих, мітять об'єкти навколишнього середовища за допомогою тертя головою, боками, хвостом та

підшвами лап, оскільки саме в цих частинах тіла розташовані залози, що містять пахучий секрет.

5.2 Розміщення вузлів БСМ на основі алгоритму TPSMA

Поведінковий алгоритм TPSMA може бути взятий за основу розробки методики розміщення сенсорних вузлів, з метою досягнення таких цілей, як максимальне покриття і мінімальне енергоспоживання. В даному випадку маркування області охоплення датчиками вузла БСМ ґрунтується на поведінці хижаків, що мітять запахом контрольовану територію, виходячи з певних факторів, таких як розподіл харчових ресурсів. Сенсорний вузол, у свою чергу, ідентифікує територію, що відстежується, ґрунтуючись на зазначених територіях, за аналогією із зіставленням запахів хижаками у поведінковому алгоритмі TPSMA.

На малюнку 5.1 наведено псевдокод, що описує схему розміщення сенсорних вузлів на основі алгоритму TPSMA з цільовою функцією досягнення максимального коефіцієнта покриття.

```

Number of monitored location,  $i = 1, 2, \dots, S$ 
Number of potential location for sensor node,  $j = 1, 2, \dots, P$ 
Step 1: check if there is a sensor node located in  $j$ 
if yes  $x_j = 1$ 
else  $x_j = 0$ 
Repeat Step 1 until  $j = P$ 
Step 2:
Compute coverage level to location  $i$ ,  $f(x)$  for all respective  $j$ 
Mark territory for sensor nodes in  $j$  that has the maximum
coverage level to  $i$  (Scent marking by predator on the area
that has the highest food resources)
Repeat Step 2 until  $i = S$ 
Step 3:
Monitored locations will be monitored by sensor nodes
that are within their marked territory. (Sensor node
identifies its monitored location through scent matching)

```

Рисунок 5.1 – Псевдокод розміщення сенсорних вузлів на основі TPSMA

5.3 Модель зондування й цільова функція

Модель зондування сенсорного вузла визначає його здатність до моніторингу навколишньої території. Існує два типи моделей зондування в БСМ: двійкова та ймовірнісна модель зондування.

5.3.1 Двійкова модель зондування

У двовимірному просторі область покриття сенсорного об'єкта виглядає як кола з радіусом R_s . Припустимо, що координати вузла це (x_{s_j}, y_{s_j}) , тоді припущення про те, що вузол виявляє об'єкт, виглядає так:

$$P_{cov}(s_j, i) = \begin{cases} 1 & d(s_j, i) \leq R_s, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (5.1)$$

де $d(s_j, i)$ – Евклідова відстань між точками $i(x_i, y_i)$ та $s_j(x_{s_j}, y_{s_j})$.

Тоді як Евклідова відстань між точками i та s_j рахується таким чином:

$$(5.2)$$

5.4 Модель проектованої БСМ

На рисунку 5.2 представлено схематичне зображення контрольованої території розміром 100×100 метрів, розділеної на 16 рівних локацій.

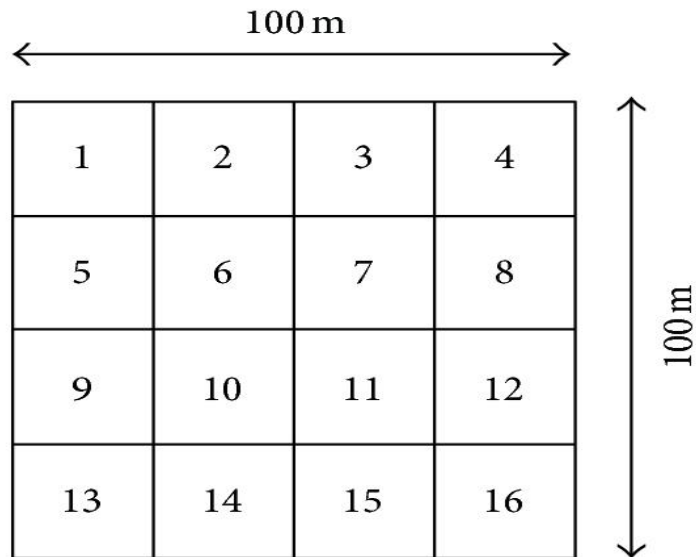


Рисунок 5.2 – Контрольований простір

У межах окремої локації може бути розміщено не більше одного вузла БСС, а в центрі кожної області розташовується точка доступу. Кожна локація може контролюватись як розташованим усередині сенсорним вузлом, так і вузлами із сусідніх контрольованих областей.

У таблиці 5.1 наведено покриття всіх 16 локацій відповідними сенсорними вузлами.

Таблица 5.1 - Контролируемые локации в соответствии с узлами БСС

Monitored location	Sensor nodes location
1	1, 2, 5, 6
2	1, 2, 3, 5, 6, 7
3	2, 3, 4, 6, 7, 8
4	3, 4, 7, 8
5	1, 2, 5, 6, 9, 10
6	1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11
7	2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12
8	3, 4, 7, 8, 11, 12
9	5, 6, 9, 10, 13, 14
10	5, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 14, 15
11	6, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 16
12	7, 8, 11, 12, 15, 16
13	9, 10, 13, 14
14	9, 10, 11, 13, 14, 15
15	10, 11, 12, 14, 15, 16
16	11, 12, 15, 16

Число сенсорних вузлів, розгорнутих у цьому контрольованому

просторі, може бути різним. Мінімальну кількість вузлів мережі можна визначити за допомогою наступного рівняння:

$$\text{Number of Sensor Nodes} = \frac{A}{3\sqrt{3}R_s^2/2}, \quad (5.7)$$

де A – площа контрольованого протранства, а R_s – радіус моніторингу сенсорного вузла. Мінімальна кількість вузлів БСС, необхідних для цієї моделі, становить приблизно 10 вузлів. Як згадувалося раніше, у межах кожної контрольованої локації може бути розташоване не більше одного вузла. Таким чином, число сенсорних вузлів, що розглядаються в цій роботі, варіюється від 10 до 16.

5.5 Результати моделювання

Моделювання проводилося за допомогою програми Matlab для демонстрації працездатності запропонованої схеми. У таблиці 5.2 наведено параметри моделювання з декількома стаціонарними сенсорними вузлами, що розгорнуті в зоні моніторингу випадковим чином.

Таблиця 5.2 – Параметри моделювання

Parameter	Value
Number of sensor nodes	10 to 16
Monitoring area	100 m × 100 m
Sensing range, R_s	20 m
Number of surveillance locations	16
Coverage threshold, C_{th}	0.9
Uncertainty in sensor detection, R_e	10 m
α_1	1
α_2	0
β_1	1
β_2	0.5

На рисунку 5.3 демонструється швидкість збіжності алгоритму TPSMA. З графіка випливає, що повне сходження було досягнуто, коли кількість ітерацій перевищила 200. Отже, надалі, при моделюванні роботи схеми доцільно розглядати 200 ітерацій.

Тест збіжності для 10 та 13 сенсорних вузлів показує, що алгоритм TPSMA сходиться після 200 ітерацій.

Таким чином, передбачається, що кількість ітерацій, необхідних для іншого числа сенсорних вузлів також становить 200.

