Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Проектування та експлуатації електронних апаратів
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

ГЮИК 464421.001 ПЗ
(позначення документа)

"Розробка моделі IoT для обміну інформації в мережах з радіотрансиверами ESP8266 та CC2538"
(тема)

Виконав:
здобувач 2 курсу, групи РЕАЗм-20-1
Заянчуковський О. Г.
(прізвище, ініціали)
спеціальність 172 "Телекомунікації та радіотехніка"
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Радіоелектронні апарати та засоби
(повна назва спеціалізації)

Керівник проф. Ключник І.І.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ПЕЕА _____ Хорошайло Ю.Є.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2021 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра Проектування та експлуатації електронних апаратів

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва)

Освітня програма Радіоелектронні апарати та засоби
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
«____»_____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Заянчуковському Олексію Геннадійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка моделі IoT для обміну інформації в мережах з радіотрансиверами ESP8266 та C2538

затверджена наказом по університету від 08 11 2021 р. № 1703СТ
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 29 11 2021 р.
3. Вихідні дані до роботи Модулі зв'язку побудовані на основі радіотрансиверів ESP8266 та CC2538 необхідно включити до бездротової сенсорної мережі. Необхідно розробити модель для опису обміну даними у такій мережі.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
– теоретичні основи принципів побудування бездротових сенсорних мереж;
– стандартні протоколи що використовуються у бездротових сенсорних мережах;
– алгоритми керування топологією;
– алгоритми пошуку маршрутів;
– алгоритми геомаршрутизації;
– охорона праці;

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) __презентація у вигляді слайдів_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення теоретичних основ побудування		
	бездротових сенсорних мереж	29.09.2021	
2	Особливості апаратної реалізації бездротових мереж	29.09.2021	
3	Постановка задачі для розробки моделі обмінуданих	11.10.2021	
4	Вивчення основ побудування бездротових мереж	11.10.2021	
5	Розробка моделі керування топологією мережі	19.11.2021	
6	Розробка та вивчення моделі для маршрутизації	29.11.2021	
	даних між вузлами		

Дата видачі завдання 01 вересня 2021 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ _проф. Ключник І.І._____
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до атестаційної роботи магістра: 84 стор., 26 рис., 2 таблиці, 37 джерел.

ВБУДОВАНІ СИСТЕМИ, БЕЗДРОТОВІ МЕРЕЖІ, ОБМІН ДАНИМИ, ТОПОЛОГІЯ МЕРЕЖІ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ.

Тема магістерської кваліфікаційної роботи – розробка оптимальної моделі обміну даними у бездротовій сенсорній мережі з використанням трансиверів ESP8266 та CC2538 з підтримкою мережевих стандартів Wi-Fi та IEEE 802.15.4.

Мета магістерської роботи: дослідження теорії роботи та оптимальних рішень при розробці оптимальних моделей обміну даними у бездротових сенсорних мережах із підвищеними вимогами до енергоспоживання кінцевих пристроїв.

В процесі роботи було розглянуто основні підходи до побудування структури та моделювання бездротових сенсорних мереж за допомогою теорії графів. Досліджено алгоритми керування топологією мережі для зменшення рівня інтерференції та підвищення відмовостійкості мереж, а також для підвищення автономності пристроїв у мережах за рахунок оптимізації енергоспоживання. Розглянуто алгоритми геомаршрутизації у бездротових сенсорних мережах із сітчастою топологією та можливість визначення відносних та абсолютних координат пристроїв у мережі.

ABSTRACT

Explanatory note to the attestation master's thesis: 83 p., 26 Fig., 2 Tables, 37 Sources.

Keywords: EMBEDDED SYSTEMS, WIRELESS SENSOR NETWORKS, DATA EXCHANGE, NETWORK TOPOLOGY, MATHEMATICAL MODEL.

The topic of the master's qualification thesis is the development of an optimal model of data exchange in a wireless sensor network using ESP8266 and CC2538 transceivers with support for Wi-Fi and IEEE 802.15.4 network standards.

The purpose of the master's work: research of the theory of work and optimal solutions in the development of optimal models of data exchange in wireless sensor networks with high requirements for energy consumption of end devices.

In the process of work the main approaches to the construction of the structure and modeling of wireless sensor networks using graph theory were considered. Algorithms for controlling the network topology to reduce the level of interference and increase the fault tolerance of networks, as well as to increase the autonomy of devices in networks by optimizing energy consumption. Algorithms of georouting in wireless sensor networks with mesh topology and the ability to determine the relative and absolute coordinates of devices in the network are considered.

ЗМІСТ

С.

Перелік умовних скорочень 7
Вступ 9
1 Теоретичні основи принципів побудування бездотових сенсорних мереж зв’язку 13
1.1 Огляд стандартів бездротових мереж, що використовуються при побудуванні сенсорних мереж 13
1.2 Огляд протоколів, що базуються на стандарті IEEE 802.15.4 16
1.3 Огляд базових топологій бездротових мереж 19
2 Особливості реалізації бездотових сенсорних мереж 21
2.1 Класифікація та особливості модулів Wi-Fi мереж 21
2.2 Класифікація та особливості модулів зв’язку мереж з малою пропускною здатністю 25
2.3 Обґрунтування вихідних даних для проектування мережі 26
2.4 Алгоритм самоорганізації зі створенням кластерів 31
2.5 Алгоритми зі створенням ланцюгів зв'язків 34
2.6 Розробка методу ініціалізації бездротової сенсорної мережі 35
3 Розробка моделі обміну даними у бездротовій мережі 47
3.1 Постановка задачі для створення моделі передачі даних 47
3.2 Побудування моделі бездротової мережі 47
3.3 Алгоритм управління топологією та зменшення рівня інтерференції 53
3.4 Розробка алгоритму пошуку маршрутів у бездротових сенсорних системах 58
3.5 Геомаршрутизація у бездротових сенсорних мережах 63
4 Охорона праці 69
4.1 Аналіз умов праці на робочому місці 69
4.1.1 Організація робочого місця 69
4.1.2 Мікроклімат виробничих приміщень 71
4.1.3 Шкідливі речовини в повітрі робочої зони 71

4.1.4 Освітлення 72
4.1.5 Шум, вібрація, ультразвук, інфразвук 72
4.1.6 Виробничі випромінювання 72
4.1.7 Небезпека ураження електричним струмом 73
4.2 Розробка заходів з охорони праці 74
4.2.1 Нормалізація повітря робочої зони 74
4.2.2 Виробниче освітлення 74
4.2.3 Захист від виробничого шуму та вібрацій 75
4.2.4 Захист від електромагнітних полів 76
4.2.5 Електробезпека 76
4.3 Пожежна безпека 76
4.4 Охорона навколишнього середовища 77
Висновки 79
Перелік джерел посилань 80
Додаток А Презентація 85

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AES (англ. Advanced Encryption Standard) – симетричний алгоритм блочного шифрування

AODV (англ. Adhoc On Demand Distance Vector) – протокол динамічної маршрутизації для мобільних ad-hoc мереж

CIF (англ. Core Interface) – неінтрузивний інтерфейс налагодження

CSMA/CA (англ. Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance) – дозвіл несучої множинного доступу з уникненням зіткнення

DMA (англ. Direct Memory Access) – прямий доступ до пам’яті

DTLS (англ. Datagram Transport Layer Security) – протокол датаграм безпеки транспортного рівня

FFD (англ. Full functionality device) – повнофункціональний пристрій

I2C (англ. Inter-Integrated Circuit) – послідовна асиметрична шина для зв'язку між інтегральними схемами всередині електронних приладів

IoT (англ. Internet of things) – інтернет речей

LFSR (англ. Linear-Feedback Shift Register) – регістр зсуву з лінійним зворотним зв'язком

LLC (англ. Logical link control) – підрівень керування логічним зв'язком

LQI (англ. Link Quality Indicator) – показник сили або якості прийнятого пакета для бездротових персональних мереж

MAC (англ. Media Access Control) – управління доступом до середовища

OEM (англ. Original equipment manufacturer) – виробник комплектного обладнання

OSI (англ. The Open Systems Interconnection model) – абстрактна мережева модель для комунікацій і розробки мережевих протоколів

PiP (англ. Package in Package) – платформи в єдиному корпусі

RFD (англ.Reduced functionality device) – повнофункціональний пристрій

RSSI (англ. Received Signal Strength Indication) – показник рівня потужності сигналу, що надходить до антени

Shield – плата розширення

SiP (англ. System in a package) – інтегрально гібридні мікросхеми

SoC (англ. System-on-a-Chip) – система на єдиному кристалі

SPI (англ. Serial Peripheral Interface) – послідовний периферійний інтерфейс

UART (англ. Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) – універсальний асинхронний приймач/передавач

UDP (англ. User Datagram Protocol) – протокол датаграм користувача

USART (англ. Universal Synchronous Asynchronous Receiver-Transmitter) – універсальний синхронний асинхронний приймач/передавач

USB (англ. Universal Serial Bus) – універсальна послідовна шина

WPAN (англ. Wireless personal area network) – бездротові персональні обчислювальні персональні обчислювальні мережі

БД – база даних

БС – базова станція

БСЖ – бездротова сенсорна мережа

ЕМВ – електромагнітні випромінювання

ІЧВ – інфрачервоні випромінювання

ЛВ –лазерні випромінювання

ПУ – пульт управління

УФВ – ультрафіолетові випромінювання

ЦГ– центр гравітації

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

Сучасні системи автоматизованого керування та збору інформації все більше передбачають можливість підключення кожної ланки не лише між собою у внутрішній мережі, а й зовнішньою середою і мережею інтернет. В такі системи автоматизованого керування об’єднуються пристрої що раніше не було можливості й видимої потреби об’єднувати раніше.

Концепція інтернету речей (IoT) передбачає можливість надання речам більш розширеного функціоналу, зменшення витрат часу, економії енергії тощо за допомогою можливості виходу до мережі інтернет для того щоб отримувати чи передавати інформацію. Важливим фактором при роботі бездротових сенсорних мережаї є обмежена ємність елементів живлення, що використоуються на вузлах таких мереж.

Всі пристрої інтернету речей мають своє основне призначення яке, зазвичай, могло б виконуватись без з’єднання із мережею, але використання їх з підключенням до мережі дає можливість оптимізації процесів та значної економії часу та ресурсів.

Бачення інтернету речей засноване на вірі в те, що постійний прогрес в галузі мікроелектроніки, зв'язку та інформаційних технологій, які можна було спостерігати останніми роками, буде продовжуватися в осяжному майбутньому. Насправді – завдяки їх зменшеним розмірам, постійно падаючим цінам та зменшенню споживання енергії – процесори, комунікаційні модулі та інші електронні компоненти сьогодні все більше інтегруються у повсякденні об’єкти.

Апаратну частину пристроїв інтернету речей представляють собою вузли прийому та передачі даних, сенсори, що знімають інформацію, що поступає із зовнішнього світу, процесори для обробки і спрямовування потоків інформації та засоби виводу інформації для доступу до неї безпосередніми користувачами. Такі пристрої можуть існувати як самостійні об’єкти, або у складі розповсюджених сенсорних мереж.

Те, як пристрій інтернету речей підключається до зовнішнього світу – є найбільш важливим рішенням при розробці такого пристрою. Дротовий інтернет зазвичай є найпростішим і найдешевшим рішенням проблеми підключення, але це вимагає фізичного підключення за допомогою кабелю. Безпровідні рішення вирішують цю проблему, але виникає потреба у більш складній конфігурації.

Wi-Fi представляє собою найбільш поширеній протокол, заснований на наборі LAN протоколів IEEE 802.11. Цей набір безпровідних мережевих технологій надає змогу користуватися вже існуючою дуже розвиненою інфраструктурою мереж. Пристрої у мережі Wi-Fi мають змогу можуть здійснювати мережу через бездротові точки доступу один до одного, а також на дротові пристрої та Інтернет.

Wi-Fi найчастіше використовує радіочастотні діапазони 2,4-гігагерцевих (120 мм) UHF та 5 Гігагерцевих (60 мм) SHF ISM радіочастот. Дані організовані в 802.11 кадри, дуже схожі на кадри Ethernet на рівні каналу зв'язку, але з додатковими полями адреси. MAC-адреси використовуються як мережеві адреси для маршрутизації по локальній мережі. На додаток до 802.11, сімейство протоколів IEEE 802 має специфічні положення для Wi-Fi. Вони потрібні тому що на основі кабельних носіїв Ethernet не ділиться між користувачами, тоді як за допомогою бездротового зв'язку всі передачі приймаються всіма станціями в межах діапазону, в якому використовується цей радіоканал. Хоча Ethernet має по суті мізерні показники помилок, носії бездротового зв'язку піддаються значним перешкодам. Для цілей роботи в мережі Інтернет Wi-Fi, як правило, складається як шар зв'язку нижче рівня Інтернет-протоколу.

Це означає, що вузли мають пов’язану Інтернет-адресу, і при належному підключенні це дозволяє забезпечити повний доступ до Інтернету.

Серед недоліків використання Wi-Fi можна назвати більшу вартість імплементації та значно менш оптимізоване енергоспоживання. Для рішення цих недоліків, пропонується побудування мереж з використанням великої кількості

простих вузлів сенсорної мережі, що зв’язуються за допомогою більш енергоефективного типу бездротових мереж.

802.15.4 визначає стандарт бездротової PAN, який використовується в Zigbee, 6LoWPAN і Highway Addressable Transducer Protocol (HART). Стандарти 802.x визначають лише канальний рівень мережі.

Інтернет речей (IoT) – це підключення речей до Інтернету. Пристрої, які (безпосередньо) підключаються до Інтернету, повинні використовувати пакет IP для обміну даними з пристроями та серверами. Тим не менш, пристрої в локальній мережі можуть використовувати протоколи, відмінні від IP, для спілкування в локальній мережі.

Пристрої без IP-адреси підключаються до Інтернету через інтернет-шлюз. Шлюз зв’язується з локальними пристроями за допомогою методу без використання IP-адреси з одного боку та з іншими пристроями в Інтернеті за допомогою IP-адреси з іншого боку. Шлюз є шлюзом прикладного рівня, оскільки йому потрібно видалити дані, що надходять з локальної мережі, і реструктурувати їх за допомогою стека TCP/IP, щоб увімкнути зв’язок з Інтернет-сервісом.

Перевага використання IP у вузлових пристроях IoT полягає в тому, що він дозволяє використовувати шлюз мережевого (IP) рівня. Поширеним прикладом шлюзу рівня IP може бути точка доступу Wi-Fi або маршрутизатор, який підключає пристрої Wi-Fi до Інтернету. Шлюз рівня IP є більш гнучким, ніж шлюз прикладного рівня, оскільки ви можете змінювати або додавати програми на пристрої, не змінюючи нічого на шлюзі.

У багатьох випадках локальна сенсорна мережа призначена для одного конкретного застосування. Наприклад, системи сигналізації з бездротовими датчиками утворюють локальну мережу з однією функцією – надсилання повідомлень про активацію датчика на контролер сигналізації. Якщо контролер сигналізації передає повідомлення на ваш телефон через Інтернет, він використовує TCP/IP. Але зв’язок між датчиками та контролером сигналізації не обов’язково має базуватися на TCP/IP.

Одним з недоліків стеку TCP/IP є те, що він досить складний і великий, а отже, вимагає більшої потужності обробки та пам’яті, що передбачає більш дорогі пристрої. Ця складність також призводить до збільшення пакетів даних, які споживають більше енергії під час надсилання та отримання. З цих причин багато простих мереж (наприклад, бездротові датчики в системі сигналізації) вибирають реалізувати простіші і зазвичай власні протоколи. У міру розвитку кремнієвих технологій потужність процесора та пам’ять стають більш доступнішими, що робить зв’язок TCP/IP привабливішим навіть для невеликих і простих мереж.

Метою дослідження є розробка моделі обміну інформації в бездротових сенсорних мережах з використанням радіотрансиверів ESP8266 та CC2538.

Для виконання поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– провести огляд та класифікацію способів побудови бездротових сенсорних мереж;

– розглянути основи роботи та розробити математичну модель процедури формування сенсорної мережі;

– розробити принцип зв’язку між вузлами внутрішньої мережі за допомогою радіотрансиверів CC2538;

– розробити принцип зв’язування вузлів, що використовують CC2538 з зовнішньою мережею інтернет;

– дослідити можливості використання таких бездротових сенсорних мереж.

У магістерській кваліфікаційній роботі розглядаються бездротові мережі, що використовуються для побудови сенсорних мереж, їх види, стандарти і принципи побудови.

Атестаційну роботу виконано згідно ДСТУ 3008–2015 [1]

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРИНЦИПІВ ПОБУДУВАННЯ БЕЗДОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ЗВ’ЯЗКУ

1.1 Огляд стандартів бездротових мереж, що використовуються при побудуванні сенсорних мереж

Системи зв'язку використовують набір правил і стандартів для форматування даних і контролю обміну даними. Найпоширенішою моделлю в системах передачі даних є модель взаємозв’язку відкритих систем (OSI), яка розбиває зв’язок на функціональні рівні (Рисунок 1.1) та дозволяє легше реалізувати масштабовані та взаємодіючі мережі [2]. Модель OSI має сім шарів; рівні з другого по п'ятий цієї моделі показані на рисунку 1.1 разом із тим, як вони відображаються на різні протоколи бездротового стека TCP/IP. Протоколи бездротового підключення реалізуються на рівні 2, при цьому рівень 1 представляє фізичний рівень, такий як Ethernet, або, у випадку бездротового підключення, реалізацію модуляції.

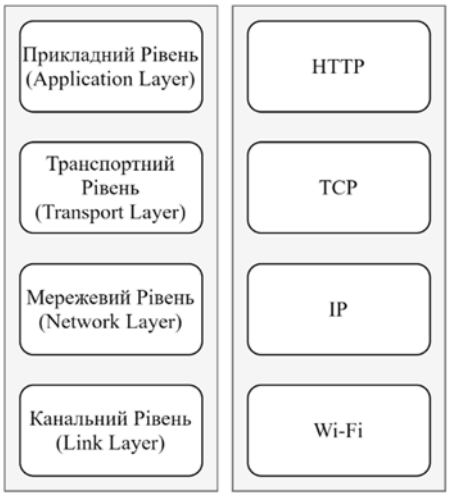

Рисунок 1.1 – Спрощена мережева модель OSI (зліва) та приклад протоколу TCP/IP (справа)

Канальний рівень перетворює біти в радіосигнали (і навпаки), його функція полягає в тому, щоб розбивати дані на кадри для надійного бездротового зв'язку та керувати доступом до радіоканалу. У прикладі TCP/IP на рисунку 1.1 Wi-Fi є протоколом канального рівня. Канальний рівень часто розбивається на два підрівні для бездротових протоколів: рівень керування логічними каналами (LLC) і рівень керування доступом до медіа (MAC). Деякі бездротові протоколи, такі як 802.15.4, стандартизують лише рівень MAC.

Однією з найбільших проблем комунікаційних систем є взаємодія, тобто здатність пристроїв різних виробників обмінюватися даними. Вирішення цієї проблеми є головною метою багатьох організацій зі стандартів, які визначають специфікації та процедури тестування. Згадуючи модель мережі OSI на рисунку 1.1, деякі стандарти визначають один або кілька мережевих рівнів, тоді як інші визначають повні наскрізні мережеві специфікації.

Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) є некомерційною організацією, створеною в 1963 році. Вона зосереджена на комунікації та радіотехніці, і одним із її добре відомих внесків у мережеві технології є сімейство стандартів IEEE 802.x. Наприклад, 802.3 визначає специфікацію Ethernet, яка сьогодні керує більшістю дротових комп'ютерних мереж. 802.11 визначає специфікацію WLAN, яка є базовою для стандарту Wi-Fi, а 802.15.4 визначає стандарт бездротової PAN, що використовується в Zigbee, 6LoWPAN і Wireless Highway Addressable Transducer Protocol (HART). Стандарти 802.x визначають лише канальний рівень мережі.

Технологія Wi-Fi, заснована на стандарті IEEE 802.11, була розроблена як бездротова заміна популярного дротового стандарту IEEE 802.3 Ethernet. Таким чином, він був створений з першого дня для підключення до Інтернету. Хоча технологія Wi-Fi, в першу чергу, визначає канальний рівень локальної мережі, вона настільки інтегрована зі стеком TCP/IP, що коли люди кажуть, що вони використовують Wi-Fi, мається на увазі, що вони також використовують TCP/IP для підключення до Інтернету.

Програмне забезпечення Wi-Fi і TCP/IP є досить великим і складним. Для ноутбуків і смартфонів з потужними мікропроцесорами (MPU) і великим об’ємом пам’яті це не викликає проблем. Донедавна додавання підключення Wi-Fi до пристроїв з невеликою потужністю обробки, таких як термостати та побутова техніка, було неможливим і економічно вигідним.

Сьогодні силіконові пристрої та модулі вбудовують програмне забезпечення Wi-Fi та TCP/IP всередині пристрою.

Ці нові пристрої усувають більшість накладних витрат на MPU і забезпечують бездротове підключення до Інтернету за допомогою найменшого мікроконтролера (MCU). Зростаючий рівень інтеграції в цих пристроях Wi-Fi також усуває необхідність мати досвід проектування радіо та зменшує бар’єри інтеграції Wi-Fi.

Стандарт 802.15.4 є найбільшим стандартом для мереж WPAN з низькою швидкістю передачі даних. В даному стандарті є багато підкатегорій. Категорія 802.15.4 була розроблена для доданого моніторингу та управління з низькою швидкістю передачі даних, а також для використання з малим енергоспоживанням із збільшеним терміном служби пристроїв, що живляться від батареї.

Стандарт 802.15.4 визначає фізичний рівень (PHY) і рівень управління доступом до середніх (MAC) моделей роботи мережі з відкритими системами (OSI) PHY визначає частоту, потужність, модуляцію та інші умови безпровідного з'єднання.

MAC визначає формат обробки даних [3]. Останні умови визначають інші заходи для обробки даних і відповідне удосконалення протоколу, включаючи кінцевий приклад.

Оскільки мережі Wi-Fi за стандартом IEEE 802.11 потребують досить значних витрат енергії та обчислювальних потужностей на їх підтримку, що суперечить концепції великих енергонезалежних бездротових сенсорних мереж, пропонується побудова мережі з простими вузлами, що використовують стандарт

802.15.4 в поєднанні з роутерами з доступом до мережі інтернет з використанням мереж Wi-Fi.

1.2 Огляд протоколів, що базуються на стандарті IEEE 802.15.4

Zigbee — це відкритий стандарт, розроблений, просуваний та підтримуваний Zigbee Alliance, групою з понад 400 компаній з різних галузей. Zigbee розроблено для забезпечення повного підключення для взаємодії пристроїв і підключення до хмари.

Zigbee заснований на канальному рівні IEEE 802.15.4 і працює в діапазоні ISM 2,4 ГГц [4]. Його мережевий рівень був розроблений з урахуванням операцій топології Mesh з нуля; надання можливості масштабування мережі за допомогою передачі інформації через кілька переходів, а також відмовостійкості та підвищеної надійності, оскільки резервні шляхи створюються через мережу.

Однією з головних переваг Zigbee є те, що він надає повне рішення, яке забезпечує справжню взаємодію пристроїв між різними виробниками. Фактично, набір протоколів Zigbee включає бібліотеку кластерів Zigbee: стандартну бібліотеку типів пристроїв, моделей даних і поведінки, створену виробниками оригінального обладнання (OEM), які працюють у різних областях і перевірені в реальних розгортаннях протягом багатьох років.

Набір протоколів Zigbee також включає стандартні процедури введення в експлуатацію, забезпечення безпеки, управління мережею та пристроями. Різні типи пристроїв можуть підключатися до мережі та проходити автентифікацію, а також скидати заводські налаштування або виводити з експлуатації взаємосумісним способом, гарантуючи наскрізну сумісність пристроїв з початком роботи пристрою та плавною інтеграцією із вузлами збору інформації або концентраторами. Широка доступність рішень Zigbee є додатковою перевагою для OEM-виробників, які володіють цілими екосистемами і хочуть продавати послуги своїм клієнтам, які використовують наявні продукти та рішення.

Додатки на базі Zigbee здебільшого націлені на розумний будинок і розумні будівлі, зосереджені на сегментах освітлення, керування домом і безпеки.

Пристрої, що використовують Zigbee, як правило, є датчиками та виконавчими механізмами з низькою швидкістю передачі даних, а завдяки низькій потужності радіозв'язку базового канального рівня 802.15.4 і ефективності цілого набору протоколів, призначених для передачі даних програм і керування в короткі проміжки часу, значно мінімізує ефірний час та енергоспоживання.

6LoWPAN – це IPv6 через малопотужні бездротові персональні мережі. 6LoWPAN дозволяє дуже малим, малопотужним пристроям безпосередньо зв'язуватися з будь-яким іншим сервером або пристроєм на основі IP (Ethernet або Wi-Fi) в Інтернеті [5].

Стандарт був формалізований під RFC 6282 у вересні 2011 року. Як зазначено в заголовку RFC, стандарт 6LoWPAN визначає лише ефективний рівень адаптації між канальним рівнем 802.15.4 і стеком TCP/IP. Оскільки канальний рівень 802.15.4 має кілька необов'язкових режимів, різні рішення 6LoWPAN від різних виробників несумісні на рівні локальної мережі. Ці проблеми сумісності сповільнили впровадження 6LoWPAN і були ключовим чинником в розробці стандартів Thread.

Як і Wi-Fi, мережі 6LoWPAN потребують шлюзу рівня IP для доступу до Інтернету. Оскільки 6LoWPAN підтримує лише IPv6, а більшість інтернет-пристроїв в сьогоденні все ще використовує IPv4, шлюз 6LoWPAN включає протокол перетворення IPv6 в IPv4, який надає вузлам і програмам 6LoWPAN прямий доступ до Інтернету.

Реалізації 6LoWPAN існують як для діапазонів ISM 2,4 ГГц, так і від 868 МГц до 915 МГц. 6LoWPAN використовує переваги 802.15.4 – топологію мережі Mesh, великий розмір мережі, надійний зв'язок і низьке енергоспоживання – у поєднанні з перевагами IP-мереж.

Google, Samsung і ряд виробників кремнію, які хотіли безпосередньо підключити вузли Інтернету речей з низьким енергоспоживанням до IP-мереж, створили Thread Group, щоб визначити стандарт, який забезпечує сумісність пристроїв у мережах розумного дому.

Стандарт Thread зарекомендував себе як майбутнє рішення для IP через 802.15.4 порівняно з 6LoWPAN та Zigbee IP, які отримали дуже обмежений інтерес серед фірм-виробників.

Thread засновано на специфікації IEEE 802.15.4 2006, мережі за цим стандартом працюють в діапазоні 2,4 ГГц ISM, подібно до Wi-Fi, Bluetooth і Zigbee.

Він забезпечує швидкість передачі даних до 250 кбіт/с і може підтримувати до 250 пристроїв в одній локальній мережі. Потік успадковує переваги 802.15.4 і 6LoWPAN, такі як робота з низьким енергоспоживанням, адресність IPv6 і мережеві мережі.

Щоб підтримувати низьку потужність і переваги у вартості, Thread визначає протоколи вищого рівня з нижчими витратами, такі як протокол User Datagram Protocol (UDP) і Datagram Transport Layer Security (DTLS). Thread ґрунтується на цьому базовому наборі функцій, щоб додати чудову безпеку, надійність, масштабованість та простоту введення в експлуатацію [6].

На відміну від традиційних рішень 6LoWPAN, які використовують протоколи вищого рівня, такі як протокол маршрутизації IPv6 для мереж з низьким енергоспоживанням і втратами (RPL), для маршрутизації, потокова маршрутизація оптимізована для зв’язку між пристроєм. Це призводить до меншої затримки і, отже, дозволяє мережі підтримувати більше пристроїв.

На даний момент технологія Thread досить швидко розвивається та має найбільш перспективну технологію для бездротових сенсорних мереж з обмеженими джерелами живлення. Для зв’язку такої мережі із всесвітньою IP мережею, необхідно обладнати деякі вузли сенсорної мережі трансиверами з підтримкою Wi-F, такі вузли називаються маршрутизаторами мережі.

1.3 Огляд базових топологій бездротових мереж

Функціональні можливості пристроїв бездротового зв’язку дозволяють об’єднувати їх в топології з двома базовими топологіями (Рисунок 1.2): Star (зірка) та Peer-to-Peer (рівний-рівному). В центрі мережі за топологією «зірки» знаходиться координатор мережі. Усі вузли мережі мають зв’язок лише з координатором та можуть передавати інформацію одне-одному лише через координатора.

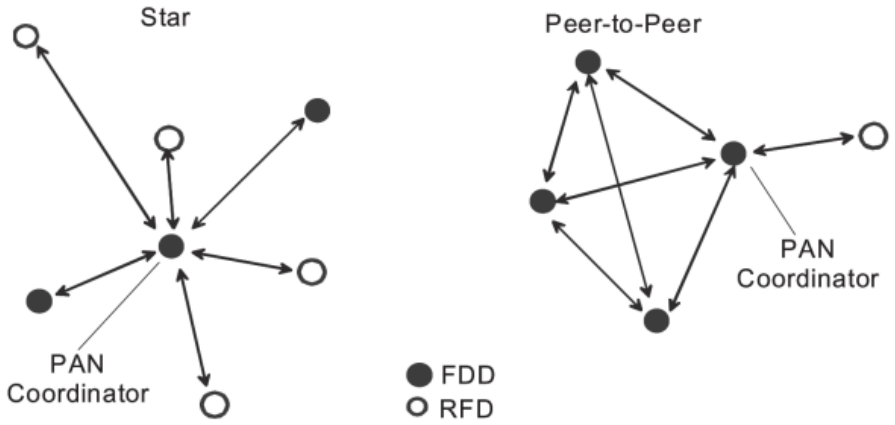

Рисунок 1.2 – Базові топології бездротових мереж

Прикладом мережі з топологією «зірка» може бути звична мережа Wi-Fi. Найпростіша мережева топологія «точка-точка» є окремим випадком топології «зірка» при взаємодії двох пристроїв [7]. В такому прикладі один з пристроїв повинен бути координатором. Один із двох пристроїв має бути ведучим (master), інший – веденим (slave). Взаємодія цих пристроїв відбудеться лише за виконання двох умов: у провідного пристрою має бути адреса мережі та адреса веденого пристрою "прописаний" у пам'яті у провідного пристрою.

Приєднання пристрою до мережі може виконуватися автоматично. Для автоматичного приєднання до мережі, координатор використовує сигнали маяків, які розпізнає будь-який мережний пристрій, що є сумісним з конкретною

імплементацією. Розпізнавши ці сигнали, ведений пристрій надсилає запит на приєднання до мережі та отримує мережеву адресу у відповідь.

У топології Peer-to-Peer у кожного мережевого пристрою є кілька сусідів. Кожний вузол такої мережі може мати передавати інформацію з такими самими вузлами «на рівних», таким чином група сусідніх вузлів можуть утворити осередок (Mesh). В такій мережі можна реалізувати доставку даних без координації з центру, а за допомогою принципу "взаємомовиручки" сусідніх вузлів.

Мережа, побудована на базі топології Peer-to-Peer з децентралізованою доставкою даних, називається мережею Mesh. Роль координатора в такій мережі зводиться лише до функції першого мережного пристрою, що є носієм адреси мережі. Реалізацією таких мереж є деякі окремі технології (Bluetooth mesh, Zigbee, Thread та ін.).

Можливість самоорганізації та самовідновлення мережі на базі топології Peer-to-Peer дозволяє спонтанно та оперативно створювати мережі. Велика кількість таких вузлів, що розміщено на деякій території, автоматично формують мережу. Однак, якщо всі мережні вузли мережі (або їх більшість) мають автономне живлення, існує проблема обмеженого часу функціонування такої мережі. Час роботи такої мережі також зменшується зі збільшенням території охоплення мережею.

В багатьох сферах застосування таких мереж оперативність та відсутність витрат на координування є головним критерієм. Спонтанно створювані мережі називаються латинським терміном Ad-Hoc, (лат. – «з нагоди»). Відмінною рисою таких мереж є обмежена можливість у розширенні у часі та у просторі.

Наявність синхронізації доступу до мережевих ресурсів дозволяє значно оптимізувати енергетичні витрати мережевих пристроїв, а також виключає помилки при доставці інформації між вузлами через одночасну передачу інформації через радіоканал (колізії), але знижує швидкість передачі інформації в системі.

2 ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ БЕЗДОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

2.1 Класифікація та особливості модулів Wi-Fi мереж

Модулі радіозв’язку, що працюють із бездротовими мережами можна розділити на кілька категорій, що відрізняються складністю та принципом роботи.

Перша категорія (Рисунок 2.1) охоплює пристрої що складаються з радіо трансивера, що виконує лише задачі зв’язку та передачі інформації в мережі Wi-Fi та в рамках мереж що засновано на стандарті IEEE 802.15.4.

Такий трансивер обов’язково повинен бути пов'язаний із мікроконтролером або зовнішньою системою за допомогою одного з інтерфейсів внутрішньо схемного з’єднання, таких як UART, SPI або I^2C.

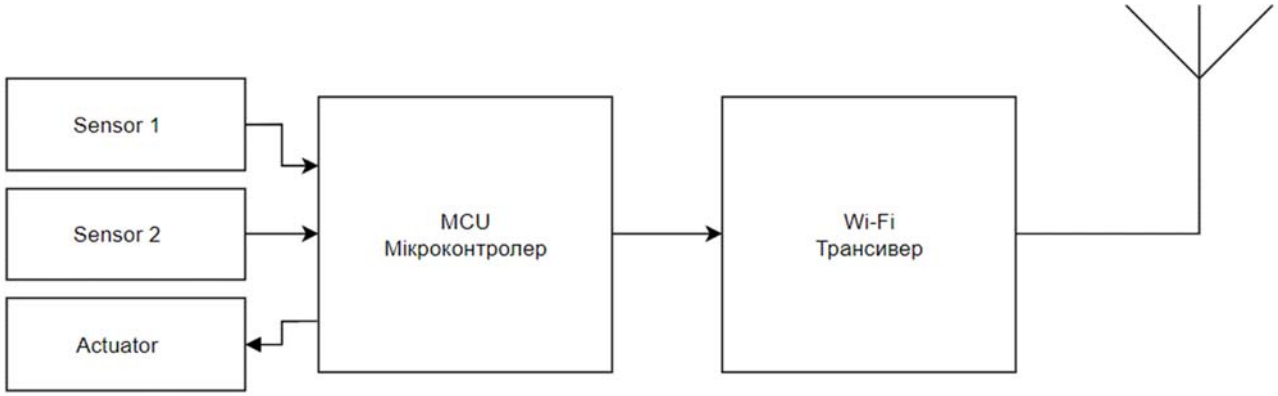

Рисунок 2.1 – Структурна схема системи, що використовує Wi-Fi трансивер з першої категорії у пов’язанні з окремим мікроконтролером

Серед прикладів таких модулів можна навести модуль Taiyo Yuden WYSBMVGXB представлений на рисунку 2.2, що забезпечує відповідність стандартам IEEE802.11a/b/g/n, а також має у своєму складі трансивер мереж Bluetooth 4.2.

Швидкість передачі інформації цього модуля сягає 150 Mbps в мережі 5 ГГц IEEE802.11a 11n. Є підтримка подвійного діапазону (dual band).