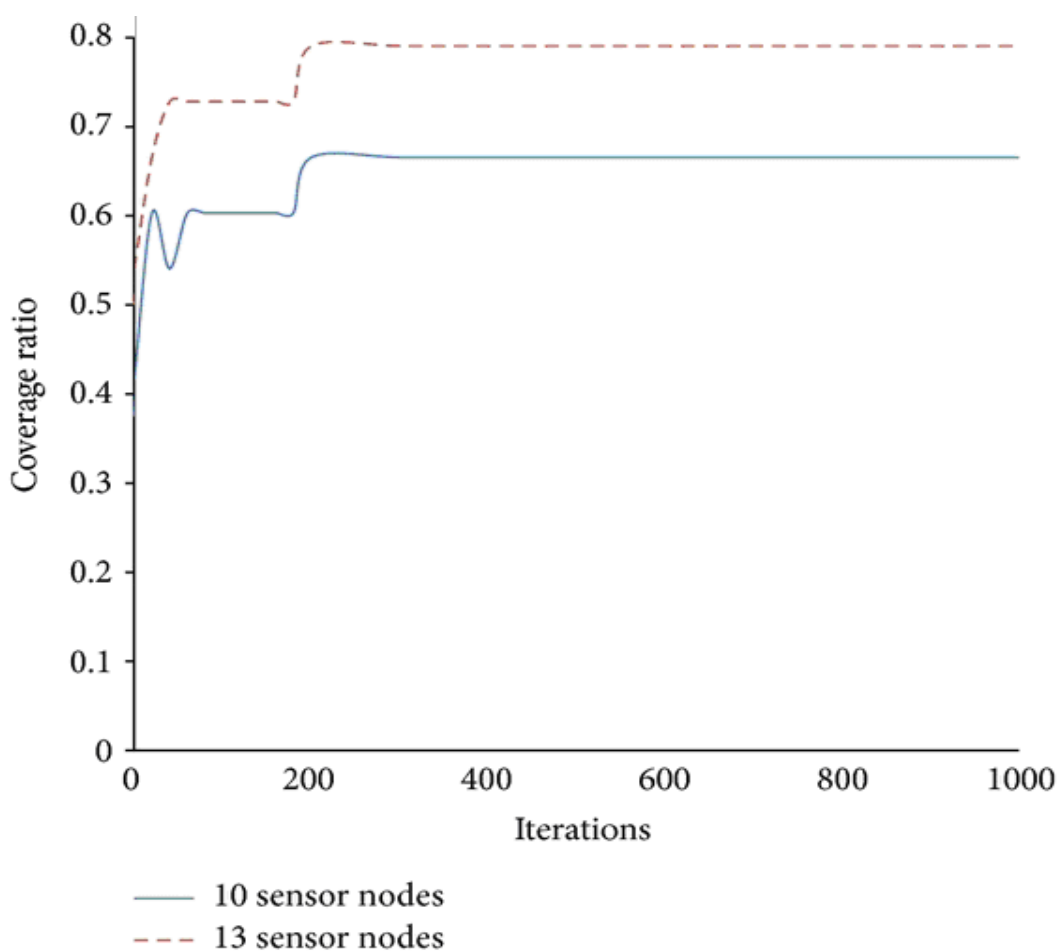


Рисунок 5.3 – Процес збіжності для 10 та 13 сенсорних вузлів

На малюнку 5.4 наведено графік коефіцієнта покриття БСМ для різної кількості вузлів.

Як і очікувалося, зі зростанням кількості датчиків коефіцієнт покриття збільшується. Однак алгоритм TPSMA може забезпечити достатнє покриття

контрольованої території при використанні меншої кількості сенсорних вузлів.

Це зв'язано з тим, що цільова функція алгоритму TPSMA, запропонованого у цій роботі, спрямовано на досягнення максимального коефіцієнта покриття.

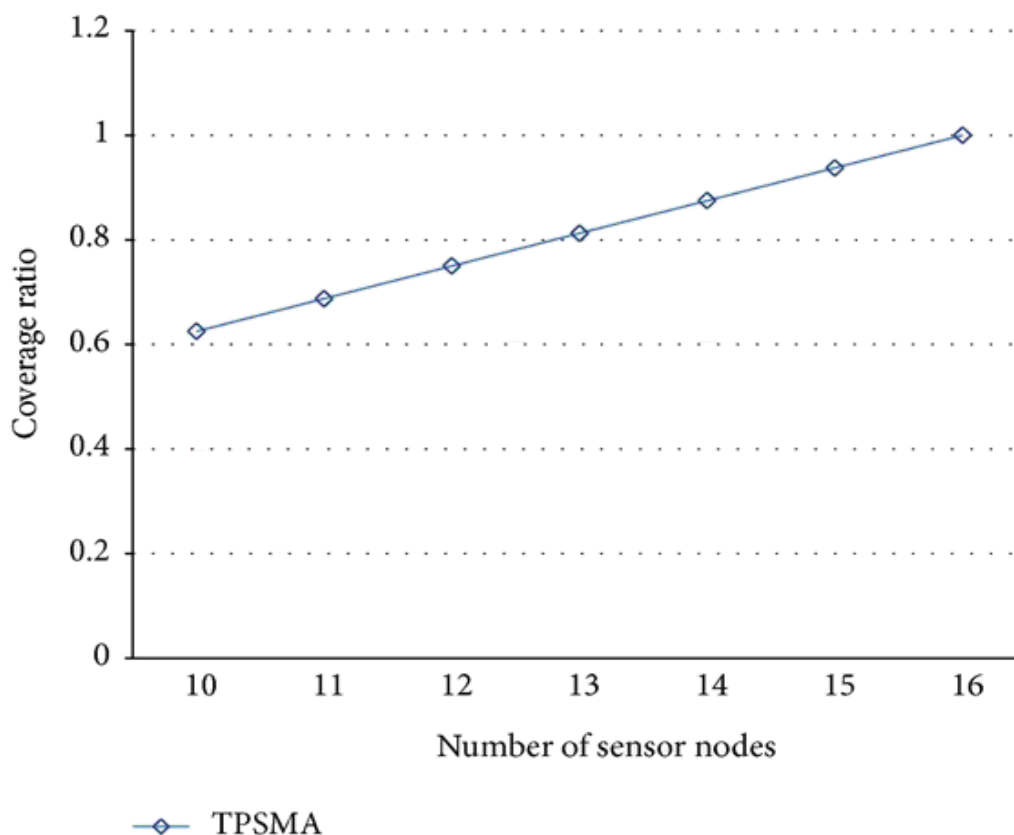


Рисунок 5.4 – Графік коефіцієнта покриття БСМ залежно від різної кількості вузлів

5.6 Розташування сенсорних вузлів

Малюнки 5.5, 5.6 та 5.7 ілюструють розташування, в межах контрольованої території, десяти, тринадцяти та шістнадцяти сенсорних вузлів відповідно.

За допомогою позначок, що формою нагадують червоні зірки, на малюнках відображені місця розташування точок доступу в кожній з контрольованих локацій.

Позначки, що формою нагадують чорні зірки, вказують реальне

розташування, розміщених випадковим чином, вузлів БСМ. Тоді як за допомогою синіх кіл схематично зображена область покриття кожного сенсорного вузла.

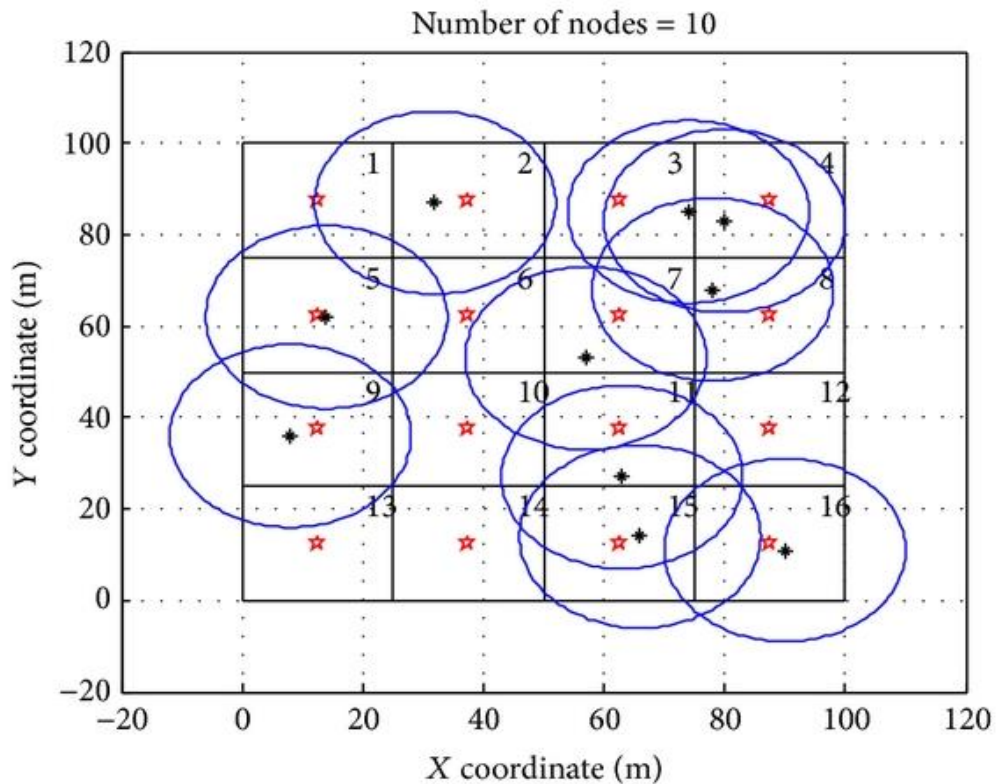


Рисунок 5.5 – Розташування десяти сенсорних вузлів

На малюнку 5.5 зображено БСМ, розгорнуту з використанням десяти сенсорних вузлів. Малюнок наочно ілюструє випадок, у якому п'ять із шістнадцяти локацій мало охоплених областю покриття датчиків будь-яких сенсорних вузлів.

Однак, при використанні вже тринадцяти вузлів БСМ, можна спостерігати досить високий рівень покриття всіх шістнадцяти локацій, що продемонстровано на рисунку 5.6.

Також, як і передбачалося раніше, всі області, що відстежуються, повністю покриті, коли БСМ розгорнута на основі шістнадцяти сенсорних вузлів, оскільки в даному випадку кожна локація обладнана сенсорним вузлом.