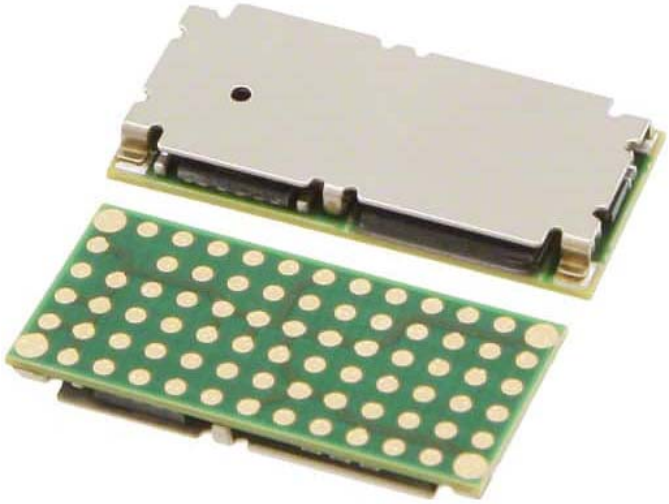

Рисунок 2.2 – Загальний вид модуля Taiyo Yuden WYSBMVGXB

Друга категорія, структурна схема якої зображена на рисунку 2.3 охоплює пристрої які базуються на використанні однієї мікросхеми. Це називається системою на кристалі(SoC). Така система поєднує в собі повноцінний мікроконтролер та радіо трансивер для доступу до мережі Wi-Fi.

Для повного функціоналу такої системи необхідна лише наявність антени, що може також бути виконана на друкованій платі пристрою та допоміжної схемотехніки.

Такий пристрій може взаємодіяти з зовнішньою периферією, що складається з сенсорів та індикаторів так само, як і будь-який мікроконтролер. При необхідності, такі Wi-Fi мікроконтролери можна використовувати як звичайні радіо трансивери без використання їх можливостей як мікроконтролера, якщо їх замало для виконання певних конкретних задач.

Laird Connectivity пропонує сертифіковані модулі WiFi, які забезпечують надійне бездротове підключення навіть у найсуворіших умовах. Такі модулі ідеально підходять для надійного, критичного для бізнесу зв’язку в медичних, промислових та комерційних умовах, де необхідна РЧ-продуктивність, низьке енергоспоживання, спрощена розробка додатків та швидкий вихід на ринок.

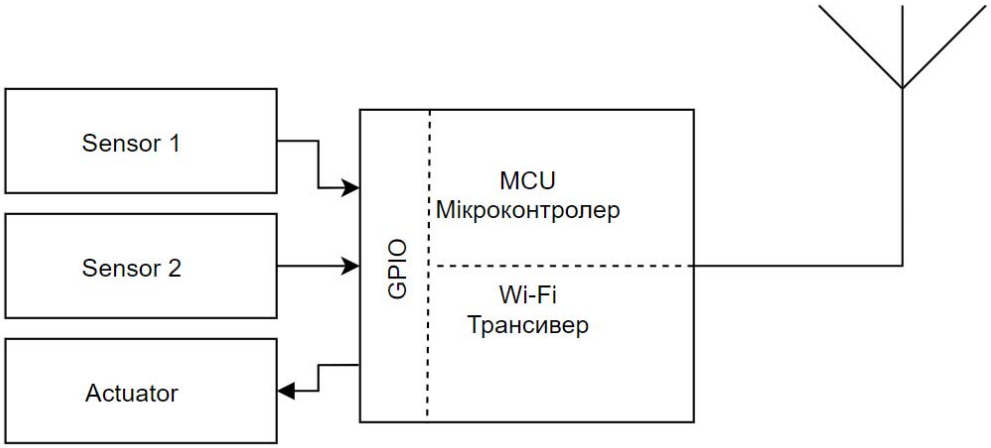

Рисунок 2.3 – Структурна схема системи побудованої модулі другої категорії (SoC)

Прикладом таких модулів є модулі засновані на SoC компанії Espressif ESP8266 (Рисунок 2.4). Мікроконтролери ESP8266EX включають в себе Tensilica L106 32-бітний мікропроцесор, побудований на RISC архітектурі, мають набір інтерфейсів, що складається з SPI, I^2C, UART, та 17 портів вводу-виводу, 4 з яких можуть бути використані з широтно-імпульсною модуляцією(ШІМ).

Рисунок 2.4 – Загальний вигляд модуля ESP12E на базі ESP8266

Радіо-трансивери можна також класифікувати за конструктивним виконанням на модулі, що вже мають у своєму складі мікросхему трансивера та всі необхідні для роботи допоміжні елементи схеми і антену, та на мікросхеми що мають бути встановлені безпосередньо на друковану плату пристрою, але потребують додаткової розробки схеми навколо даної мікросхеми.

Компанія Laird Connectivity розробила комплексне рішення для платформи IoT в надійному, економічно вигідному пакеті.

Sterling-EWB – це високопродуктивний комбінований модуль WLAN та Bluetooth 2,4ГГц, який дозволяє легко збирати дані з датчиків та бездротово надсилати їх до хмарних служб. Модуль Sterling-EWB, що має промисловий рейтинг температури та широкі сертифікати країн, забезпечує гнучкість у дизайні для задоволення широкого спектру застосувань, включаючи безпеку та автоматизацію будівлі, підключення IoT та M2M та розумні шлюзи.

На основі кремнію Cypress 4343W останнього покоління із вбудованим модулем ST Micro STM32F412 Cortex M4 MCU, Sterling-EWB пропонує керування акумулятором, орієнтованим на енергоспоживання, що дозволяє розгортатись у віддалених акумуляторних пристроях. Бортовий мікроконтролер STM32F412 Cortex M4 відповідає декільком сенсорним інтерфейсам, включаючи SPI, QSPI, USART, PCM, ADC, I2C, I2S, GPIO та JTAG.

Sterling-EWB також повністю сумісний з WICED SDK Cypress. WICED SDK – це комплексний програмний пакет, який дозволяє клієнтам використовувати набір інструментів, які прості у використанні та спрощують складні конструкції додатків. Ці можливості в поєднанні зі світовою підтримкою Laird Connectivity дозволяють клієнтам реалізувати свої IoT-дизайни та швидко змусити їх виходити на ринок.

Sterling-EWB пропонується в трьох стилях пакету, включаючи модуль SIP, модуль друкованої плати з вбудованою антеною мікросхеми або модуль друкованої плати з роз'ємом u.FL.

Для простоти дизайну друкованої плати та технологічного процесу рекомендується використовувати мікросхему чи модуль радіочастотного роз'єму. Окрім того, стиль пакету монтової мікросхеми пропонує більшу стійкість до де-налаштування, ніж типові антени з мікросхемами або мікросхеми – все у меншому пакеті.

2.2 Класифікація та особливості модулів зв’язку мереж з малою пропускною здатністю

Головною особливістю модулів зв’язку для мереж з малою пропускною здатністю є значно менше споживання електроенергії, що дозволяє використовувати пристрої на їх основі з живленням від акумулятора або батарейних елементів протягом довгого часу. Однак, як виходить з назви, в мережах, що будуються на таких модулях є сильні обмеження на кількість та частоту передачі даних.

Класифікація модулів за підключенням їх в пристрої повністю співпадає з Wi-Fi модулями.

Прикладом модуля, що відноситься до класу модулів SoC є CC2538 (Рисунок 2.5). Цей модуль інтегрує радіо IEEE 802.15.4 (2,4ГГц) та процесор ARM Cortex-M3.

Рисунок 2.5 – Загальний вид модуля на базі CC2538 з підсилювачем CC2592

CC2538 інтегрує радіо IEEE 802.15.4 (2,4 ГГц), процесор ARM Cortex-M3, прискорювач системи безпеки, а також достатньо флеш-пам'яті та оперативної пам'яті, щоб запустити стек ZigBee IP® і профіль SE2.0 без необхідності підключення зовнішньої пам'яті.

CC2538 також включає апаратну підтримку для обчислень відкритих ключів ECC і RSA і націлений на програми Smart Grid, такі як ZigBee Smart Energy 2.0. Сімейство пристроїв CC2538 наразі підтримує стек ZigBee PRO Z-Stack™ від TI з пов’язаними профілями та стек ZigBee IP з профілем Smart Energy 2.0.

Однак, використання не обмежується лише цими протоколами. CC2538, наприклад, також підходить для реалізацій 6LoWPAN та бездротового HART.

CC2538 підходить для систем, де потрібно дуже низьке енергоспоживання. Доступні режими сну з дуже низьким енергоспоживанням. Короткий час переходу між режимами роботи також забезпечує низьке споживання енергії.

2.3 Обґрунтування вихідних даних для проектування мережі

За розмірами фізичної зони розміщення бездротової сенсорної мережі (БСЖ) належать до класу бездротових персональних обчислювальних мереж (WPAN). Характерною особливістю мереж WPAN є їхнє невисоке енергоспоживання. В даний час мережі WPAN представлені двома класами: з укороченим радіусом дії (до 10 м) та зі збільшеним радіусом дії (до 100 м), що дозволяє їм за своїми функціональними можливостями перебувати на стику з WLAN.

Одноранговi мережі можуть формувати довільні топологічні структури, обмежені лише дистанцією між кожною парою вузлів. Прикладом одноранговоі або піринговоі мережі (від англ. peer-to-peer, P2P – рівний до рівного) є кластерне дерево.

Відповідно до стандарту IEEE 802.15.4 [2] сенсорна бездротова система складається з повнофункціональних пристроїв (FFD) та пристроїв зі зменшеним функціоналом (RFD).

FFD пристрої можуть виступати як:

– PAN-координатор (Personal Area Network Coordinator). Найбільш дорогий тип пристроїв, так як він повинен містити всю інформацію про мережеві з'єднання, мати великий обсяг пам'яті та високу продуктивність;

– координатор. Координатор може реалізовувати функції ретранслятора, моста, маршрутизатора та шлюзу;

– кінцевий пристрій.

RFD-пристрої можуть виступати лише у ролі кінцевого пристрою. Такі пристрої можуть вести обмін інформацією лише з FFD-пристроями. Такі пристрої застосовуються у простих програмах, наприклад, для керування світлом [9]. RFD-пристроям не потрібно передавати великий обсяг інформації і вони можуть вести активний обмін даними тільки з одним FFD-пристроєм в певний момент часу.

Тип мережі кластерне дерево є окремим випадком мережі peer-to-peer, в якій більшість пристроїв є FFD. Пристрої RFD підключаються до кластера як кінцеві вузли. Для підключення до мережі віддалених від координатора PAN нових мережевих пристроїв можуть використовуватися вже підключені до мережі FFD в режимі координатора. У цьому режимі вони, як і координатор PAN, маяками ініціюють приєднання в мережу нових мережевих пристроїв. В результаті формується кластер із мережевих пристроїв, які приймають сигнал від свого координатора. Вся інформація про кластер доступна координатору PAN. Так можуть формуватися мультикластери із мережевих пристроїв.

Для розробки моделі бездротової сенсорної мережі необхідно визначити вихідні дані.

Загальна кількість вузлів N_m є сумою необхідного розрахункового числа вузлів $N_{mд}$ (достатнього) та резервного N_{mp} (надлишкового). Достатня кількість вузлів розраховується виходячи з 2-х умов:

1) Покриття сенсорного поля – вузли мають обмежений радіус дії внаслідок обмеженої потужності передавача (P_{Tx}), чутливості приймача (P_{Rx}), заряду батареї (E_m) та дії різних перешкод.

Радіус дії (R_s) можна визначити через згасання A [10]

$$P_{Tx} - A = \mathrm{P}_{Tx,} \tag{2.1}$$

$$\text{де } A = 20\alpha_{cp} \lg \frac{4\pi\, df}{C} \tag{2.2}$$

де α_{cp} – питомий коефіцієнт загасання середовища,

d – відстань між джерелом сигналу та одержувачем,

f – частота сигналу,

c – швидкість світла.

Позначимо $20\alpha_{cp}$ через k – коефіцієнт ослаблення середовища поширення сигналу (тоді для вільного простору k = 20). Тоді

$$P_{Tx} - \mathrm{P}_{Tx} = k \cdot \lg \frac{4\pi R_S f}{C}, \tag{2.3}$$

Отже

$$R_S = \frac{C \cdot 10^{\frac{P_{Tx} - \mathrm{P}_{Tx}}{k}}}{4\pi f}. \tag{2.4}$$

Для економних витрат батареї необхідно використовувати мінімальну потужність передавача. Стандарт IEEE 802.15.4 [2] визначає мінімальну потужність передавача $P_{Tx\min}$ = -3 дБм, а чутливість приймача в середньому $P_{Rx\min}$ = -92 дБм. Отже відповідно до (2.2) при k = 20 (для вільного простору) отримуємо значення R_S = 280 м. Але згасання A у реальному фізичному середовищі перевищує розрахункове. Це пов'язано з явищем поглинання та з різними втратами енергії.

2) Необхідна щільність точок виміру – визначається виходячи з вимог до проектованої мережі. Якщо достатньо вимірювання параметра в деякій точці (наприклад, вологість), достатня кількість вузлів може визначатися виходячи з щільності покриття сенсорного поля.

Резервні вузли необхідні для вирішення таких штатних для бездротових сенсорних мереж проблем, як:

– відсутність підтвердження працездатності вузла. Причинами можуть бути: пошкодження при розміщенні пристрою, занадто велика відстань до сусідніх вузлів, завмирання, низький заряд батареї та інше.

– час життя мережі [11]. Це один із критичних параметрів бездротових сенсорних мереж, який безпосередньо пов'язаний із її енергоефективністю. Недостатній заряд батареї окремих вузлів може призвести до непрацездатності всієї мережі. Наприклад, ефект "пляшкового горла" [12] – коли вузли поблизу БС мають найбільше навантаження (трафік) і, як наслідок, найбільша витрата енергії (Рисунок 2.6).

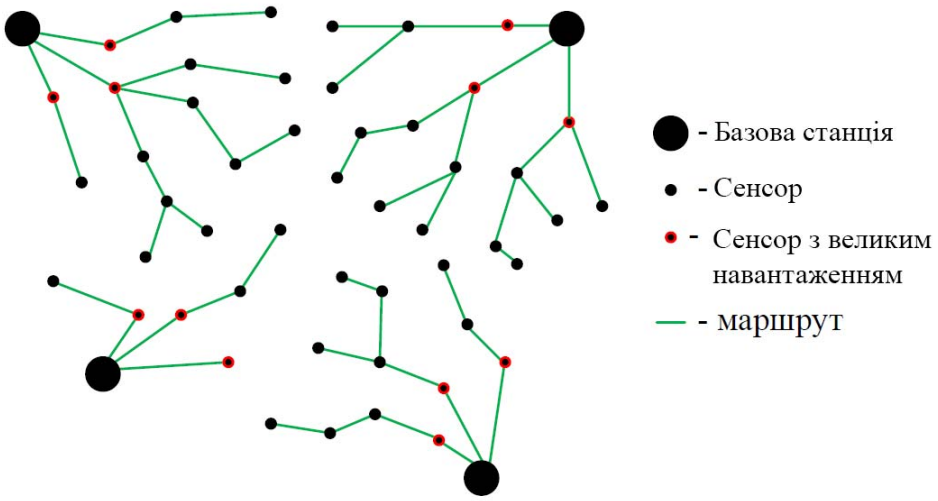

Рисунок 2.6 – Ефект "пляшкового горла"

Число резервних вузлів N*mp* визначається шляхом знаходження компромісу між вартістю мережі та часом життя.

Після визначення необхідної кількості вузлів, вони оснащуються необхідними датчиками та програмуються (включаючи надання унікальної мережевої адреси).

Можна, наприклад, використовувати коротку 16-бітну мережеву адресу пристрою, що призначається єдиним координатором мережі при її організації [13, 14]. Адресою вузла може бути порядковий номер, унікальна MAC-адреса мережного інтерфейсу або деякі унікальні характеристики вузлів.

Вибір способу розміщення вузлів на сенсорному полі залежить від призначення конкретної мережі та впливає на деякі фізичні параметри (наприклад, стійкість корпусу) та функціональні завдання, які потрібно вирішувати.

Також кожен спосіб має свій закон розподілу вузлів на сенсорному полі (детермінований, рівномірний, гаусівсовий та ін). Отже, топологія мереж впливатиме на її функціонування [15].

Важливим фактором є і місце функціонування мережі: відкритий простір (наприклад, сільськогосподарське поле), міські умови, приміщення, усередині технологічних пристроїв (наприклад, автомобіль) тощо. Це впливає на необхідність боротьби із завмираннями та багатопроменевістю.

Базові станції можуть являти собою приміщення з обладнанням та винесеною на опору антеною (за аналогією з базовими станціями сотових мобільних мереж), окремий пристрій у корпусі із захистом від погодних умов з винесеною антеною, яку також можна встановлювати на опорі, автомобіль з обладнанням у кузові та винесеною антеною тощо.

Вибір варіанта виконання базової станції, площа сенсорного поля та топологія мережі визначає кількість базових станцій. Також важливу роль відіграє потреба у прямій видимості між антенами.

Відстань прямої видимості між *i*-ою та *j*-ою БС залежить від висоти підвісу антени

$$d_{ij} = 4{,}12\left(\sqrt{h_i} + \sqrt{h}j\right), \tag{2.5}$$

де h_i та h_j – висоти підвісу антени *i*-ої та *j*-ої БС відповідно.

Оснащення БС може бути різним: наявність/відсутність приймача GPS для позиціонування та тимчасової синхронізації, живлення (від мережі чи батареї), обчислювальна потужність тощо.

Таким чином, вибір початкових умов подібний до просування по дереву, де кожен вибір обмежує кількість варіантів для наступного вибору.

Самоорганізація у сенсорних мережах є найважливішим етапом функціонування. Порівняння алгоритмів самоорганізації представлено у [16, 17]. Кожна з груп алгоритмів має свої переваги та недоліки та може застосовуватися для вирішення специфічних завдань сенсорних мереж.

2.4 Алгоритм самоорганізації зі створенням кластерів

Суть алгоритму зі створенням кластерів полягає у функціональній різнорідності вузлів. А саме, мережа ділиться на області, які називають кластерами (Рисунок 2.7).

Кластером називають об'єднання кількох вузлів що мають спільний ранг. Таке об’єднання може розглядатися як самостійна одиниця у бездротовій сенсорній мережі.

Таким чином, застосування принципів самоорганізації для кластеризації дозволяє уникнути таких недоліків алгоритмів маршрутизації, як неоптимальна структура мережі та використання обчислювальних ресурсів базової станції для конфігурування мережі, а також дозволяє підвищити ефективність розподілу вузлів мережі між кластерами.

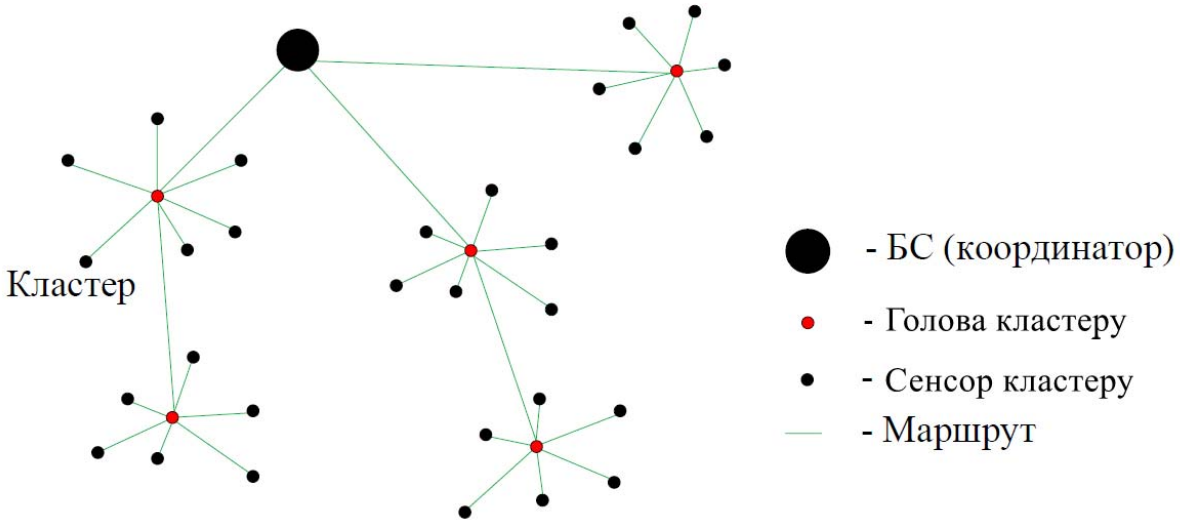

Рисунок 2.7 – Кластерна організація мережі

Усередині кожного кластера є голова кластера (Cluster Head) – вузол, який відповідає за збирання інформації з усього кластера, її обробку та подальшу передачу. Інші вузли кластера здійснюють лише збір даних та передачу їх на чолі кластера. Передача зібраної інформації відбувається між главами кластерів. Таким чином, вузли в мережі не є рівноправними і існує чітка ієрархія за функціональним призначенням вузлів.

Мінімальна кількість пристроїв у мережі – 2. Причому в будь-якій мережі має бути принаймні один FFD-пристрій, що працює як PAN-координатор. FFD-пристрої можуть спілкуватися з RFD-пристроями або іншими пристроями FFD.

Якщо розмір кластера перевищує дальність дії вузлів, то всередині кластера можуть бути організовані ланцюги для ретрансляції інформації від дальніх вузлів до вузлів, що знаходяться ближче до голови кластера (Рисунок 2.8).

До переваг алгоритмів зі створенням кластерів можна віднести те, що агрегування даних відбувається главами кластерів і пересилання агрегованих даних далі може також здійснюватися головами кластера. Таким чином,

мінімізуються затримки передачі, оскільки глави кластерів доступні завжди. Колізії пакетів виключені завдяки централізованому методу створення посилань.

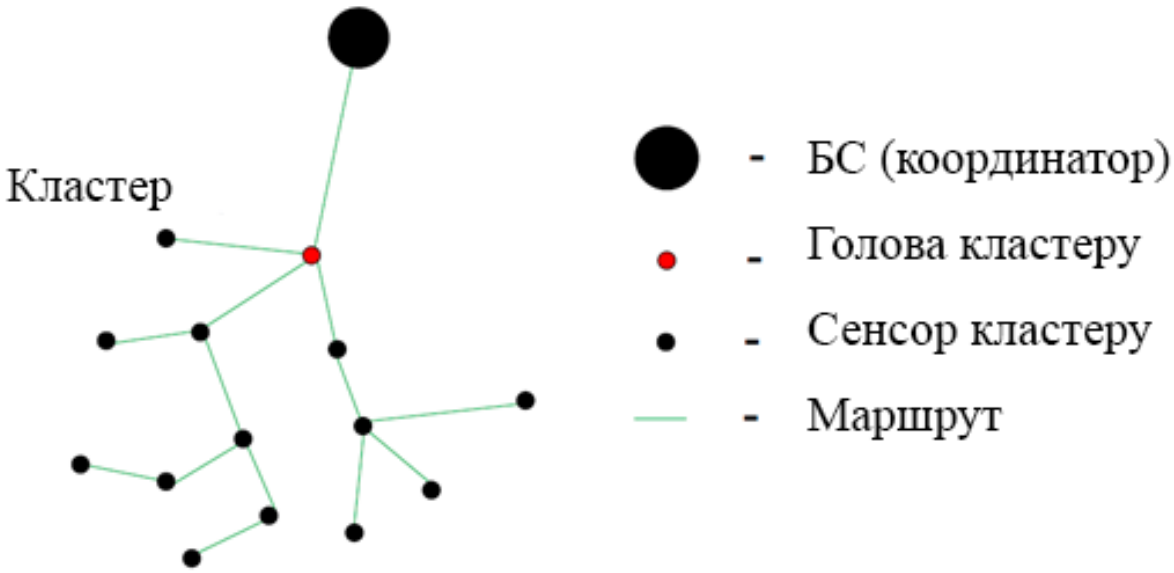

Рисунок 2.8 – Ретрансляція інформації всередині кластеру

Однак, така організація не надає оптимальних шляхів передачі даних. До того ж вузол, що виконує функції голови кластера, витрачає значно більше енергії, що призводить до швидкого виснаження батареї. Існують архітектури, що передбачають використання в якості вузлів збору даних спеціалізованих вузлів, що володіють великими запасами енергії та обчислювальними потужностями, проте цей підхід застосовується лише для вузького ряду додатків. До недоліків процедури формування кластерів можна віднести:

– формування мережі здійснює вузол-координатор. Координатор приймає рішення про прийняття вузла до кластеру та призначає вузли главами кластерів. В результаті зростає час утворення мережі;

– структура мережі, що формується, може бути не оптимальною.

2.5 Алгоритми зі створенням ланцюгів зв'язків

Ключовою ідеєю алгоритмів із створенням ланцюгів зв'язків є побудова ланцюга маршрутів від вузла до вузла, отже, кожен вузол обмінюється інформацією лише з найближчим сусіднім вузлом (Рисунок 2.9).

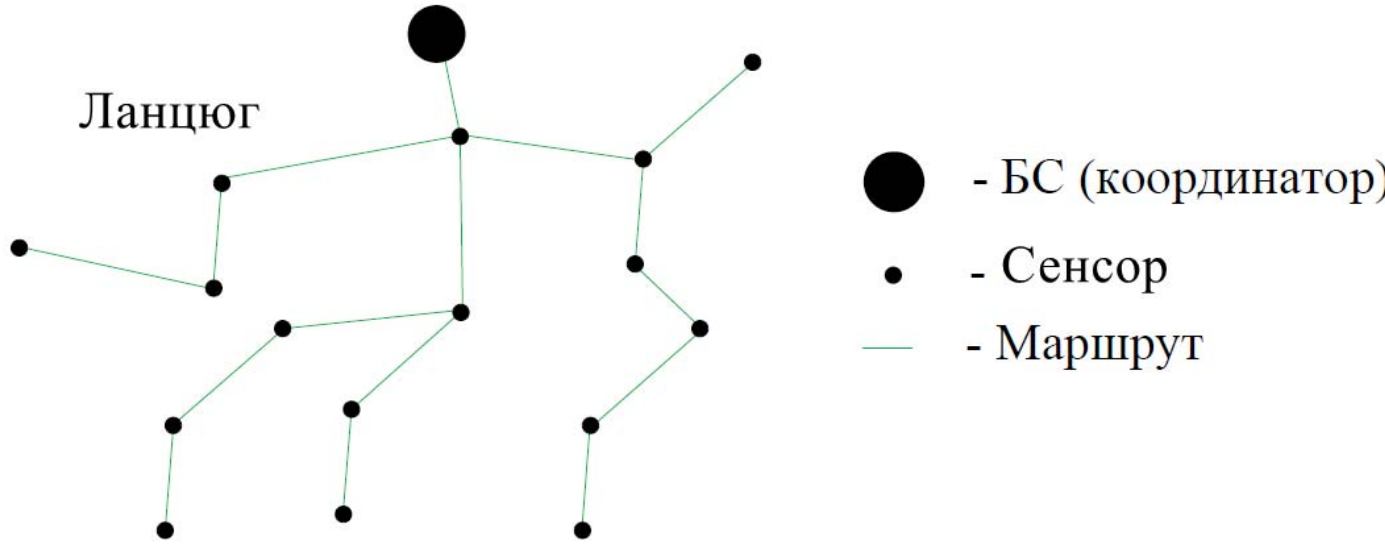

Рисунок 2.9 – Побудування ланцюга зв'язків

Кожен вузол визначає відстань до найближчого сусіднього вузла за рівнем прийнятого сигналу, а потім регулює потужність передавача рівня, достатнього для обміну інформацією з ним. Зібрані дані передаються від вузла до вузла, агрегуються кожному з вузлів й у результаті передаються на базову станцію одним обраним вузлом – лідером.

Вузли, що передають на базову станцію, змінюються по черзі. Тому енергія вузлів, витрачена спілкування з базової станцією, розподілена рівномірно, що збільшує термін експлуатації мережі. Також енергоефективність підвищується тим, що тільки один вузол передає інформацію на базову станцію за один цикл, а

інші обмінюються інформацією між собою. За такого алгоритму побудова ланцюгів зв'язків передбачає, що це вузли мають загальну інформацію про мережі.

Лідер у кожному циклі передачі вибирається у випадковому місці ланцюга, що дозволяє рівномірно розподілити число вузлів, що вийшли з ладу, тим самим підвищуючи надійність сенсорної мережі на відмову. У кожному циклі естафетною передачею ініціюється лідер передачі інформації з кінців ланцюгів.

– До переваг алгоритмів побудови ланцюгів можна віднести:

– відсутність необхідності високої потужності передачі, оскільки більшість вузлів передають дані лише локальним сусідам;

– зниження навантаження лідера у порівнянні з главою кластера, оскільки він отримує агреговані посилки даних;

– зниження енерговитрат унаслідок передачі на базову станцію лише одним вузлом.

Недоліками алгоритмів є чутливість до густини вузлів. При великій кількості вузлів сформовані ланцюги мають велику довжину і виникає велика затримка, а також лідер має велике навантаження, що може призвести до відмови.

Створення методу самоорганізації на основі розглянутих алгоритмів обґрунтовано тим, що передбачається використання методу за великих розмірів мережі та високої щільності.Також жоден із існуючих методів не дозволяє отримати всю необхідну інформацію для реалізації запропонованого методу позиціонування що розглянуто у пункті (п. 3.5).

2.6 Розробка методу ініціалізації бездротової сенсорної мережі

Завершальним етапом проектування та побудови БСЖ є безпосереднє розгортання на сенсорному полі та активізація (включення) елементів для побудови структурованої мережі.

Існує кілька алгоритмів ініціалізації БСЖ [18-19]. Але більшість з них не задовольняють вимогам щодо енергоефективності, витраченого часу і не дають можливість отримати інформацію для позиціонування елементів мережі із заданою точністю.

В аналізованій мережі процес оцінюваного позиціонування організований шляхом знаходження додаткового затухання.

У бездротовій сенсорній мережі дуже важливо, щоб час ініціалізації був мінімальним і необхідна інформація була зібрана якомога раніше [20].

Початковим етапом ініціалізації є оцінне позиціонування елементів мережі. У бездротових сенсорних мережах позиціонування необхідно для візуалізації сенсорного поля на пульті управління (ПУ), можливості контролювати окремі зони і реагувати на критичні ситуації локально, пошуку (наприклад, пошук радіоактивного сміття), маршрутизації тощо.

На етапі ініціалізації мережі оператор отримує інформацію і про те, скільки працездатних вузлів (сенсорів) визначатимуть надалі «життя» БСЖ, що розгортається.

Якщо у проектованій мережі немає завдання безпосередньо визначати глобальні координати вузлів, то оціночне позиціонування однаково необхідне для кожної бездротової сенсорної мережі.

Розглянемо послідовність кроків запропонованого методу з прикладу сенсорного поля виду (Рисунок 2.10).

Блок 1. Базові станції мережі в широкомовному режимі по черзі посилають пілот-сигнали для позиціонування щодо один одного методом ToF (Time of Flight – Час проходження), не задіявши вузли сенсорного поля. Вони при цьому знаходяться в режимі сну, тому їх заряд батареї витрачається найбільш економно. Становище вузлів невідоме.

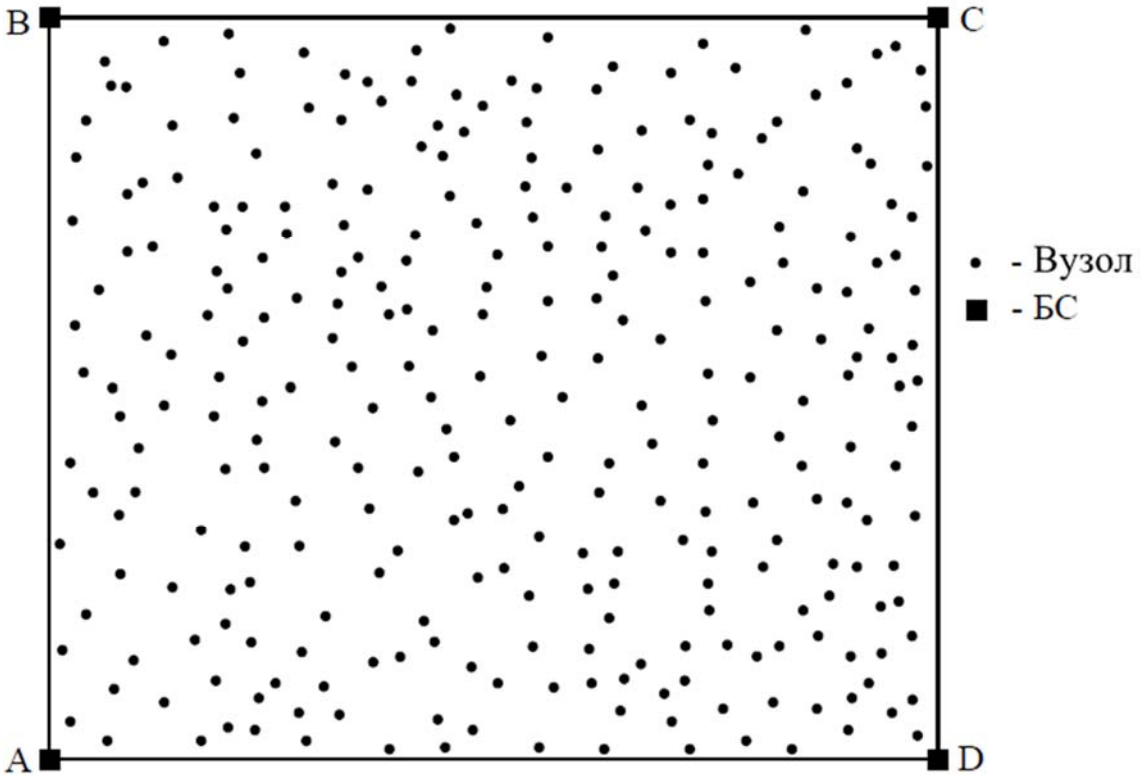

Рисунок 2.10 – Приклад сенсорної мережі

Спочатку керуюча базова станція (у цьому прикладі – A) посилає пілот сигнал. Після розсилки пілот-сигналу базовою станцією A решта БС визначають відстані A і записують ці значення в свою базу даних (БД). Передачу починає базова станція, всі БС записують відстані від і аналогічно для C і D.

Кількість ітерацій посилки пілот-сигналу залежить від необхідної точності (зазвичай щонайменше 3000). Отже, визначаються точні відносні координати БС друг щодо друга.

Блок 2. Далі, базова станція A активізує вузли сенсорного поля для оцінного позиціонування методом RSSI і відправляє тестовий сигнал із заданим рівнем – пілот-сигнал. Кожен із вузлів вимірює рівень цього сигналу і записує у свою базу даних. Аналогічно для, C і D.

Так, по черзі всі базові станції розсилають пілот-сигнали, а вузли приймають їх та вимірюють рівень сигналу від кожної БС згідно з алгоритмом RSSI і ці рівні записуються у відповідні регістри. У той самий час, кожна БС позиціонується щодо інших методом RSSI з допомогою додаткових вузлів.

Цей масив значень відстаней фактично визначає розташування кожного вузла у системі відносних координат базових станцій. Але поки що ця інформація не стала доступною на пульті керування або сервері (адміністратору мережі).

Для переходу до наступної фази ініціалізації, в ході якої масив значень RSSI певної кількості вузлів стане доступною пульту керування, необхідно розпочати ретрансляцію RSSI-інформації кожного вузла у напрямку відповідних БС, а вже потім ця/ці БС передають цю інформацію на сервер.

Блок 3. Відповідна БС відправляє сигнал на активізацію вузлів, що знаходяться в області центру сенсорного поля, використовуючи можливість вказівки цієї області шляхом передачі конкретного діапазону значень рівнів сигналу БС.

Блок 4. Для початку збору інформації на цій фазі ініціалізації вузлам сенсорного поля необхідно почати передачу, для чого потрібно отримати доступ до середовища. На MAC-рівні (доступу до середовища) специфікацією IEEE 802.15.4 [2] рекомендовано використання протоколу CSMA/CA через те, що його недоліки є не суттєвими для БСЖ [21].

Вузли сенсорної мережі надсилають jam-signal – так званий сигнал про початок передачі та прослуховують канал. Усі вузли, які прийняли цей сигнал, відкладають передавання сигналу на випадковий інтервал часу. Оскільки вузли мережі не синхронізовані, то передача всіма вузлами одночасно неможлива. Отже, в мережі буде обмежена кількість активних вузлів (цей алгоритм спрощено можна назвати «хто першим»). Цей «перший» вузол стає головним кластером на даний момент часу (ситуаційний кластер) (Рисунок 2.11).