Розташування шістнадцяти сенсорних вузлів представлено рисунку 5.7.

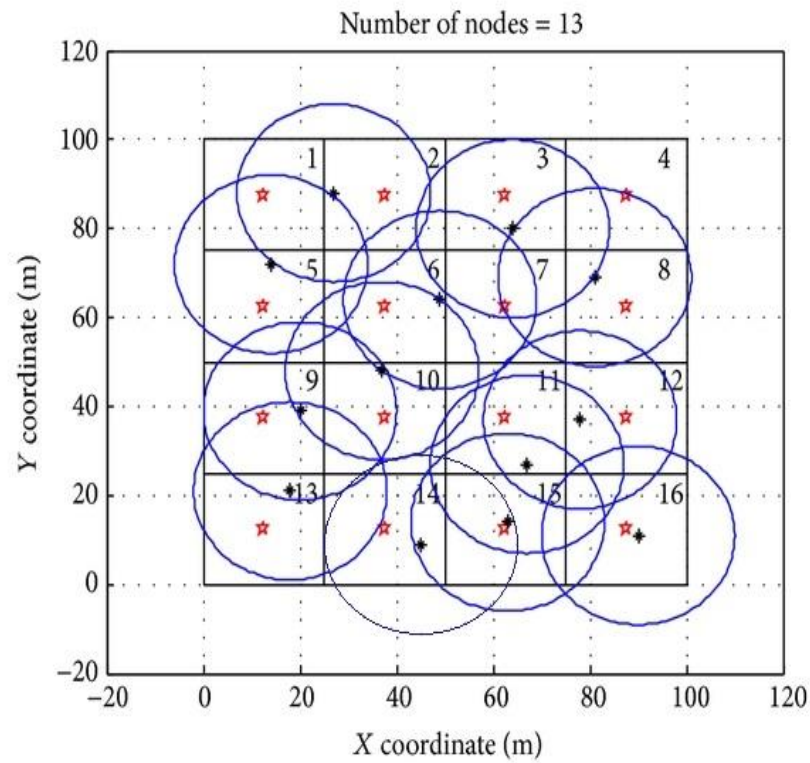


Рисунок 5.6 – Розташування тринадцяти сенсорних вузлів

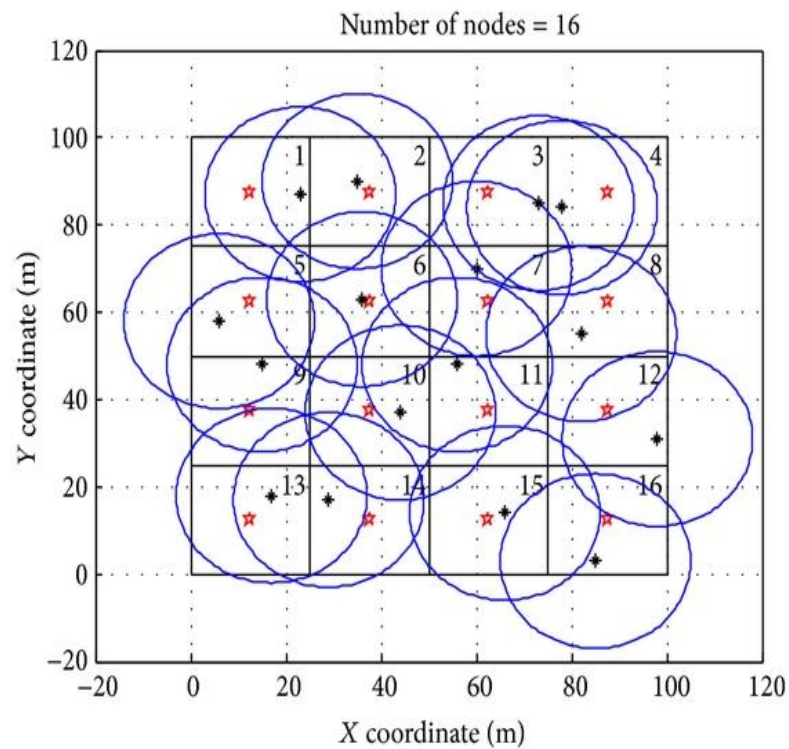


Рисунок 5.7 – Розташування шістнадцяти сенсорних вузлів

Грунтуючись на результатах, отриманих в результаті моделювання,

можна зробити наступний висновок: при використанні алгоритму TPSMA моделі БСМ, представленої в даній роботі, достатньо мати тринадцять сенсорних вузлів для забезпечення високого ступеня покриття всіх шістнадцяти локацій. Таким чином, вартість розгортання мережі буде скорочено приблизно на 20%.

Результати моделювання також підтверджують факт того, що БСМ на базі алгоритму TPSMA, розгорнутої за пропонованою схемою, підтримує кратну масштабованість і здатна забезпечити достатній ступінь покриття території при збереженні максимальної тривалості функціонування мережі.

5.7 Локалізація невідомих вузлів у БСМ

На теперішній час маємо широке застосування БСМ у багатьох сферах людської діяльності з метою автоматизації процесів збору інформації, моніторингу, контролю характеристик різноманітних технічних та природних об'єктів.

При цьому у зв'язку з обмеженими ресурсами окремих вузлів для вирішення багатьох задач необхідна кооперативна робота всіх вузлів мережі для досягнення цілі.

Одною з важливих задач є локалізації вузлів у БСМ з самоорганізацією. Вона полягає у визначенні координат індивідуальних невідомих сенсорів без використання зовнішньої інфраструктури. Задача локалізації досліджувалась у минулому у багатьох прикладних сферах, при цьому була потрібна інформація про розміщення об'єктів чи людей й для вирішення задачі було розроблено велику кількість реалізацій. Найвідомішою з них є система Global Positioning System (GPS). Однак підхід GPS не може бути застосований у БСМ у зв'язку з його вимогами до наявності великої кількості додаткової інфраструктури (наприклад, супутників) та великої вартості.

Дослідження алгоритмів розподіленої локалізації є важливою

задачею. Об'єктом дослідження є дослідження алгоритмів розподіленої локалізації та виконання цих алгоритмів. Предметом дослідження є розподілена локалізація вузлів у безпроводових сенсорних мережах.

До алгоритмів, що застосовуються у таких мережах, висувають наступні вимоги: самоорганізація (незалежність від глобальної інфраструктури), надійність (стійкість до відмов вузлів та помилок вимірювання), енергетична ефективність. Ці вимоги впливають з властивостей середовища, у яких застосовують сенсорні мережі. Вимога самоорганізації пов'язана з тим, що контроль над розміщенням кожного вузла може бути відсутній (наприклад, при розгортанні мережі з літального засобу).

Передбачається, що деякі вузли мають апріорні знання своїх позицій згідно з певною глобальною системою. Однак ці вузли мають такі самі властивості, як і інші (системи з вузлами-маяками не розглядаються). У вузлів передбачається можливість визначення відстаней до своїх безпосередніх сусідів. Добре працюють методи, що базуються на вимірюванні часу поширення сигналу при комбінації з сигналами .

Існують декілька алгоритмів, що призначені для функціонування у різних умовах: ad-hoc позиціонування, N-вузлова мультилатерація, та надійне позиціонування, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Всі вони мають подібну структуру з трьох етапів, на кожному з яких можливо застосовувати одні з багатьох алгоритмів:

1. Вимірювання відстані до безпосередніх сусідів.
2. Визначення координат вузла на основі відстаней та інформації від опорних(якірних) вузлів.
3. Уточнення позицій на основі інформації від сусідніх вузлів.

Перший етап полягає у обміні інформацією для сумісного визначення відстаней до сусідніх та опорних вузлів. На цьому етапі у жодному алгоритмі не виконуються складні обчислення, він полягає у комунікації з сусідніми вузлами. Інформація поширюється флудінгом починаючи від

опорних. При цьому постає проблема масштабування – у великих мережах інформація від певного вузла A буде передана всім іншим. Її вирішують обмежуючи поширення інформації – точні координати можливо розрахувати на основі даних від малої кількості опорних вузлів.

Самий простий алгоритм — це суми відстаней, він просто підсумовує відстань до сусіда з оголошеними ним відстанями до всіх відомих вузлів. Алгоритм починає роботу з опорних вузлів, які відправляють повідомлення із оголошенням своєї ідентичності, позиції та довжини шляху, рівною нулю. Кожен вузол, що отримує повідомлення, додає до довжини шляху виміряну відстань до сусіда, що передає це повідомлення, та передає оновлену інформацію. Якщо інформацію про певний вузол вже було передано у мережу, повторна трансляція та оновлення повідомлення дозволяється тільки у випадку, якщо оновлена довжина шляху менша, ніж передана раніше. Його недоліком є накопичення помилки у мережах з малою кількістю проміжних вузлів або низькоякісним обладнанням вимірювання відстані.

Більш складніший алгоритм - це DV-hop алгоритм. Він виконується в два етапи, перший з яких це суми відстаней, однак додатково зберігається кількість проміжних вузлів на шляху до кожного з опорних вузлів. Другий етап методу - це калібрування. При цьому координати кожного з проміжних вузлів на шляху уточнюються з урахуванням множенням середнього арифметичного значення довжини одного прольоту на шляху до опорного вузла на кількість проміжних вузлів на цьому шляху. Цей алгоритм працює на основі припущення, що відстані між вузлами будуть мати низьку дисперсію.

Це припущення відсутнє у евклідовському алгоритмі, що враховує локальну топологію. Коли вузол одержує інформацію про опорний вузол від двох різних сусідів, відстань між якими відома, він уточнює відстань на основі даних від обох сусідів. Це відбувається через механізм "голосування сусідів", що виконується при наявності третього вузла, на

основі даних якого можна перевірити коректність обчислення відстані. Другий метод спрацьовує тоді, коли є три сусідні вузли, відстані між якими відомі, що також може бути використане для уточнення позиції. Передбачається відкидання плоских трикутників, що порушують функціонування обох протоколів. У другій фазі на основі відстаней до опорних вузлів розраховуються позиції сенсорів. Для обчислення позицій використовується або мультилатерація, або простий. Найпоширеніший алгоритм - мультилатерація, форма триангуляції. На основі оцінок відстані d_i до i -того опорного вузла та відомих координат (x_i, y_i) виводиться система рівнянь.

$$\begin{aligned} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 &= d_1^2 \\ \vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 &= d_n^2 \end{aligned} \quad (5.1)$$

де (x, y) — невідомі координати.

Лінеаризувавши цю систему через віднімання останнього рівняння від перших $n - 1$, та вирішивши його методом найменших квадратів, одержимо оцінку координат. Для перевірки оцінки обчислюється залишок i .

Велике значення залишку означає високу помилку. Обчислене значення відкидається, якщо залишок більший за максимальну дальність передачі сигналу. У третій фазі відбувається уточнення позиції вузла. Як правило процедура уточнення включає трансляцію сусіднім вузлам оцінки своєї позиції та виконання мультилатерації на основі цієї інформації. Після декількох повторів похибка значно знижується.

На рисунку 5. 8 показано N-вузлова мультилатерація

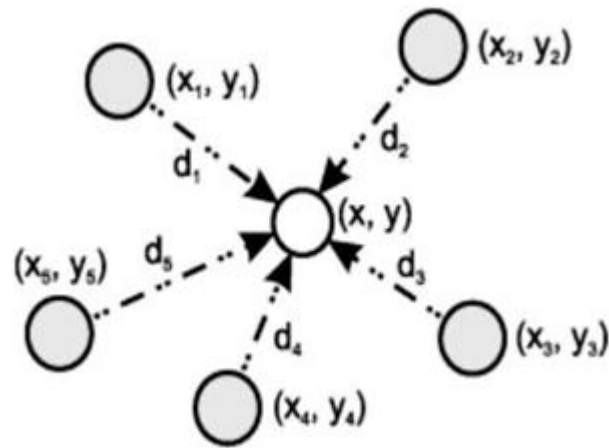


Рисунок 5. 8 - N-вузлова мультилатерация

На рис. 5.9 зображено локалізовану мережу, у виді впорядкованої топології, а також визначено всі вузли в радіусі дії.

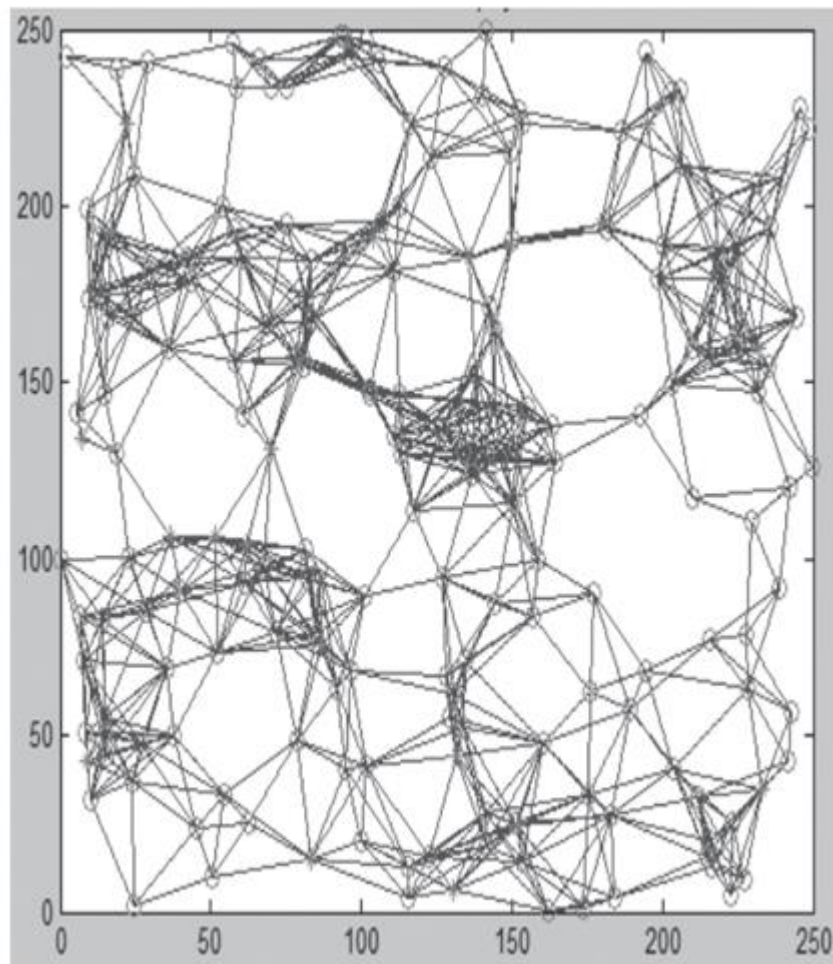


Рисунок 5. 9

На рис. 5.10 зображено розташування вузла після локалізації - кружечками (розташування вузла після локалізації та закінченнями ліній реальне розташування вузла).

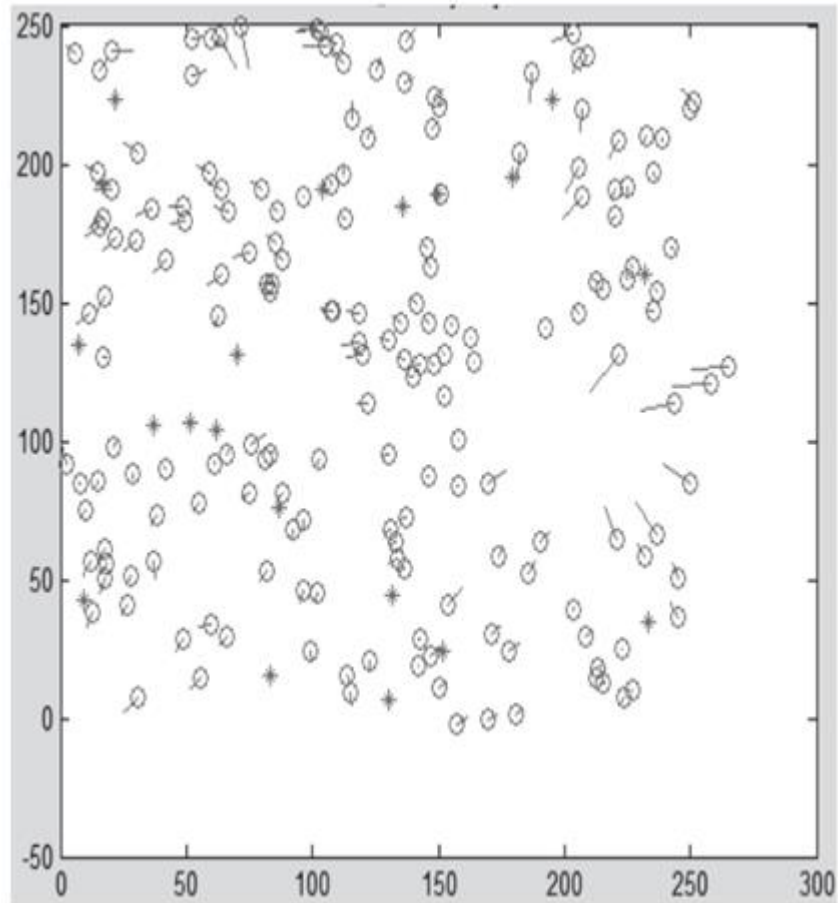


Рисунок 5. 10

6. ОПИС АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ

6.1 Сенсорні вузли та базова станція

Основними складовими елементами вузла БСС є блок обробки, блок датчиків і приймач-передавач. Деякі сенсорні вузли також можуть містити додаткові компоненти, такі як системи позиціонування, сонячні батареї, реле і т.д. Основні структурні компоненти сенсорного вузла показано малюнку 6.1.