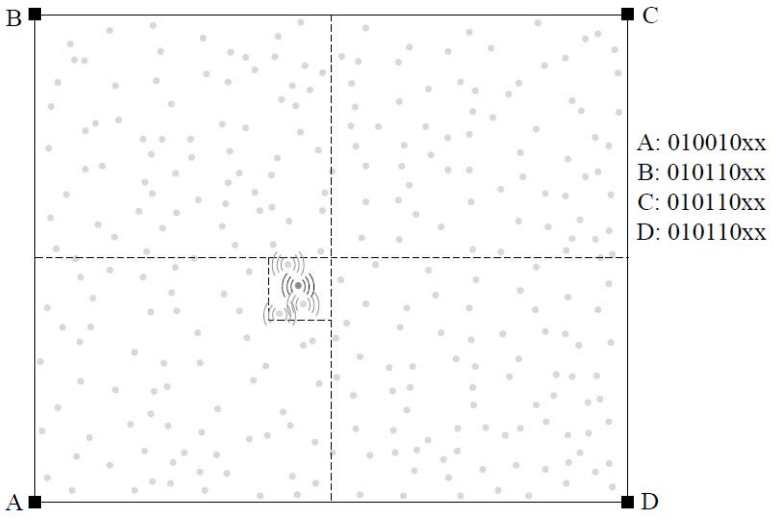

Рисунок 2.11 – Активізація вузлів у заданій області сенсорного поля

Блок 5. Головний рівень ситуаційного кластера з бази даних рівнів від базових станцій вибирає найближчу (з найбільшим значенням).

Блок 6. За наявності вільного каналу вузол передає у широкомовному режимі свою адресу та місцезнаходження (рівні від БС, Рисунок 2.12 а). Адресою може бути рівні прийнятих пілот-сигналів від БС, тобто. фактично – місцезнаходження.

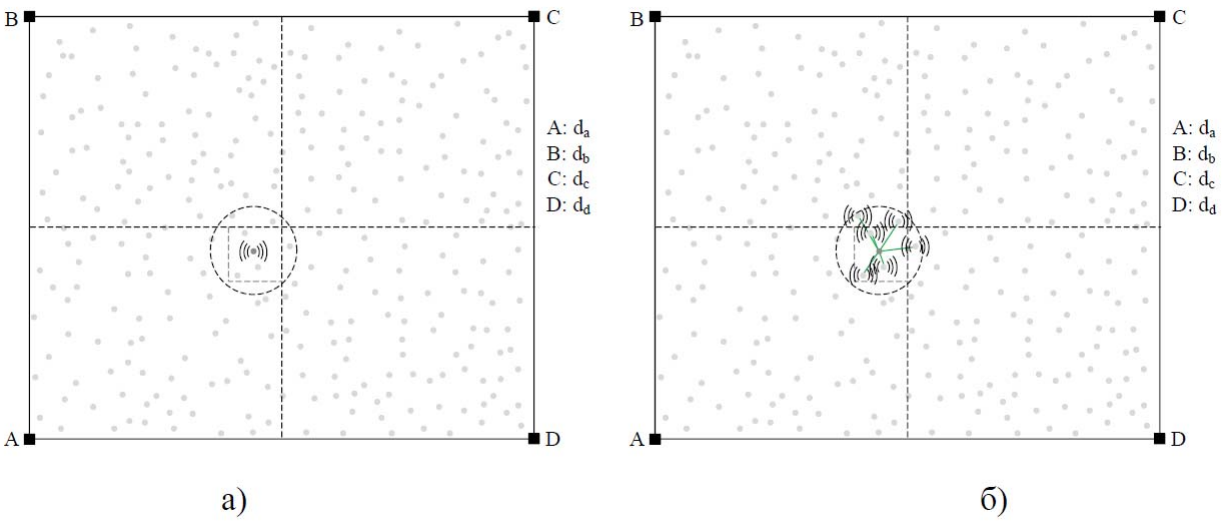

Рисунок 2.12 – Взаємодія вузлів у ситуаційному кластері

Блок 7. Вузли, які отримали цю інформацію, відправляють підтвердження та свої параметри (адреса, рівні від БС та значення контрольованого параметра) главі ситуаційного кластера (Рисунок 2.12 б).

Якщо підтвердження не прийшло, стандарт IEEE 802.15.4 передбачає поетапне підвищення потужності передачі до рівня, коли сусідні вузли будуть в змозі прийняти цей сигнал. Якщо цього не відбулося на максимальному рівні передачі – цей мат непрацездатний і переходить у сплячий режим.

Отримуючи інформацію від усіх сусідів, що «відгукнулися», глава кластера вимірює рівні сигналу до кожного сусіда, обробляє, агрегує і передає всю отриману ним інформацію (про рівні сигналів від БС, заряд батареї і т.д.).

Блок 9. Вибір ретранслятора полягає в двох критеріях «найближчий сусід» з максимальним рівнем від найближчої БС (Рисунок 2.13 а). Інформація самого вузла із цього вибору виключається.

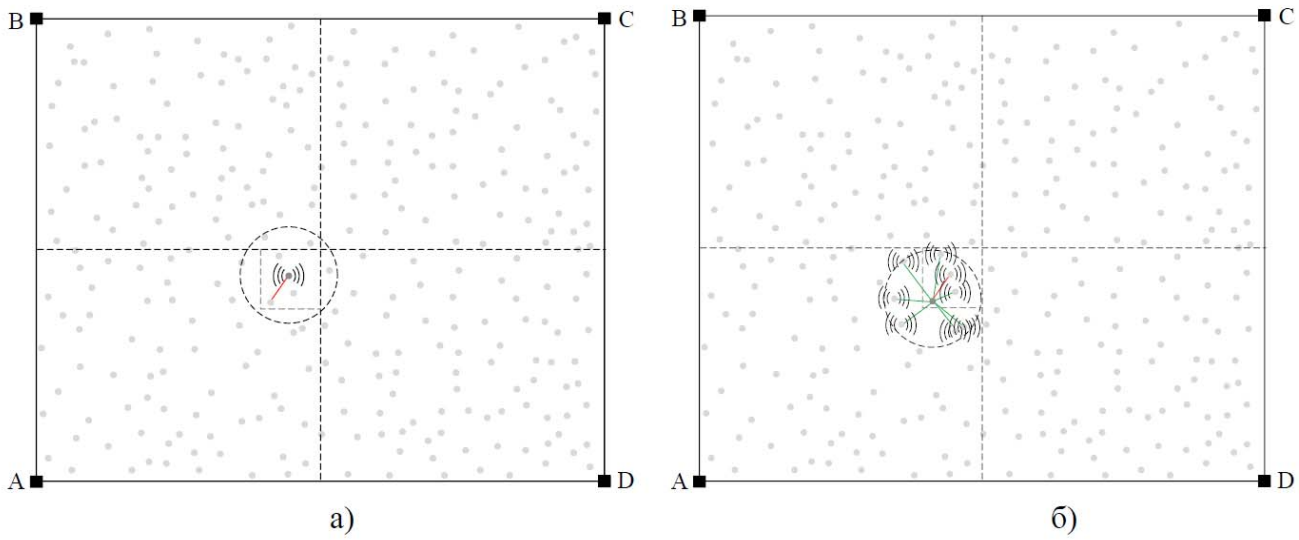

Рисунок 2.13 – Пошук вузла-ретранслятора та обмін інформацією

Розглянемо детальніше процес побудови маршруту з прикладу на рисунку 2.14 щодо вузла №1 (значення обрані довільно).

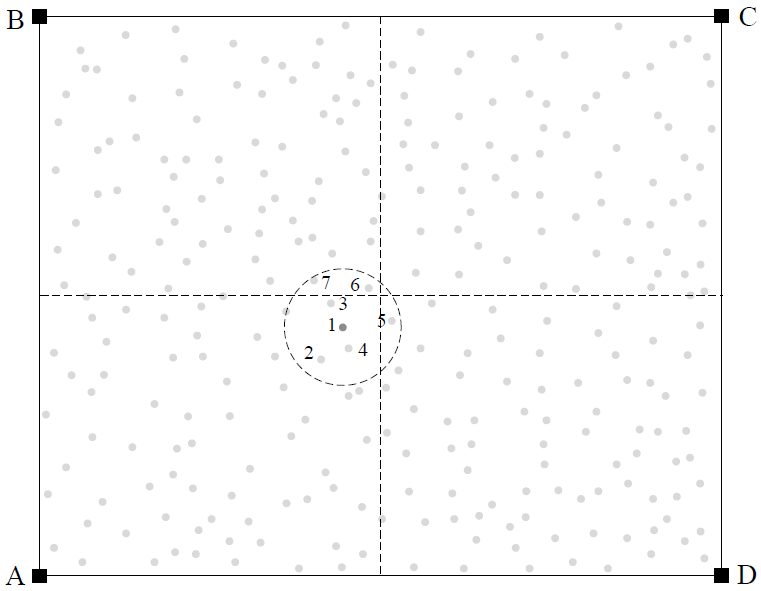

Рисунок 2.14 – Умовна нумерація вузлів у ситуаційному кластері

За рівнями сигналу найближчої БС є А (таблиця 2.1), тому всю інформацію вузол відправлятиме у її напрямку.

Таблиця 2.1 – Рівні сигналу БС вузла №1

Базова станція	RSSI, дБм
A	8,3
B	7,8
C	7,2
D	7,5

Блок 10. У базі даних рівнів сигналу від сусідніх вузлів вибирається найближчий до вузла №1 (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Рівні сигналу БС вузла №1

№ вузла	RSSI від сусіда, дБм	RSS БС А сусіда
2	1,96	8,32

Продовження таблиці 2.2

№ вузла	RSSI від сусіда, дБм	RSS БС А сусіда
3	1,84	8,05
4	1,71	8,13
5	1,98	7,9
6	1,96	7,83
7	2,11	7,86

Блок 11. З даних таблиці 2.2 найближчим до базової станції А з найближчих сусідніх вузлів сенсора №1 є вузол №2 (Рисунок 2.14). Йому вузол №1 передає свої параметри та параметри сусідів (зокрема яких і параметри самого вузла №2).

Блок 12. Вибраний вузол-ретранслятор стає наступним розділом кластера і збирає інформацію про свої сусідні вузли (Рисунок 2.13 б), частина яких були сусідами попереднього головного вузла. Таким чином, деякі вузли повторно передаватиме свої параметри. Вони усереднюються главою кластера.

Маршрут між першим головним вузлом та поточним записується до таблиці маршрутизації (Рисунок 2.13 а).

Блок 13. Якщо наступним одержувачем інформації не є базова станція А, аналогічно сенсор №2 вибирає наступний вузол для ретрансляції і передає інформаційний блок про працездатні пристрої .

Аналогічно будується подальший маршрут, збираються та передаються по ланцюгу параметри відповідних вузлів на БС А.

Отже, ланцюг маршруту для цього прикладу виглядає так: 1→2→8→9→10→11→12→13→14→15→16→А (Рисунок 2.15).

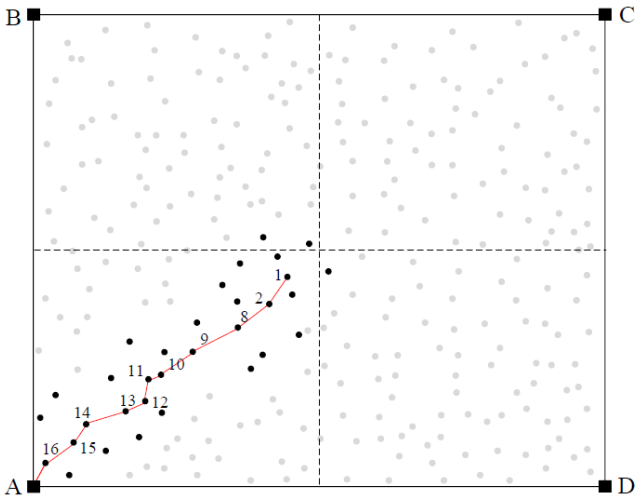

Рисунок 2.15 – Кінцевий ланцюг маршруту та інформація про задіяних вузлів

У базу даних базової станції А вноситься інформація про вузли, які задіяно для формування маршруту. Якщо до БС не дійшла інформація, то область, де активуються вузли (Блок 3), збільшується (передбачається, що в області були відсутні справні вузли).

Вузли записують маршрут передачі та передають його своїм сусідам (Рисунок 2.16). До наступного циклу актуалізації цей маршрут буде незмінним. вузли, для яких БС А не найближча, до цього маршруту не входять.

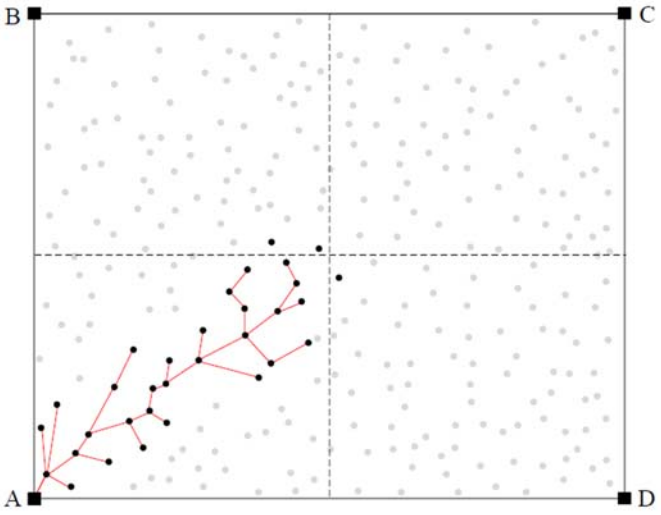

Рисунок 2.16 – Маршрут для всіх задіяних вузлів

Блок 14. Після такого циклу збору інформації стають відомими параметри деякого відсотка вузлів. Ті вузли, які «виявилися» у процесі ініціалізації мережі, надалі можуть бути використані як резервні і приєднатися до мережі вже в процесі її подальшого функціонування. Якщо кількість вузлів, інформація від яких дійшла до БС, недостатньо або поле занадто велике, можна розбити квадранти на додаткові сектори.

У цьому отримувати 100% інформації про число вузлів немає сенсу, оскільки вони можуть бути пошкоджені, не мати сусідів у зоні свого покриття тощо, тоді як численні ітерації збору інформації виснажать заряд батареї.

Блок 15. Аналогічно в цей же час базова стація активізує вузли у своєму квадранті і відбувається процес доставки інформації (Рисунок 2.17 а), аналогічний попередньому, і формування маршруту (Рисунок 2.17 б).

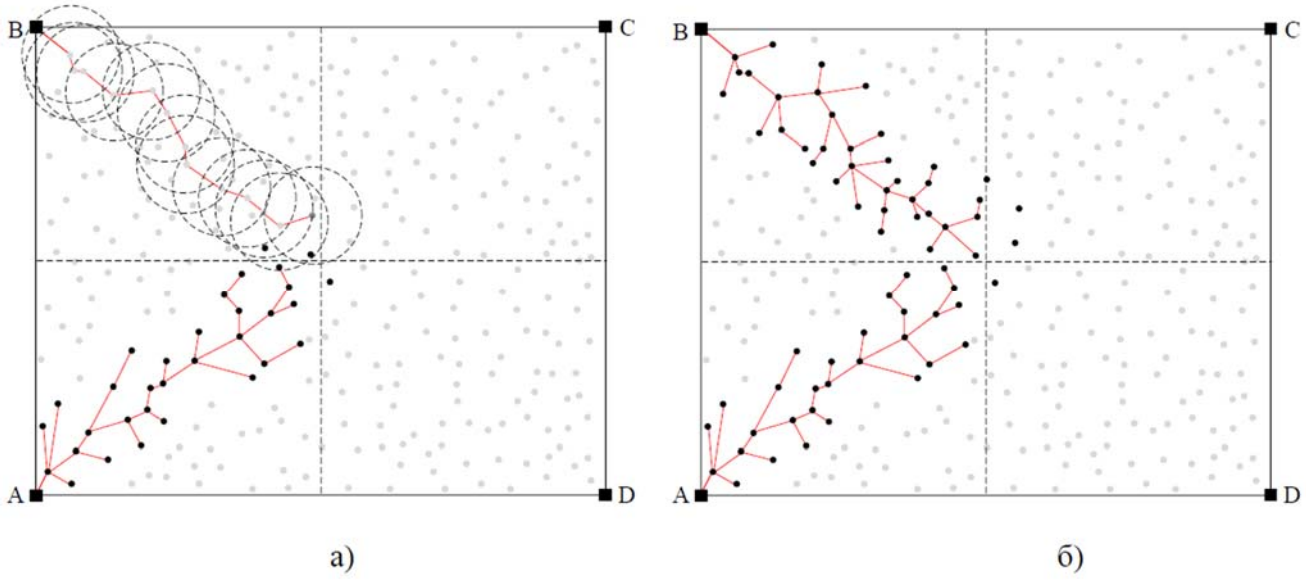

Рисунок 2.17 – Маршрут для вузлів, задіяних у побудові маршруту до БС

Блок 16-17 Аналогічно для C і D.

В результаті збору інформації сенсорне поле виглядатиме таким чином (Рисунок 2.18):

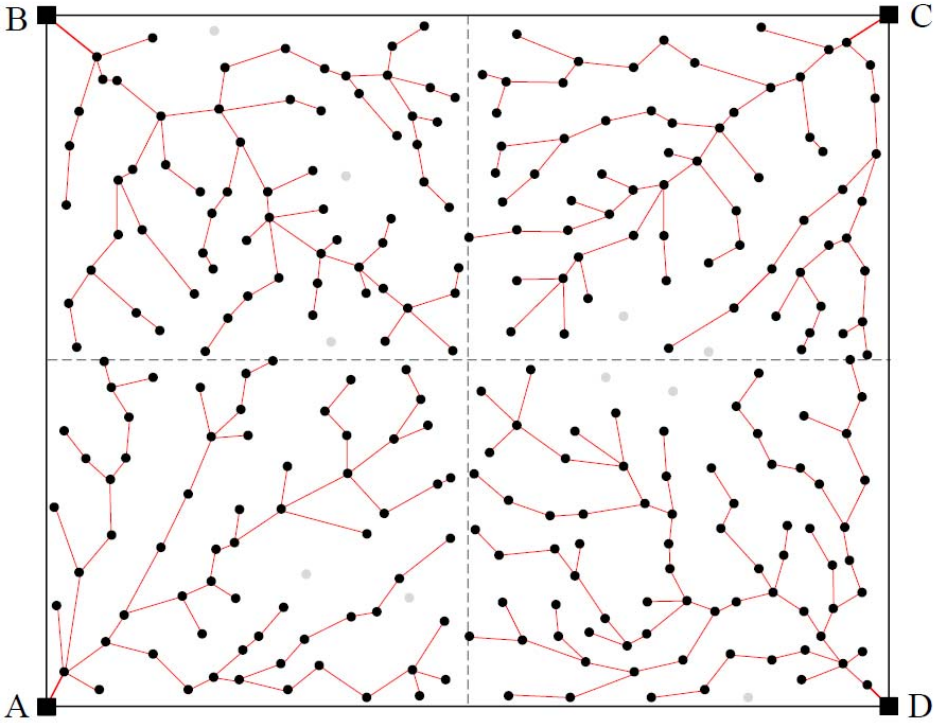

Рисунок 2.18 – Маршрути до базових станцій

Інформація з бази даних кожної базової станції передається на керуючу, після чого через шлюз на сервер та пульт управління.

Блок 18. Оскільки глобальні координати БС вважаємо відомими (хоча б одна БС обладнана модулем глобального позиціонування), то шляхом вирішення системи рівнянь

$$\begin{cases} d_A^2 = (x_A - x_m)^2 + (y_A - y_m)^2 \\ d_B^2 = (x_B - x_m)^2 + (y_B - y_m)^2 \\ d_C^2 = (x_C - x_m)^2 + (y_C - y_m)^2 \\ d_D^2 = (x_D - x_m)^2 + (y_D - y_m)^2 \end{cases}, \tag{2.4}$$

де (x_i, y_i) – координати i-тої БС,

d_i – відстань до i-тої БС, що визначається за допомогою методу RSSI.

Блок 19. Після розрахунку координат базові станції розсилають їх вузлам.

Як було зазначено раніше, отримані в такий спосіб оціночні координати не є досить точними через недоліки методу RSSI. Тому завдання підвищення точності визначення оціночних координат без використання додаткових модулів та без суттєвого ускладнення програмного забезпечення носить не лише академічний, а й практичний характер.

Розроблений алгоритм ініціалізації (самоорганізації) БСЖ дозволяє вже у процесі розгортання мережі отримати всю необхідну інформацію визначення місця розташування об'єктів БСЖ і реалізувати розроблений метод уточнення координат.

За рахунок суміщення переваг алгоритмів зі створенням ланцюгів зв'язків та організацією кластерів головний вузол ситуаційного кластера збирає інформацію з усіх сусідніх вузлів свого кластера, а передає, формуючи ланцюг зв'язків. Це дозволяє главі кластера збирати та передавати інформацію з мінімальними енергетичними витратами, оскільки немає необхідності передавати дані главі сусіднього кластера (що знаходиться на великій відстані), як при алгоритмі організації кластерів.

3 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ОБМІНУ ДАНИМИ У БЕЗДРОТОВІЙ МЕРЕЖІ

3.1 Постановка задачі для створення моделі передачі даних

На даний момент тема моделювання та оптимізація роботи бездротових мереж має досить високу актуальність. Це викликано насамперед тим, що більшість апаратних засобів, що використовуються при побудові таких мереж є досить новими і дуже швидко розвиваються.

Важливими факторами для сучасних бездротових мереж передачі інформації є обмеження елементів живлення. Для максимальної економії ресурсу елемента живлення, кінцеві мережеві пристрої максимально обмежують обробку даних до стиснення пакету даних, що передається між вузлами [21]. Для сучасних бездротових мереж передачі даних основними необхідностями є:

– актуалізація даних щодо стану мережі;

– мінімізація затримки при передачі корисної для мережі інформації;

– мінімізація активного часу в радіоефірі (time on air);

– максимальна дальність між вузлами, що можуть стабільно надійно вести обмін інформацією;

– максимальна можлива кількість активних пристроїв у мережі;

– надійність доставки інформаційних пакетів у мережі [22].

3.2 Побудування моделі бездротової мережі

Бездротова мережа складається з кількох типив пристроїв, що включає кінцеві пристрої [23], роутери та координатори мережі. Приклад такої топології [24] зображено на рисунку 3.1. У одноранговій мережі всі пристрої можуть взаємодіяти з будь-якими іншими пристроями у мережі, що є в радіусі їх досяжності.

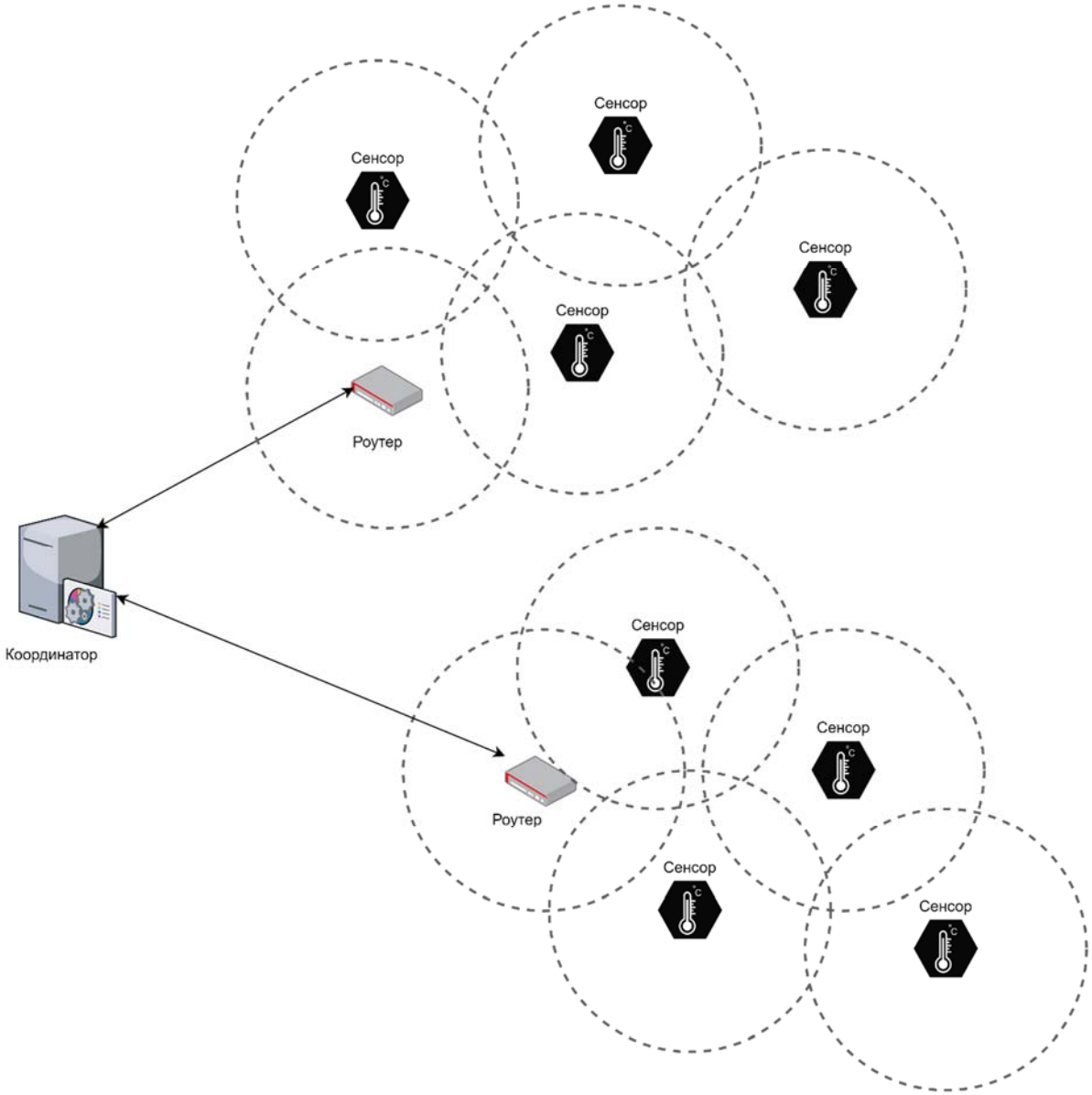

Рисунок 3.1 – Приклад типової бездротової сенсорної мережі

Більшість теоретиків моделюють мережі як вузли (точки) в евклідовій площині, два вузли можуть передавати інформацію між собою, якщо вони знаходяться в межах їхнього взаємного діапазону передачі, що в безперешкодному та однорідному середовищі означає, чи є їх евклідова відстань щонайбільше максимальним діапазоном передачі R (Рисунок 3.2). Ця модель широко відома як граф одиночних кругів і, хоча така модель не є досить

практичною, вона часто використовується як перший крок при моделюванні бездротової мережі.

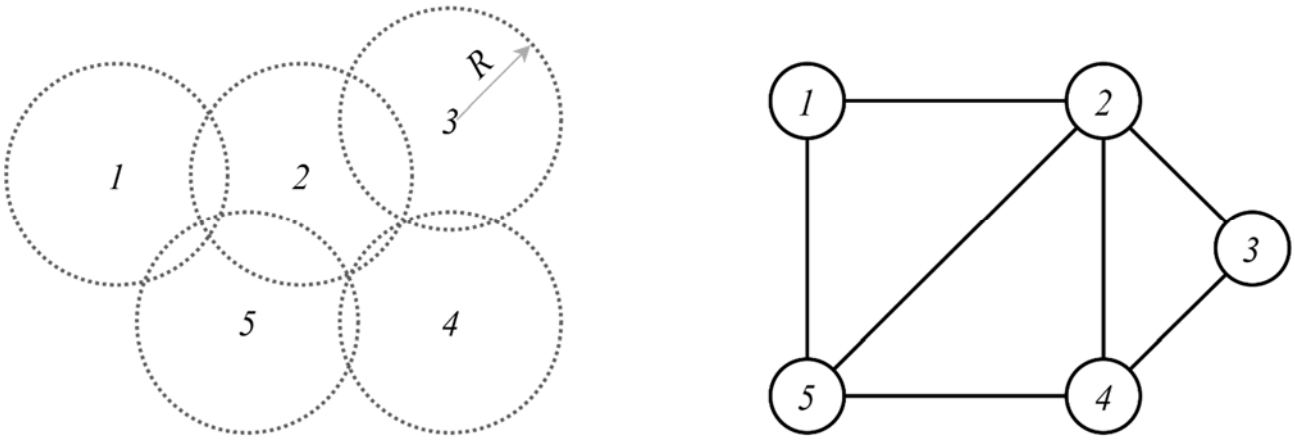

Рисунок 3.2 – Однорангова бездротова мережа та її модель у вигляді графа

Бездротову сенсорну мережу перед запуском алгоритму керування топологією позначимо за допомогою графу [25]

$$G = (V, E), \tag{3.1}$$

де V – набір вузлів;

E – набір комунікаційних каналів.

Наявно два стандартних способи представлення графа: як набору списків суміжних вершин або як матриці суміжності. Обидва способи підходять для опису як направлених графів, так і ненаправлених. Оскільки в більшості випадків в мережі передбачається мінімальна передача налаштувань від координатора мережі до кінцевих пристроїв, а також часто виникає необхідність підтвердження доставки повідомлень у мережі, передача інформації в мережі повинна бути двонаправленною.

При формуванні алгоритмів переважно графи представляють з допомогою списків суміжності, оскільки таке представлення забезпечує більш компактне

представлення розріджених графів, тобто таких мереж, де кількість комунікаційних каналів (E) значно менше за кількість вузлів (V) у мережі, або коли необхідно мати можливість швидко дізнатися, чи наявний комунікаційний канал між двома окремо взятими вузлами.

Представлення графу у вигляді списку суміжності використовує масив *Adj* з *V* списків, по одному для кожної вершини з *V*. Для кожної вершини *u* що належить *V* список *Adj[u]* містить усі вершини *v,* такі що (*u, v*) належить *E,* тобто список *Adj[u]* зібраний з усіх вершин, суміжних з *u* на графі *G.*

Вузли у кожному списку перераховані у випадковому порядку. Приклад списку суміжностей для графу однорангової мережі, що приведено на рисунку 3.2, зображено на рисунку 3.3.

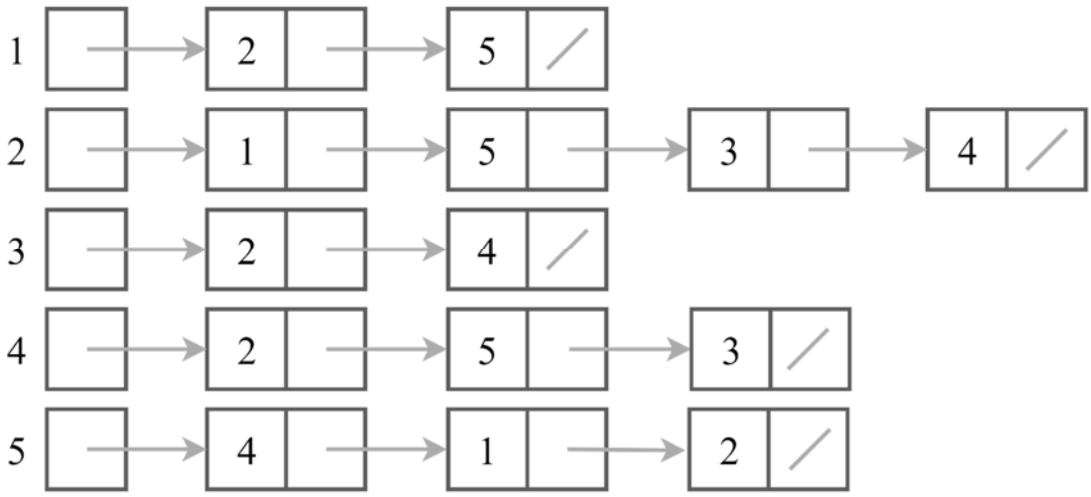

Рисунок 3.3 – Представлення графу у вигляді списку суміжності

Представлення графів у вигляді списку суміжностей потребує об'єм пам'яті що дорівнює

$$\theta(V + E). \tag{3.2}$$

Списки суміжності легко адаптуються для представлення зважених графів, тобто графів, з кожним ребром котрих звязана деяка вага, зазвичай визначена за допомогою вагової функції *w,* якщо *G* – зважений граф, з ваговою функцією *w.* Вага *w (u, v)* ребра *(u, v)*, які належать Е просто будуть зберігатися разом з вершиною *v* у списку суміжностей *u*. Представлення у вигляді списку суміжностей є досить гнучким, оскільки його можна адаптувати для багатьох варіантів графів.

Головний потенційний недоліком представлення графів у вигляді списку суміжностей заключається у тому, що швидкого способу визначення належності ребра до графу немає. Визначити належність ребра до графу можна лише за допомогою пошуку *v* у списку *Adj[u]*. Оскільки час обробки має бути мінімально можливим у мережі бездротових сенсорів задля збереження енергії акумулятора або батареї, таке представлення не завжди є найбільш оптимальним

Цей недолік можливо усунути за допомогою використання асимптотично більшого об'єму пам'яті і представлення графа за допомогою матриці суміжності (Рисунок 2.8), що дозволяє прискорити пошук ребер.

	1	2	3	4	5
1	0	1	0	0	1
2	1	0	1	1	1
3	0	1	0	1	0
4	0	1	1	0	1
5	1	1	0	1	0

Рисунок 3.4 – Представлення графу у вигляді матриці суміжності

Представлення графа *G* за допомогою матриці суміжності припускає, що вершини пронумеровано у деякому порядку числами 1,2, … , *V*. У такому випадку

представлення графа *G* з використанням матриці суміжності представляє собою матрицю розміром VxV

$$\mathrm{A} = \left(a_{ij}\right), \tag{3.3}$$

де

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{якщо } (i,j) \epsilon \text{ E}, \\ 0 & \text{інакше.} \end{cases} \tag{3.4}$$

Матриця суміжності потребує об'єм пам'яті, що, в незалежності від кількості ребер на графі, дорівнює

$$\theta(V^2). \tag{3.5}$$

Якщо звернути увагу на те, що матриця суміжності на рисунку 3.4 є симетричною, відносно головної діагоналі. Можна зробити висновок про можливість оптимізації об'єму необхідної пам'яті для збереження матриці суміжностей у два рази за рахунок збереження лише головної діагоналі та елементів вище неї.

Так само, як і списки суміжності, матриці суміжності підходять для представлення зважених графів. Наприклад, якщо *G* – зважений граф з ваговою функцією *w*, то вага *w (u, v)* ребра *(u, v)* що належить *E* зберігається у записі у рядку *u* та стовпці *v* матриці суміжності. Якщо такого ребра не існує, у відповідному елементі матриці буде зберігатися значення NIL, хоча в реальності там більш доречно використовувати значення 0 або ∞.

Хоча список суміжності асимптотично, що найменше на стільки ж ефективний в плані необхідної для зберігання пам'яті, як і матриця суміжності, простота матриці робить її більш переважною при роботі з невеликими графами.

В реальній системі така матриця суміжностей може містити рівень сигналу RSSI до кожного вузла у мережі.

Представлення за допомогою матриці суміжності більше використовують з щільними графами, коли кількість комунікаційних каналів близиться до кількості вузлів.

Більшість робіт припускає, що вузли розподілені рівномірно випадковим чином. При високій щільності вузлів таке положення робить багато проблем тривіальними. Крім того, незрозуміло, що рівномірний розподіл щільності вузлів має сенс з практичної точки зору. Нещодавно розгорнуті великомасштабні сенсорні мережі повідомляють про дуже неоднорідну щільність вузлів – у областях, що предстваляють найбільшу цікавість з погляду даних, що можна отримати з сенсорів, є кілька вузлів на квадратний метр, тоді як в інших вузли знаходяться на відстані сотень метрів один від одного і використовуються лише для маршрутизацію інформаційних пакетів [26]. Для мобільних мереж ad hoc (MANET) часто припускають, що вузли в мережі мають браунівський рух, що не відображає реальності.