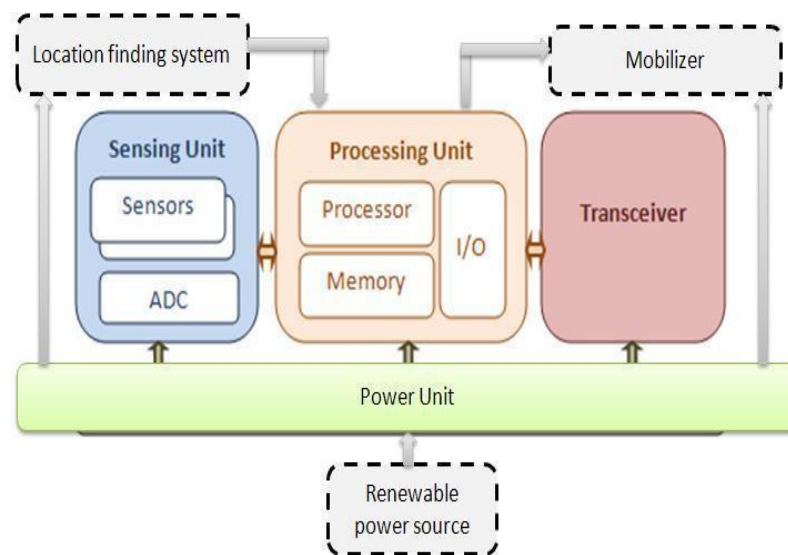


Рисунок 6.1 – Структурна модель сенсорного вузла

Кожен сенсорний вузол має блок обробки даних, до якого може бути приєднано безліч зовнішніх датчиків. Модуль обробки має безпосередній доступ до всіх датчиків здійснення збору даних. Сенсорний вузол зазвичай живиться від двох елементів живлення, а також оснащений радіомодулем, який використовується для обміну інформацією з базовою станцією та іншими вузлами мережі.

Блок обробки складається з процесора, системи введення/виводу та пам'яті. Цей блок відповідає за керування та виконання безпосередніх завдань сенсорного блоку. Блок зондування, як правило, складається з набору датчиків та аналого-цифрового перетворювача (АЦП). АЦП перетворює

аналогові дані з датчиків на цифрові, які надалі можуть бути оброблені процесором. Передавач відповідає за підключення вузла до мережі, використовуючи передачу даних у радіочастотному діапазоні. Кожен сенсорний вузол циклічно збирає дані зі свого набору датчиків і передає їх сусідньому вузлу або відправляє до базової станції.

В даний час існує досить широкий вибір сенсорних вузлів різних виробників та з різними характеристиками. Як приклади таких пристроїв можна навести модулі виробництва компанії Cirronet, оснащені широким набором апаратних інтерфейсів. Ці модулі виконані на базі приймально-передавача JD від Chipcon CC2420 та мікроконтролерів ATmega128 компанії Atmel. Компанія MaxStream випускає аналогічні продукти, що складаються з радіомодуля та контролера компанії Freescale, об'єднаних на одній платі розміром 30x20 мм.

Однак, для даного проекту були обрані моти Crossbow's TelosB, що мають високий рівень надійності, відмінну щільність інтеграції (вбудовані антени, датчики і т.д.) і вкрай низький рівень споживаної енергії (1,8 мА в активному режимі, 5.1 мкА в режимі очікування). До переваг цих мотів можна віднести можливість програмування USB, сумісність зі стандартом IEEE 802.15.4, наявність високошвидкісного радіомодуля з вбудованою антеною та енергоефективного мікроконтролера. Також вони за замовчуванням оснащені вбудованими датчиками вологості та температури.

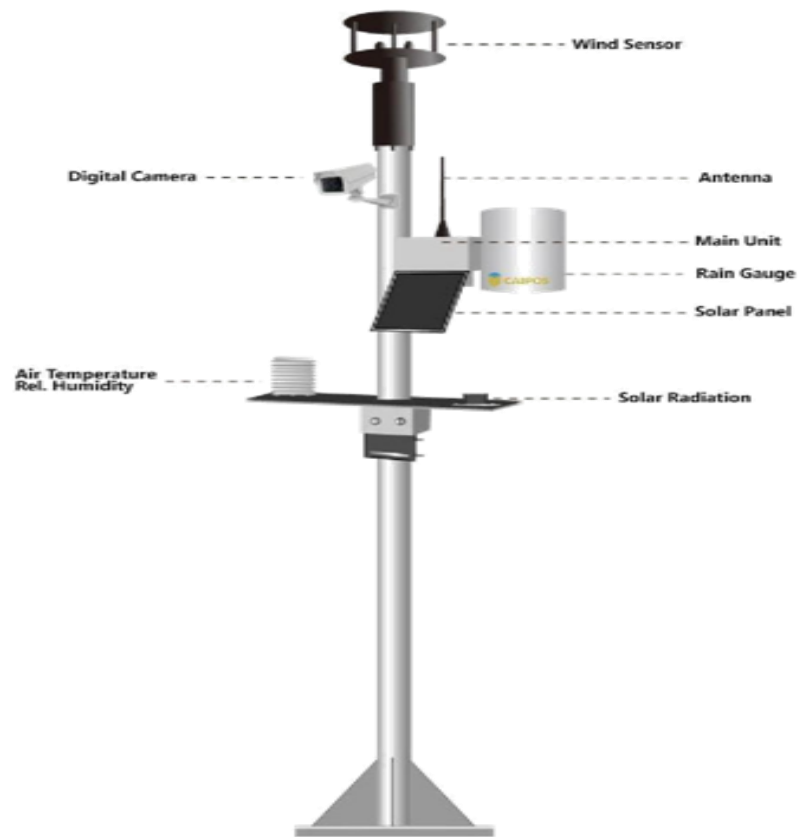


Рисунок 6.2 – Базова станція системи Cairo

Для захисту від пошкоджень та несанкціонованого доступу, у разі розгортання БСМ на відкритих ділянках, базова станція може встановлюватись у захищеному місці подалі від бездротових датчиків. На відміну від базової станції, бездротові сенсорні вузли негаразд помітні серед поля, що може запобігти несанкціонованого доступу до них. При м у теплиці подібний сценарій практично виключено.



Рисунок 6.3 – Приклад розміщення базової станції у захищеному місці

Базова станція здійснює спостереження та контроль над мережею, а також відповідає за довгострокове зберігання всіх даних від вузлів БСС. Вона виконує функцію пост-обробки даних, отриманих від окремих вузлів сенсорної мережі, представляючи їх оператору в легкочитаній формі.

Базовій станції необхідне безпосереднє підключення до інтернету та електромережі, тому вона, як правило, розміщується в обладнаній комунікаціями будівлі, розташованій неподалік території розгортання БСМ. Інтерфейс до даних, що зберігаються на базовій станції, є веб-інтерфейсом з підтримкою індексації в мережі інтернет файлів-журналів із записами про події. На малюнку 6.2 зображено базову станцію системи Cairós, а малюнок 6.3 ілюструє приклад розміщення подібної базової станції в захищеному місці.

Базова станція повної конфігурації включає КК, з'єднання з яким здійснюється за допомогою послідовного інтерфейсу зі швидкістю 152000 бод. Також в ній використовується кварцовий резонатор із частотою 14.745 МГц для запобігання виникненню будь-яких помилок передачі даних на такій швидкості.

Повна конфігурація базової станції представлена малюнку 6.4.

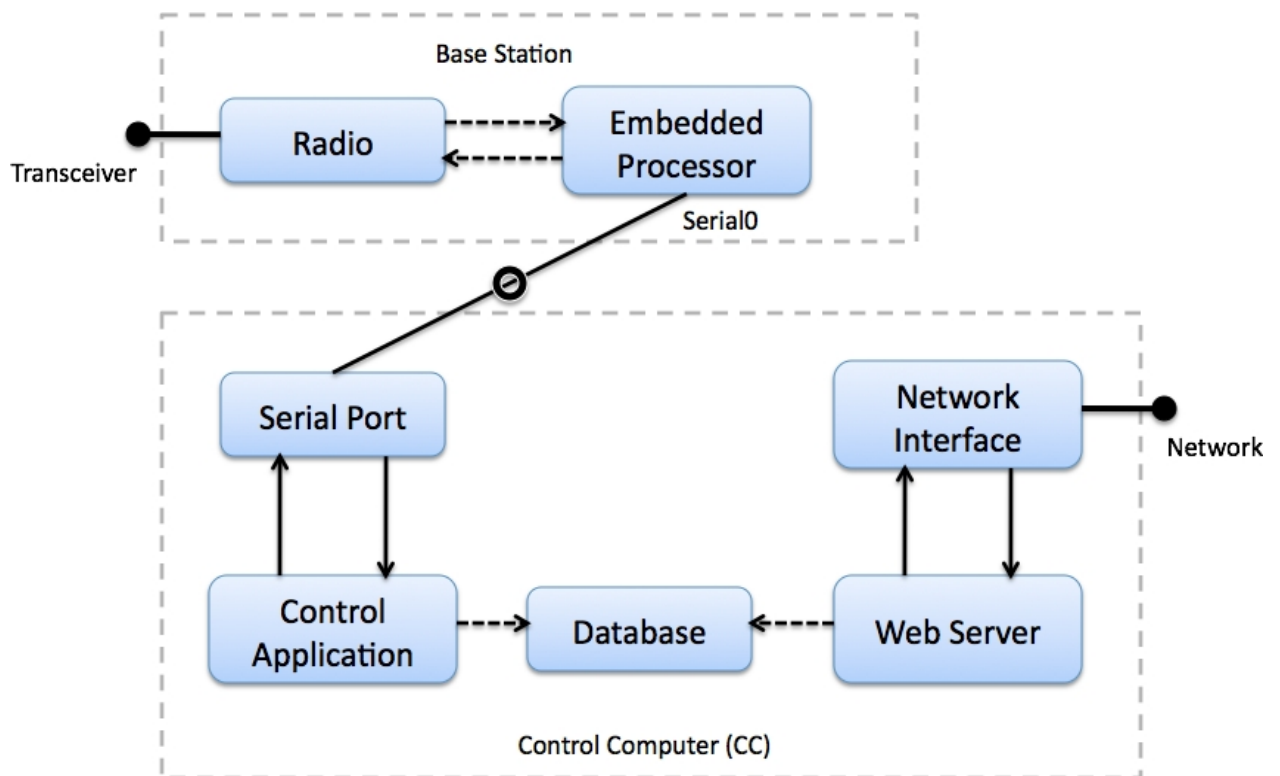


Рисунок 6.4 – Повна конфігурація базової станції

6.2 Джерело живлення

На малюнку 6.5 наведено схему живлення від акумулятора та за допомогою USB-порту. Оскільки живлення може подаватися від одного з двох джерел одночасно, використовується однополюсний перемикач S2 на два напрямки. Технічно можливо використовувати обидва джерела живлення одночасно і перемикатися між ними в процесі використання, проте виникнення необхідності такого сценарію вкрай малоймовірно.

Котушка L1 і конденсатор C1 служать як базовий фільтр напруги для перемикача S2. Резистори R1 і R2 діють як дільник напруги, що зменшує вхідну напругу рівня, що знаходиться в діапазоні зчитування процесором. Живлення процесора обмежено діодом, що створює необхідне падіння напруги, оскільки рівень вище допустимого може викликати серйозні пошкодження. R3 і C24 служать як слабкий фільтр низьких частот для збільшення відносної точності показань напруги для аналогових схем

процесора при передачі звіту про його рівень. C2 і C4 забезпечують фільтрацію вихідного струму і виступають в ролі буфера, що згладжує, зменшує сплески рівня напруги при підключенні зовнішніх датчиків або інших пристроїв.

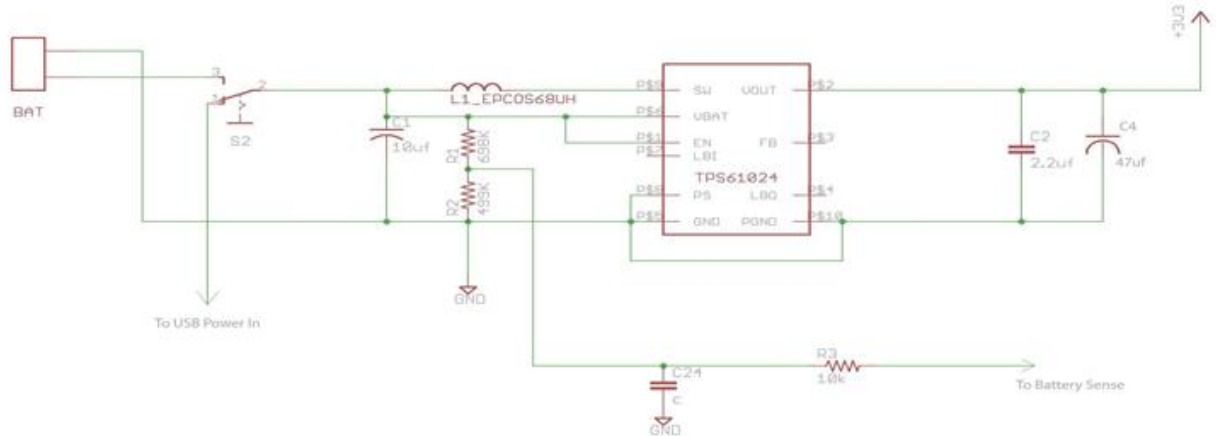


Рисунок 6.5 – Схема джерела живлення

6.3 Аналогова схемотехніка та схема підключення ЦПУ

До кожного входу для аналогових пристроїв підключено фільтр низьких частот і знижувальний резистор. Знижувальний резистор заземлює сигнал, якщо пристрій не підключено. Це дає нульове значення при вимірах, у тому випадку, коли жоден датчик не підключений. Кожен фільтр нижніх частот складається з конденсатора ємністю 0.1 мкФ і опором резистора 1кОм, який забезпечує регулювання рівня шуму аналогової схеми. Крім того, AtMega 1281 аналогові входи з JTAG пінами. Для захисту піни роз'єму JTAG під час налагодження відповідні сигнали були додатково навантажені резистором опором 10 кОм.

На малюнку 6.6 зображено схему управління сигналами.

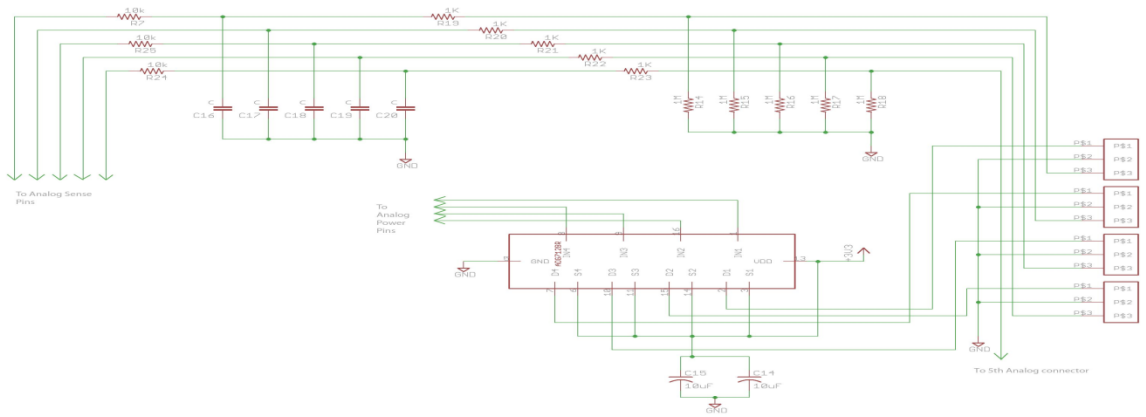


Рисунок 6.6 – Схема керування сигналами

Перемикач скидання підключений безпосередньо на землю через сигнал скидання. У схемі також присутні чотири світлодіоди: червоного, синього, зеленого та помаранчевого кольору. До синього світлодіода підключений резистор меншого опору через нижчі значення яскравості при однаковому рівні напруги. Конденсатори та котушки забезпечують фільтрацію вхідної напруги та для того щоб зменшити рівні шумів. На малюнку 6.7 зображено схему підключення ЦПУ.