Оскільки рівень енергоспоживання є обмежуючим фактором для терміну дії та працездатності бездротової мережі, було розроблено різноманітні механізми та алгоритми для збереження енергії [27]. Ці механізми та алгоритми часто називають «керуванням топологією мережі».

3.3 Алгоритм управління топологією та зменшення рівня інтерференції

Для двох взаємодіючих вузлів *u* і *v* споживання енергії для підтримки їх зв’язку зростає, щонайменше квадратично зі збільшенням відстані між вузлами [28]. Таким чином, наявність одного або кількох вузлів ретрансляції між u та v допомагає заощадити енергію. Основна мета алгоритму управління топологією полягає в тому, щоб відмовитися від більш потужних передавачів при передачі інформації між вузлами, між якими є велика відстань і натомість маршрутизувати

повідомлення через кілька невеликих (енергоефективних) вузлів. Для цього кожен вузол мережі ad-hoc вибирає невелику кількість близьких сусідніх вузлів. Наявність лише близьких сусідів не тільки допомагає зменшити енерговитрати, але й зменшити перешкоди, оскільки менша кількість вузлів використовує передачу з великою потужністю.

У *E* існує зв'язок (*u*, *v*) тоді і тільки тоді, коли два вузли u і v можуть передавати інформацію безпосередньо. Виконання алгоритму керування топологією дасть розріджений підграф графа *G*

$$Gtc = (V, Etc), \tag{2.3}$$

де *Etc* – набір зв'язків, що залишилися.

Отримана топологія Gtc повинна мати ряд властивостей:

– симетрія – отримана топологія *Gtc* повинна бути симетричною, тобто вузол *u* є сусідом вузла *v* тоді і тільки тоді, коли вузол *v* є сусідом вузла *u*. Асиметричні комунікаційні графи непрактичні, оскільки багато комунікаційних примітивів стають неприпустимо складними [29];

– єдність (розподіленість) – два вузли *u* і *v* з'єднані, якщо є шлях від *u* до *v*, потенційно через кілька вузлів-роутерів. Якщо два вузли з'єднані в *G*, то вони все одно повинні бути з'єднані в *Gtc*. Хоча мінімальне остовне дерево є розрідженим зв'язним підграфом, воно часто не вважається хорошою топологією, оскільки близькі вузли в оригінальному графі *G* можуть в кінцевому підсумку виявитися далекими в *Gtc* (наприклад якщо граф *G* є кільцем). Тому граф *Gtc*, як правило, вимагається не тільки з'єднати, але й розподілити [30]: для будь-яких двох вузлів *u* і *v*, якщо оптимальний шлях між *u* і *v* в *G* має складність *c*, тоді оптимальний шлях між *u* і *v* в *Gtc* має вартість *O(c);*

– розрідженість (низька інтерференція) – решта графа *Gtc* має бути розрідженою, тобто кількість зв'язків повинна бути в порядку кількості вузлів у мережі.

Оскільки зв’язність і розрідженість суперечать один одному, управління топологією було процвітаючою сферою досліджень.

Найкращі на даний момент алгоритми мають вражаючий список властивостей.

Однак розподілений алгоритм може бути досить повільним; у малоймовірному (але можливому) гіршому випадку він буде виконуватися протягом лінійної кількості кроків.Крім того, як і багато інших, цей алгоритм робить сильні припущення: по-перше, всі вузли повинні знати своє точне положення, наприклад, за допомогою глобальної системи позиціонування (GPS); по-друге, алгоритм передбачає, що світ плоский і без будівель (так би мовити, ідеальний одиничний дисковий графік) [31]. Ці припущення роблять алгоритм непрактичним.

Усі відомі алгоритми управління топологією, включаючи [32] і [33], явно не вирішують проблему перешкод, що створюють у мережі вузли, що передають між собою інформацію, але стверджують, що властивості розрідженості та низького ступеня вирішують цю проблему.

У [34] інтерференція формально визначена наступним чином: дано комунікаційний граф, створений алгоритмом керування топологією, покриття ненаправленого ребра *e = (u, v)* це кардинальність набору вузлів, що покриваються радіусами досяжності вузлів u та v, з радіусом |uv|

$$Cov(e) \coloneqq |\{w \in V | w \text{ покривається } D(u, |u, v|)\} \cup \{w \in V | w \text{ покривається } D(v, |v, u|)\}|. \quad (3.4)$$

Тобто, покриття *Cov(e)* представляє кількість мережевих вузлів, на які впливають вузли u та v, між якими відбувається передача інформації з потужностями передачі, вибраними таким чином, що вони точно досягають один одного [35]. Тоді інтерференція графіка G = (V,E) дорівнює

$$I(G) \coloneqq \max_{e \in E} Cov(e). \tag{3.5}$$

Більшість сучасних алгоритмів управління топологією припускають, що кожен вузол встановлює з'єднання, принаймні зі своїм найближчим сусідом. Іншими словами, всі ці топології містять ліс найближчого сусіда, побудований на даній мережі.

На рисунку 3.5 зображено приклад графа. На додаток до горизонтального експоненційного ланцюга вузлів, кожен з цих вузлів h_i має відповідний вузол v_i, зміщений по вертикалі на відстань трохи більше, ніж h_i до свого лівого сусіда. Позначаючи цю вертикальну відстань d_i, маємо $d_i > 2^{i-1}$.

Ці додаткові вузли утворюють другу (діагональну) експоненційну лінію. Між двома з цих діагональних вузлів v_{i-1} і v_i розміщується додатковий допоміжний вузол t_i таким чином, що $|h_i, t_i| > |h_i, v_i|$.

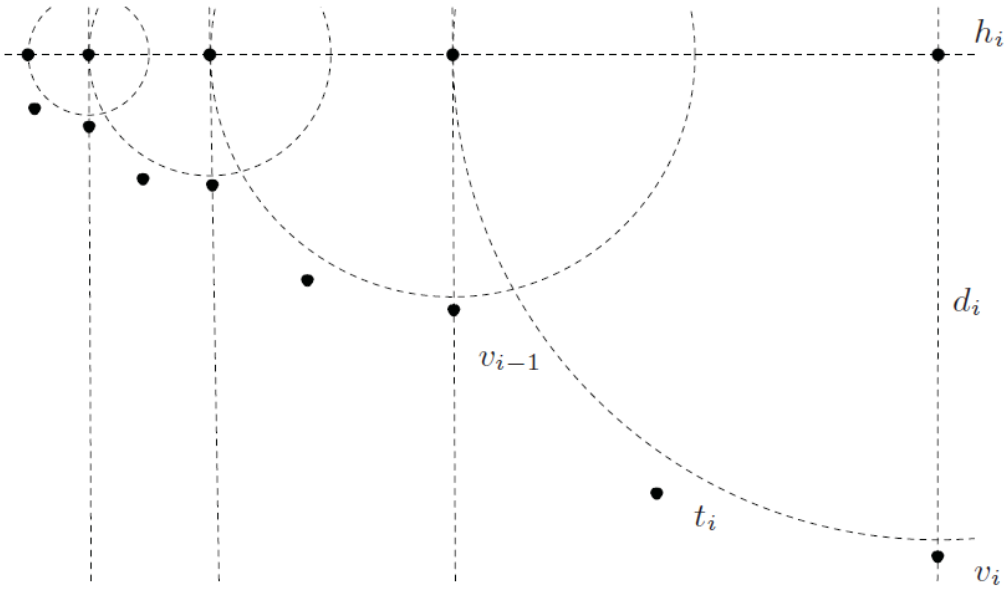

Рисунок 3.5 – Два експоненційно розміщених ланцюги вузлів

Ліс найближчого сусіда для даної мережі (з припущенням, що радіус передачі кожного вузла можна вибрати досить великий) показано на рисунку

3.6 (а). Приблизно одна третина всіх вузлів є частиною горизонтально пов’язаного експоненційного ланцюга. Інтерференція будь-якої топології, що містить Ліс найближчого сусіда, становить щонайменше $\Omega(n)$. Проте, оптимальна в плані інтерференцій, топологія з’єднала б вузли, як показано на рисунку 3.6 (б), із постійним показником інтерференції.

Отже, завдяки тому, що кожен вузол підключається до найближчого сусіда, алгоритм управління топологією робить «безповоротну» помилку. Більше того, це робить асимптотично найгіршу помилку, оскільки перешкода в будь-якій мережі не може стати більшою за n.

Оскільки приблизно одна третина всіх вузлів є частиною горизонтального експоненційного ланцюга вузлів на рисунку 3.6 (б), спостереження також справедливе для середньої виміряної інтерференції, якщо розрахувати середню інтерференцію по всіх ребрах.

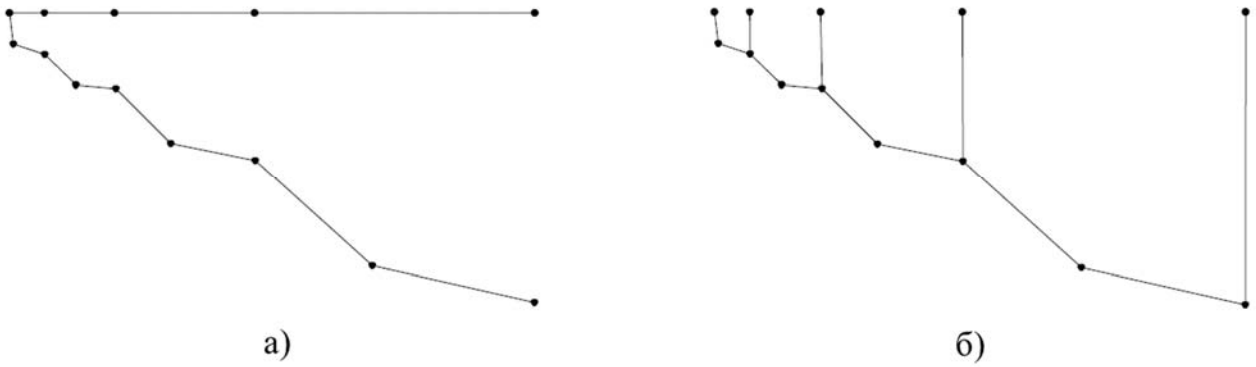

Рисунок 3.6 – Ліс з найближчих сусідів (а) та оптимальне дерево з рівномірною інтерференцією (б)

Керування топологією це дуже актуальна сфера досліджень. Добре працюючі моделі також впроваджено у основі стандарту 802.11. Такі впровадження доводять, що керування топологією – це техніка, яка заслуговує на більшу увагу.

3.4 Розробка алгоритму пошуку маршрутів у бездротових сенсорних системах

Кожний новий сеанс зв’язку пов’язаний з надходженням нового запиту на сеанс на рівні програми до вузла *i* з деяким пунктом призначення *j, j≠i* в мережі.

При моделюванні сеанси зв’язку генеруються випадковим чином з рівномірними розподіленими джерелами та пунктами призначення. Для дослідження продуктивності протоколу при стабільному стані мобільності вузлів і розподілу трафіку припускаються довгі сессі зв’язку. Крім того, передбачається, що дана мережа є досить плотною в плані наповнення вузлами. Тобто якщо існуючий шлях для будь-якого вузла трафіку порушений, завжди, з високою ймовірністю, є альтернативний шлях, доступний для підтримки постійного обміну інформацією між вузлами [36].

Класичним методом пошуку сусідніх вузлів є прослуховування ефіру та періодична передача повідомлень з короткою інформацією про даний вузол, це ефективні підходи, які використовуються в протоколах маршрутизації (як проактивних, так і реактивних) для виявлення доступності зв’язків між сусідніми вузлами. Нові маршрути виявляються, коли отримуються повідомлення-маяки від вузлів, не включених до списку сусідів. Існуючі посилання оголошуються недійсними, якщо жодне з повідомлень-маяків від сусіднього вузла не отримано протягом певного періоду часу.

У повідомленні-маяку містится базова інформація про вузол, який відправляє це повідомлення:

– ідентифікаційний номер вузла у мережі;

– стан службових флагів вузла

– рівень підсилення на радіопередавачі, який може використовуватся для визначення відносних координат вузла

Розглянуто загальні проактивні і реактивні протоколи маршрутизації, які, відображають основну поведінку багатьох проектів і реалізацій існуючих протоколів маршрутизації.

У протоколах проактивної маршрутизації кожен вузол підтримує список відомих вузлів і оновлює свої маршрути до них, аналізуючи періодичні пакети з інформацією про топологію від інших вузлів. Коли новий інформаційний пакет прибуває, вузол перевіряє свою таблицю маршрутизації і відповідно до неї пересилає пакет. Кожен вузол стежить за своїми сусідніми вузлами, і кожна зміна його сусідів призводить до відправки пакету стану оновленної топології. Такими повідомленнями заповнюється вся мережа. Інші вузли відповідно оновлюють свої таблиці маршрутизації після отримання пакета оновлення. У мережі з підвищеною кількістю вузлів на площі пакет широкомовної передачі з топологією може досягати вузлів кілька разів і, отже, мати хорошу ймовірність отримання пакетів. При моделюванні припускається, що кожний вузол надійно отримує пакети топології від інших вузлів.

У протоколах реактивної маршрутизації вузли підтримують свої таблиці маршрутизації на основі необхідності. Це означає, що коли надходить необхідність передачі нового пакету даних, вузли повинні налаштувати шляхи між джерелами і призначеннями, перш ніж почати доставку пакетів даних. Процес встановлення шляху називається виявленням маршруту. Крім того, існує інший процес, який називається обслуговуванням маршруту, необхідний для пошуку альтернативного шляху, якщо попередній шлях був порушений. Виявлення маршруту – це механізм, ініційований вузлом *i* після надходження нового запросу на передачу інформації, щоб виявити новий шлях до вузла *j*. Перший вузол наповнює всю мережу пакетами запиту маршруту. Отримавши пакет запиту маршруту, вузол надсилає пакет відповіді маршруту у зворотному шляху до вузла *i*. В результаті вузол *i* отримує найкоротший шлях до вузла призначення *j*.

Підтримка маршруту – це механізм, за допомогою якого вузол отримує повідомлення про те, що зв’язок на активному шляху до адресату розірвано, так

що пакет більше не може досягти вузла призначення *j* через цей маршрут. Після отримання повідомлення про збій маршруту вузол *i* може знову ініціювати пошук маршруту, щоб знайти новий маршрут для решти пакетів, призначених для відправки на вузол *j*. У реактивних протоколах маршрутизації кожен вузол не підтримує таблиці маршрутизації до того, як буде запущено завдання маршрутизації. Вони знаходять маршрут лише на вимогу, заповнюючи мережу пакетами запиту маршруту, тобто перед відправкою пакетів даних відправник передає запит маршрутизації та ініціює процес виявлення маршруту. Якщо під час доставки пакетів виявлено розрив посилання, створюється новий пакет запиту маршруту.

У векторному протоколі маршрутизації кожен мобільний вузол мережі Adhoc підтримує таблицю маршрутизації, в якій перераховані всі доступні вузли призначення, метрика та наступний перехід до кожного пункту призначення, а також порядковий номер, згенерований вузлом призначення.

Використовуючи таку таблицю маршрутизації, що зберігається в кожному мобільному вузлі, пакети передаються між вузлами спеціальної мережі. Кожен вузол спеціальної мережі періодично оновлює таблицю маршрутизації з періодичним статусним пакетом або коли доступна значна нова інформація про статус мережі, щоб підтримувати узгодженість таблиці маршрутизації з динамічно змінною топології сенсорної мережі.

Періодично або одразу, коли виявляються зміни топології мережі, кожний вузол сенсорної мережі відсилає повідомлення з інформацією про оновлення таблиці маршрутів, використовуючи широкомовну або групову передачу пакету оновлення таблиці маршрутизації. Пакет оновлення починається з рахунку одиниці для прямих підключених вузлів. Це вказує на те, що кожен сусід-отримувач знаходиться на однин скачок від вузла.

Після отримання пакета оновлення сусіди оновлюють свою таблицю маршрутизації, збільшуючи кількість стрибків на одиницю і повторно передають пакет оновлення своїм сусіднім вузлам. Процес повторюватиметься до тих пір,

поки всі вузли в мережі ad hoc не отримають копію пакета оновлення з відповідною метрикою.

Дані оновлення також зберігаються деякий час, щоб дочекатися прибуття найкращого маршруту для кожного конкретного вузла призначення в кожному вузлі, перш ніж оновлювати його таблицю маршрутизації та повторно передавати пакет оновлення.

Якщо вузол отримує кілька пакетів оновлень для одного призначення протягом періоду часу очікування, маршрути з останніми порядковими номерами завжди є основою для рішень про пересилання пакетів, але інформація про маршрут не обов'язково оголошується негайно, якщо тільки порядкові номери були змінені.

Якщо пакети оновлення мають однаковий порядковий номер з тим самим вузлом, буде використаний пакет оновлення з найменшою метрикою, а існуючий маршрут буде відкинутий або збережений як менш бажаний. У цьому випадку пакет оновлення буде розповсюджуватися з порядковим номером до всіх мобільних вузлів у мережі ad hoc.

Оголошення про зміни маршрутів можуть бути відкладені, доки не будуть знайдені найкращі маршрути. Затримка оголошення можливо нестабільного маршруту може послабити коливання таблиці маршрутизації та зменшити кількість повторних трансляцій можливих записів маршруту, які надходять із тим самим порядковим номером.

Елементи в таблиці маршрутизації кожного мобільного вузла динамічно змінюються, щоб зберегти узгодженість з динамічно змінною топологією спеціальної мережі. Щоб досягти такої узгодженості, оголошення маршрутної інформації повинно бути частим або досить швидким, щоб кожен мобільний вузол майже завжди міг знайти всі інші мобільні вузли в динамічній мережі ad hoc. Після оновленої інформації про маршрути кожен вузол повинен передати пакет даних іншим вузлам за запитом у динамічно створеній мережі ad hoc.