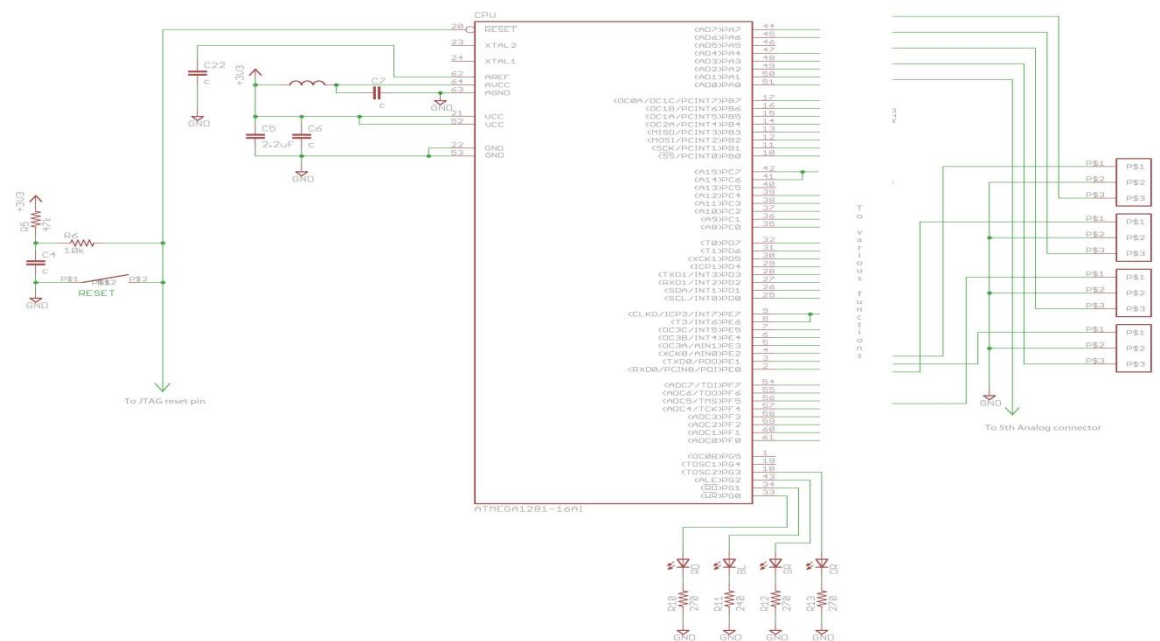


Рисунок 6.7 – Схема підключення ЦПУ

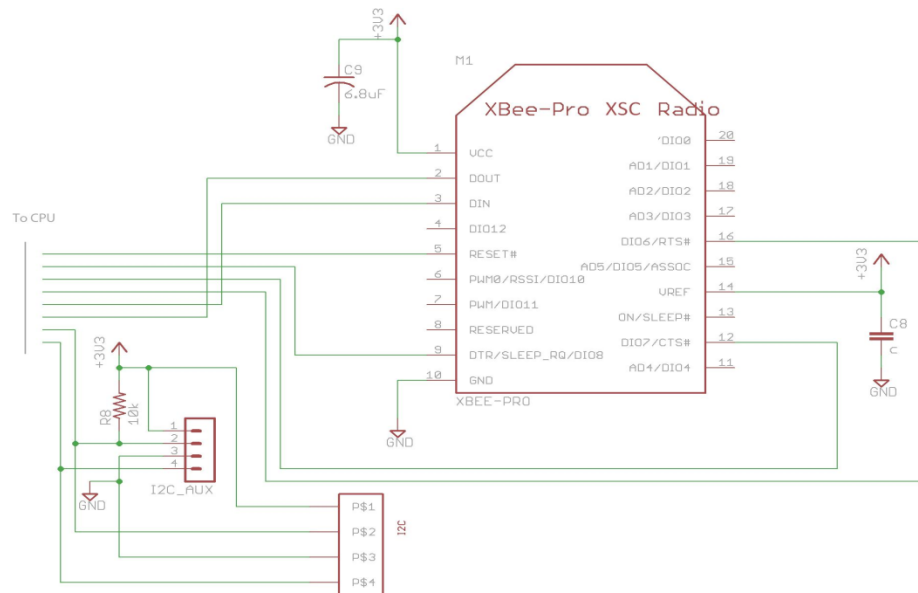
6.4 Радіомодуль

У цій роботі, при проектуванні БСМ, був обраний радіомодуль XBee-PRO XSC 900MHz RF, що непогано зарекомендував себе. Однак, при необхідності, він може бути замінений потужнішим аналогом. На малюнку 6.9 конденсатори C8 і C9 служать базовим фільтром напруги. DOUT – це сигнал від радіомодуля до процесора, а DIN – це сигнал від процесора до радіомодуля. DOUT, DIN та CTS необхідні для здійснення радіопередачі, тоді як RTS та DTR використовуються для перепрошивки радіомодуля ресурсами вбудованого процесора. Також, на малюнку 6.9 зображено інтерфейс I2C у вигляді двох роз'ємів, 4-контактного роз'єму I2C та чотирипінового кінцевика. Наявність лінії даних підтягуючого резистора R8 визначено стандартом I2C.

На малюнку 6.8 зображено плату радіомодуля XBee-PRO XSC 900MHz RF.



Рисунок 6.8 – Радіомодуль XBee-PRO XSC 900MHz RF



Рисунк 6.9 – Схема підключення радіомодуля

6.5 Використовувані типи датчиків

Усього можуть використовуватися три типи датчиків: аналогові, цифрові та імпульсні. Для аналогового датчика передбачається споживання менше 10-15 мА в активному режимі та ініціалізація менше 300 мс після включення живлення. Єдиний підтип аналогового датчика, що підтримується в даний час, це диференціальний аналоговий сигнал. Існує два варіанти диференціальних аналогових датчиків: спеціальний диференціальний аналоговий вхід на платі, і другий, що створюється комбінуванням роз'ємів аналогових датчиків 1 і 2. Для використання другого диференціального аналогового датчика повинна бути підключена конфігуруюча перемичка 1. Перемичка 1 перетворює два інтерфейси аналогових. При використанні даного режиму можуть бути підключені лише два диференціальні датчики, оскільки це обмеження вибраного процесора.

Цифровий тип датчика за умовчанням має стандартний послідовний вихід зі швидкістю 1200 бод. Передбачається його повне функціонування після 300 мс з можливістю надсилання даних до базової станції в цей час. Поточний максимальний час відгуку цифрового датчика становить близько

500 мс. Перемикач від 2 до 6 управляє альтернативним режимом цифрового датчика. Єдиний альтернативний режим, що в даний час підтримується для цифрового датчика, є модифікованим інтерфейсом I2C. Установка перемикача 2 переводить цифровий датчик з послідовного модифікований I2C режим.

Сенсорними вузлами також підтримується тип імпульсного датчика. Імпульсний датчик є датчиком контактного типу, який з деякою періодичністю надсилає дані по лінії. Ця періодичність характерна, наприклад, для збирача дощу, де вода збирається до наповнення відра, яке згодом викликає імпульс. Цей варіант реалізується перемикачем 7. Перемикач 8 в даний час використовується як діагностична. Оскільки дуже важливо знизити енергоспоживання, перемикачем 8 відключаються синій, зелений та помаранчевий світлодіоди. Червоний індикатор завжди спалахує при виникненні помилки під час увімкнення живлення.

6.6 Інтерфейс USB та інші компоненти

Роз'єм інтерфейсу USB у складі сенсорного вузла надається для цілей налагодження. Існує загальна послідовна лінія між USB та цифровими датчиками. Коли датчик вимкнено його послідовну лінію заземлено, а коли не використовується USB, це відключає лінію передачі даних. У разі відсутності необхідності використання шини USB можуть бути встановлені дві перемикачки для її відключення. Перша перемикачка вимикає лінію передачі даних, а друга використовується для вимкнення живлення. Це запобігає споживанню електроенергії, коли сенсорні вузли працюють від автономних джерел живлення та USB-інтерфейс не потрібний. Коли встановлені обидві перемикачки, процесор контролює живлення, отже, інтерфейс може бути включений за необхідності. Вузол також має інтерфейс підключення MMC, який може бути використаний для збереження даних вимірюваних датчиками. На малюнку 6.10 наведено схему підключення роз'єму USB.

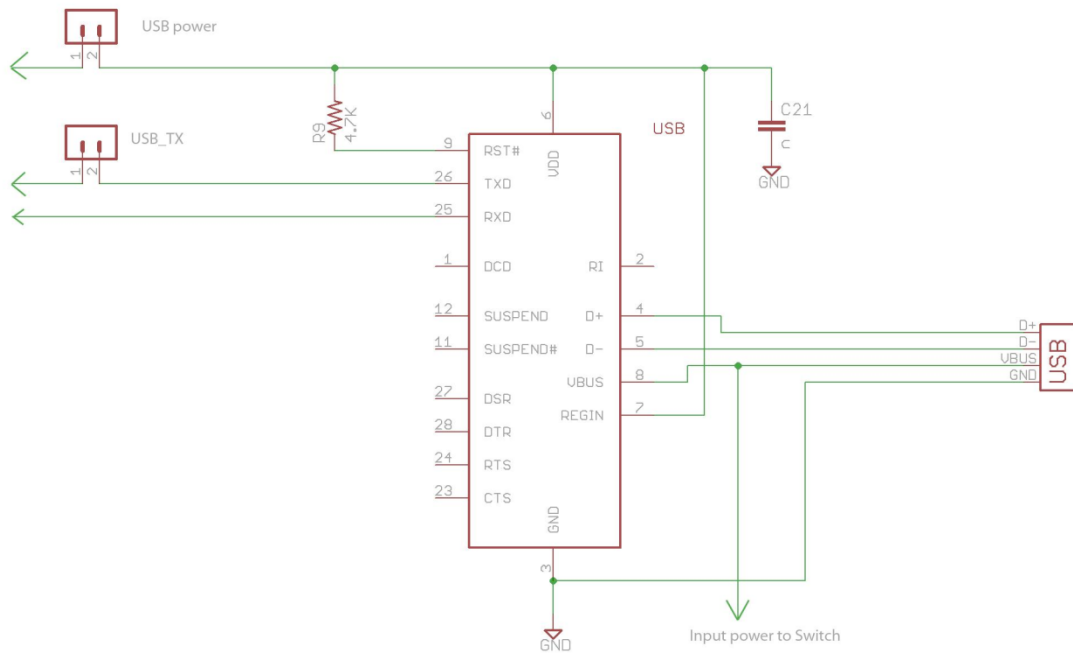


Рисунок 6.10 – Схема підключення роз'єму стандарту USB

Усього можуть використовуватися три типи датчиків: аналогові, цифрові та імпульсні. Для аналогового датчика передбачається споживання менше 10-15 мА в активному режимі та ініціалізація менше 300 мс після включення живлення. Єдиний підтип аналогового датчика, що підтримується в даний час, це диференціальний аналоговий сигнал. Існує два варіанти диференціальних аналогових датчиків: спеціальний диференціальний аналоговий вхід на платі, і другий, що створюється комбінуванням роз'ємів аналогових датчиків 1 і 2. Для використання другого диференціального аналогового датчика повинна бути підключена конфігуруюча перемичка 1. Перемичка 1 перетворює два інтерфейси аналогових. При використанні даного режиму можуть бути підключені лише два диференціальні датчики, оскільки це обмеження вибраного процесора.

Цифровий тип датчика за умовчанням має стандартний послідовний вихід зі швидкістю 1200 бод. Передбачається його повне функціонування після 300 мс з можливістю надсилання даних до базової станції в цей час. Поточний максимальний час відгуку цифрового датчика становить близько 500 мс. Перемичка від 2 до 6 управляє альтернативним режимом цифрового

датчика. Єдиний альтернативний режим, що в даний час підтримується для цифрового датчика, є модифікованим інтерфейсом I2C. Установка перемички 2 переводить цифровий датчик з послідовного модифікований I2C режим.

Сенсорними вузлами також підтримується тип імпульсного датчика. Імпульсний датчик є датчиком контактного типу, який з деякою періодичністю надсилає дані по лінії. Ця періодичність характерна, наприклад, для збирача дощу, де вода збирається до наповнення відра, яке згодом викликає імпульс. Цей варіант реалізується перемичкою 7. Перемичка 8 в даний час використовується як діагностична. Оскільки дуже важливо знизити енергоспоживання, перемичкою 8 відключаються синій, зелений та помаранчевий світлодіоди. Червоний індикатор завжди спалахує при виникненні помилки під час увімкнення живлення.

6.7 Накопичувальний реєстратор Decagon EM50

У EM50 є п'ять інтерфейсних портів, до яких можуть бути підключені як аналогові, так і цифрові датчики. Як джерело живлення потрібно п'ять батарейок типу AA. Для того, щоб налаштувати реєстратор EM50, необхідно підключення до комп'ютера через COM-порт.

Реєстратор Decagon EM50 має два режими передачі даних: режим з підтвердженням доставки та режим односпрямованої передачі. У режимі однонаправленої передачі EM50 передає один пакет даних протягом одного циклу. У режимі з підтвердженням доставки - передає пакет даних і чекає на підтвердження від станції даних Decagon. У разі відсутності підтвердження він повторно передає той самий пакет даних. Кількість повторних спроб підтвердження доставки обмежена двадцятьма.

На малюнку 6.11 зображено накопичувальний реєстратор Decagon EM50.

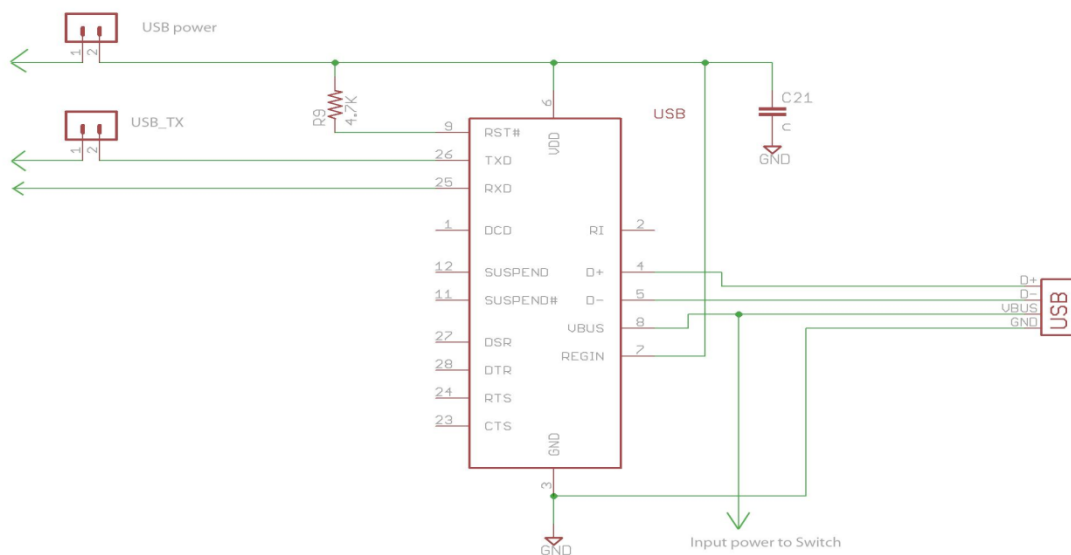


Рисунок 6.10 – Схема підключення роз'єму стандарту USB

ВИСНОВКИ

Запропоновано використання комп'ютеризованих систем вимірювання, на основі безпроводних сенсорних мереж, як метод вимірювання екологічних параметрів.

Побудовано структурну схему сенсорного вузла комп'ютеризованих систем вимірювання сенсорних величин.

Запропоновано математичну модель визначення координат у сенсорній мережі, що входить до складу комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин.

Визначено основні вимоги до системи локалізації, у разі побудові комп'ютеризованих систем вимірювання величин на базі безпроводних сенсорних мереж.

Виділено категорії, за якими класифікуються алгоритми локалізації в безпроводних сенсорних мережах.

Запропоновані апаратні засоби для вимірювання екологічних параметрів безпроводних сенсорних мереж.


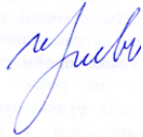

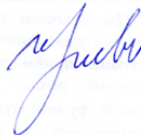
Проведено експериментальне дослідження моделі сенсорної мережі, що дало змогу оцінити похибку локалізації вузлів у мережі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1.G..Krivoulya, V Shcherbak Intellectual Functional Diagnosis of Large Objects Using Sensor Network. IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS) Proceeding of international conf .Varna, Bulgaria, September 4 – 7, 2020, pp.507-511
- 2.Y. Qu, W. Han, L. Fu et al., “LAINet - A wireless sensor network for coniferous forest leaf area index measurement: Design, algorithm and validation,” Computers and Electronics in Agriculture, vol. 108, pp. 200–208, 2014.
- 3.Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankaraubramaniam, and Erdal Cayirci: A Survey on sensor networks, IEEE Communications Magazine (2002).
- 4.A. Savvides, H. Park, M. Srivastava, The bits and flops of the N-hop multilateration primitive for node localization problems, First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Application, Atlanta, GA, 2002.
5. L. Girod, D. Estrin, Robust range estimation using acoustic and multimodal sensing, in: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Maui, Hawaii, 2001.
- 6.D. Niculescu, B. Nath, Ad-hoc positioning system, in: IEEE GlobeCom, 2001.
- 7.C. Savarese, K. Langendoen, J. Rabaey, Robust positioning algorithms for distributed ad-hoc wireless sensor networks, USENIX Technical Annual Conference, Monterey, CA, 2002, pp. 317–328. 8.K. Langendoen, N. Reijers, Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison, Computer Networks: Int. Journal of Computer and Telecommunications Networking, V. 43 Iss. 4, 15 Nov. 2003.

Відомість кваліфікаційної роботи

Засоби комп'ютерного екомоніторингу великорозмірних об'єктів

	Прізвище та ініціали відповідальної особи	Підпис	Дата
Роботу виконав студент групи СКСм-22-1 Структура кваліфікаційної роботи: – пояснювальна записка с.; – графічний матеріал 15 арк..	Деєв С.Д.		10.01.24
Керівник роботи	Кривуля Г.Ф.		10.01.24
Перевірка на плагіат здійснена. Оригінальність авторського тексту складає ___85___ %	Литвинова Є.І.		12.01.24
Нормоконтроль проведено :	Кривуля Г.Ф.		15.01.24