Алгоритм маршрутизації Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV) — це протокол маршрутизації, розроблений для динамічних мереж. AODV може здійснювати маршрутизацію як на один адрес, так і на велику кількість адресованих вузлів. Це алгоритм ad hoc, що означає, що він будує маршрути між вузлами лише за потреби для надсилання нових повідомлень. Він підтримує ці маршрути доти, доки вони потрібні для передачі інформації. Крім того, AODV формує дерева, які з'єднують членів групи багатоадресної передачі. Дерева складаються з членів групи та вузлів, необхідних для з’єднання учасників. AODV дає кожному маршруту його порядковий номер, щоб забезпечити «свіжість» маршрутів.

Цей алгоритм не має циклів, він автоматично запускається і масштабується до необхідної кількості вузлів сенсорної мережі. Протокол AODV використовує повідомлення запиту маршруту, які проходять через мережу, щоб виявити шляхи, необхідні вихідному вузлу.

Проміжний вузол, який отримує повідомлення із запитом маршрутизації, відповідає на нього, використовуючи повідомлення-відповідь із таблицею маршрутів, лише якщо він має маршрут до пункту призначення, відповідний порядковий номер якого більше або дорівнює номеру, що міститься в повідомленні із запросом на маршрутизацію. Відповідний пакет маршрутизації також містить останній порядковий номер для останнього проміжного вузла призначення, про який відомом вихідному вузлу-маршрутизатору.

Вузол, який отримує повідомлення із запросом на маршрутизацію, може надіслати відповідь маршруту, якщо він є або місцем призначення, або якщо він має маршрут до пункту призначення з відповідним порядковим номером, більшим або рівним номеру, що міститься в пакеті із запросом на маршрутизацію. Якщо це так, він одноадресно передає пакет відповіді назад до джерела. Таким чином, вузол-джерело дізнається,що даним маршрутом доставити повідомлення неможливо та відсилає нові запити до інших вузлів-маршрутизаторів.

В іншому випадку вузол призначення повторно транслює повідомлення із запитом на маршрутизації. Вузли відстежують вихідну адресу повідомлення і ретранлюють її. Якщо вони отримують запит, який вже був обробленим, вони відкидають цей запит і не пересилають його. Як тільки вузол-джерело отримує відповідний пакет маршрутизації, він може почати пересилати пакети даних до місця призначення. Якщо джерело пізніше отримує пакет результату маршрутизації, що містить більший порядковий номер або містить той самий порядковий номер з меншою кількістю стрибків, він може оновити інформацію про маршрут для цього місця призначення та почати використовувати кращий маршрут.

Поки маршрут залишається активним, він продовжуватиме підтримуватися. Маршрут вважається активним, якщо на цьому шляху періодично йдуть пакети даних від джерела до пункту призначення. Після того, як джерело припиняє надсилати пакети даних, зв’язки закінчуються та в кінцевому підсумку будуть видалені з таблиць маршрутизації планових вузлів. Якщо розрив зв’язку відбувається під час активного маршруту, вузол перед розривом передає повідомлення про помилку маршруту до вихідного вузла, щоб повідомити його про недоступний шлях до місця призначення.

3.5 Геомаршрутизація у бездротових сенсорних мережах

Маршрутизація має центральне значення в бездротових мережах ad-hoc. Для особливого випадку маршрутизації, відомого як геомаршрутизація (географічна, маршрутизація на основі розташування або позиціонування), було проведено чимало досліджень із врахуванням результатів за найгіршим сценарієм.

У геомаршрутизації кожен вузол інформується як про своє розташування, так і про розташування своїх сусідів. Крім того, джерело повідомлення знає позицію місця призначення. Перше припущення стає все більш реалістичним з появою недорогих і мініатюрних систем позиціонування.

Можна також уявити, що приблизна інформація про місцезнаходження може бути отримана шляхом локальних обчислень та обміну повідомленнями зі стаціонарними пристроями або повністю автономно.

Щоб підійти до другого припущення, тобто надати джерелу повідомлення про позицію призначення, може бути використана однорангова мережа накладання. Для деяких сценаріїв також може бути достатньо досягти будь-якого пункту призначення, розташованого в даний момент у певній місцевості (“геокастинг”).

Першим правильним алгоритмом геомаршрутизації був Face Routing. Face Routing маршрутизує повідомлення вздовж граней плоских графів і продовжує по лінії, що з'єднує джерело та призначення. Окрім гарантії досягнення пункту призначення, він робить це з використанням $O(n)$ повідомлень, де n – кількість вузлів мережі. Пізніше маршрутизація по грані була поєднана з жадібною маршрутизацією, щоб забезпечити кращу продуктивність середніх випадків.

Оскільки вузли бездротові сенсорні мережі не можуть постійно отримувати актуальну інформацію щодо своєї локації через підвищені вимоги до енергоспоживання, можна прийняти, що відома локація лише статичних вузлів по периметру. Такі вузли оснащені модулями ESP8266 та використовуються як вузли стоку інформації (sink).

Спочатку вузли по периметру заповнюють мережу службовими повідомленнями, щоб виявити відстані (у стрибках) між усіма вузлами периметра, а потім використовують алгоритм тріангуляції, який обчислює положення периметра з цієї матриці відстаней між периметрами.

Алгоритм визначення координат вузлів периметру складається з трьох етапів.

– кожний вузол периметру передає службове повідомлення на всю мережу. Це дозволяє вузлам периметра виявляти свою відстань (у стрибках) до всіх інших вузлів периметра. Цей вектор відстаней називається вектором периметра вузла;

– кожен вузол периметра передає свій вектор периметра на всю мережу. Наприкінці цього етапу кожен вузол периметра знає відстані між кожною парою вузлів периметра;

– кожен вузол периметра використовує алгоритм тріангуляції для обчислення координат усіх інших вузлів периметра (включаючи власні координати). Координати вибираються таким чином, щоб мінімізувати

$$\sum_{i,j \in \text{периметр}} \left(\text{вимір. дист.}\,(i,j) - \text{дист.}\,(i,j)\right)^2, \qquad (3.6)$$

де $\text{вимір. дист.}\,(i,j)$ позначає дистанцію між вузлами *i* та *j*, виміряну на першому етапі,

а дист.*(i, j)* представляє евклідову відстань між віртуальними координатами вузлів *i* та *j*.

Наприкінці останнього етапу кожен вузол периметра знає свої власні (віртуальні) координати, і вузли, які не є периметром, тепер можуть використовувати алгоритм релаксації, для обчислення власних віртуальних координат. На цьому підготовчий етап завершено.

Оскільки маяки периметра переповнені по всій мережі, вузли, які не є периметральними, також дізнаються про відстані між вузлами по периметру і, отже, можуть запустити той самий алгоритм тріангуляції для обчислення прийнятних початкових координат, а не починати з центру віртуального простору координат.

У нашому описі до цього часу, у вищенаведеному 3-етапному алгоритмі кожен вузол периметра використовує повне знання відстаней між периметром для незалежного обчислення своїх координат за допомогою тріангуляції. На практиці втрата повідомлень і збій вузла можуть призвести до того, що вузли периметра будуть мати неповне (і суперечливе) знання про відстані між периметром, і в такому випадку вищевказаний алгоритм тріангуляції змусить різні вузли

периметра обчислити неузгоджені координати. Це пов’язано з тим, що будь-який набір координат, який задовольняє умову мінімізації, можна обертати, перекладати та перевертати, при цьому задовольняючи умову мінімізації. Таким чином, необхідно канонізувати обчислення, щоб усі вузли, які виконують його незалежно, прийшли до того самого рішення. Для вирішення цієї проблеми використовується наступна техніка зі стартуючими маяками.

Два вузли у ролі маяків наповнюють мережу службовими повідомленнями. Потім вузли периметра включають ці маяки у свої звичайні обчислення тріангуляції та обчислюють координати всіх вузлів периметра та стартових вузлів.

Кожний вузол обчислює центр гравітації (ЦГ) усіх цих положень. Центр ваги разом із положеннями двох вузлів завантаження визначає нові осі координат –центр ваги формує початок координат, перший вузол початкового завантаження визначає додатну вісь *x*, а другий вузол початкового завантаження визначає позитивну вісь *y*. Усі обчислені координати потім нормалізуються щодо цих нових осей.

Слід зауважити, що центр ваги є стійким до неповної інформації. Якщо вузлу бракує інформації про один із вузлів завантаження, він може дозволити собі не діяти як вузол периметра, оскільки релаксація не вимагає виявлення всіх вузлів периметра.

Наприкінці можна опустити припущення, що вузли периметра знають, що вони знаходяться на периметрі. Щоб досягти цього, використовується один із вузлів стартового маяка, що було описано вище. Ці вузли старту передають службове повідомлення на всю мережу.

Отже, кожен вузол визначає свою відстань до цих вузлів старту. Вузли використовують наступні критерії, які називаються критерієм вузла периметра, щоб визначити, чи є вони вузлами периметра: якщо вузол є найвіддаленішим серед усіх своїх сусідів із двома стрибками від першого вузла завантаження, тоді вузол вирішує, що він знаходиться на периметрі.

На рисунку 3.7 показано віртуальні координати всіх вузлів, коли вузли використовують відстань до призначеного маяка, щоб визначити, чи знаходяться вони на периметрі.

Можна зробити наступні спостереження. По-перше, є два вузли, які помилково вирішують, що вони знаходяться на периметрі, тоді як це не так. Однак, ці рішення мало впливають на віртуальні координати інших вузлів, оскільки алгоритм тріангуляції правильно позиціонує ці вузли всередині периметра мережі. Показник успішності маршрутизації та середня довжина шляху залишаються чудовими — 0,996 та 17,3 відповідно, лише після 10 ітерацій.

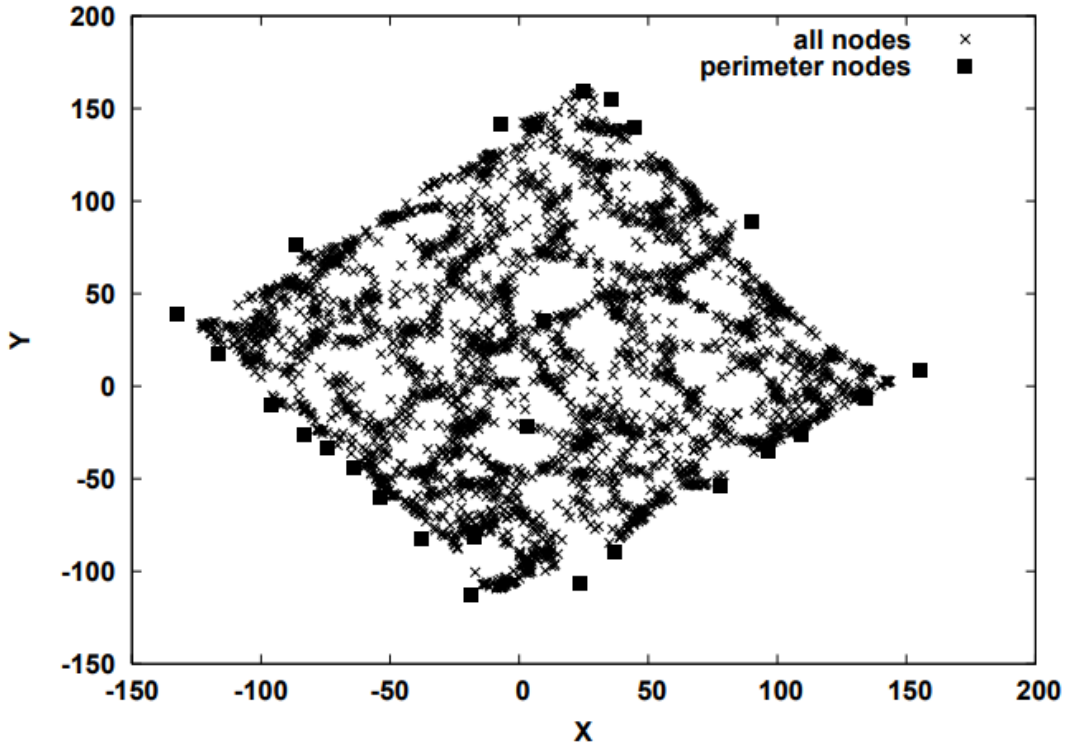

Рисунок 3.7 – Віртуальні координати мережі з 3200 вузлів, де жодний з вузлів не знає своїх координат

Нарешті, можна додати один додатковий механізм, який дозволяє підтримувати послідовний добре відомий віртуальний простір координат навіть в умовах мобільності вузлів і збоїв. Координатна проекція на коло: коли вузли периметра обчислюють свої координати за допомогою тріангуляції, вони

проектують ці координати на коло з початком координат у центрі ваги вузлів периметра і радіусом, рівним середній відстані вузлів периметра від центру ваги. Для цього є дві причини. По-перше, це дає нам чітко визначену область для реалізації розподіленої хеш-таблиці. По-друге, це віртуальне коло полегшує підтримку мобільності.

Щоб правильно підтримувати мобільність вузлів периметра, перший вузол початкового завантаження періодично повторно транслює, і вузли знову визначають, чи є вони вузлами периметра, чи – ні.

Коли новий вузол робить висновок, що він знаходиться на периметрі, цей вузол просто обчислить проекцію своїх поточних координат на коло і вважатиме, що ці координати фіксовані. У свою чергу, вузол, який більше не знаходиться на периметрі, «знімає фіксацію» сам і починає оновлювати свої координати за допомогою алгоритму релаксації.

Підсумовуючи, розглянутий алгоритм послідовно відповідає продуктивності жадібної маршрутизації з істинними позиціями в ряді сценаріїв моделювання. Насправді, даний алгоритм перевершує жадібну маршрутизацію з істинними позиціями, коли мережеве підключення не відповідає географії мережі. Крім того, даний алгоритм може добре масштабуватися. Наприклад, у випадку мережі з 12800 вузлів потрібно всього лише 30 вузлів для заповнення мережі на етапі старту.

Після фази завантаження, накладні витрати, з точки зору кількості повідомлень і розмірів повідомлень, не залежать від розміру мережі. Зокрема, даний алгоритм вимагає, щоб кожен вузол періодично надсилав серцеві ритми (heart beat), а один вузол-маяк періодично переповнював мережу.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Безпека праці, як галузь практичної діяльності, спрямована на створення безпечних і нешкідливих умов праці.

Створення безпечних і нешкідливих умов праці на виробництві вимагає значних матеріальних витрат, впровадження знань і рішень науково-дослідних робіт в галузі охорони праці. Поки поміж тим, що ми знаємо про методи і засоби охорони праці, і тим, що реалізовано на виробництві, різниця все ще велика. Звести цю різницю до мінімуму повинні професійно підготовлені фахівці не тільки в галузі екології та охорони навколишнього середовища, але й в галузі забезпечення безпечних, нешкідливих, здорових умов праці на виробництві.

Тому роль знань з питань охорони праці інженерно-технічними працівниками має дуже велике значення.

4.1 Аналіз умов праці на робочому місці

4.1.1 Організація робочого місця

Висота промислових приміщень повинна бути не менш 3,2 м, а для приміщень енергетичної о та складського господарства – 3 м Ширина основних походів у середині цехів та ділянок повинна бути не менше 1,5 м, а ширина проїздів – 2,5 м. Ширина виходів з приміщень повинна бути не менш 1,5 м, висота – 2,2 м. Норма розтрати води митної та господарські нужди для цехів зі значними викидами тепла на одного чоловіка у зміну повинна не перевищувати 45 л, а дія інших успіхів та відділів – 25 л Злив у каналізаційну мережу відходів розчинів лужників, кислот, електролітів та інших хімічних речовин дозволяється тільки після їх нейтралізації га очистки. Забороняється злив у каналізаційну бережу толуолу, ацетону, бензину, мінеральних мастил.

Організація робочого місця монтажника радіоапаратури і приладів повинна забезпечувати відповідність усіх елементів робочого місця та їх розташування

вимогам ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ “Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования” характеру та особливостями трудової діяльності [37].

Організація робочого місця монтажника радіоапаратури і приладів включає в себе:

– стіл;

– стілець;

– світильник;

– лампа зі збільшуючим склом;

– урна для відходів;

– паяльна станція с функцією регулювання температури;

– витяжка місцевого застосування;

– осцилограф;

– заземлююча клема;

– пересувна шафа з контейнерами для деталей;

– блок розеток с тумблером.

Верхня кришка столу покривається жароміцним пластиком. При необхідності регулювання температури нагріву електропаяльника і обжигалки робоче місце оснащується автотрансформатором або автоматичним пристроєм для регулювання температури жала електропаяльника.

При розміщенні робочих місць монтажника радіоапаратури і приладів необхідно дотримуватись таких вимог:

– відстань між бічними поверхнями має бути не меншою за 1,2 м

– відстань між тильною поверхнею має бути не меншою за 2,5 м;

– прохід між рядами робочих місць має бути не меншою за 1 м.

Конструкція робочого місця монтажника радіоапаратури і приладів (при роботі сидячи) має забезпечувати підтримання оптимальної робочої пози з такими ергономічними характеристиками: ступні ніг — на підлозі або на підставні для

ніг, стегна – в горизонтальній площині, передпліччя – вертикально, лікті – під кутом від 70° до 90° до вертикальної площини; зап’ястя зігнуті під кутом не більше 20° відносно вертикальної площини.

Висота робочої поверхні столу має бути в межах від 680 до 800 мм, а ширина – забезпечувати можливість виконання операцій в зоні досяжності сенсорного поля.

Рекомендовані розміри столу: висота – 725 мм, довжина – від 600 до 1400 мм, ширина – від 800 до 1000 мм.

4.1.2 Мікроклімат виробничих приміщень

Згідно с ДСН 3.3.6.042-99, відповідно до категорії робіт за ступенем важкості Іа (роботи, що виконуються сидячи й не потребують фізичного напруження) в теплий період року: температура 22-24 °С, відносної вологості від 40 % до 60 % та швидкості переміщення повітря не більше як 0,1 м/с.

4.1.3 Шкідливі речовини в повітрі робочої зони

Шкідливі речовини в повітрі робочої зони, це пайка ручним електро паяльником з використанням олов'яно-свинцевого припою типу ПОС-61. ПОС-61 складається з олова (Sn) – 61 %, свинцю (Pb) – 38,2 %, сурми (Sb) – 0,8 %.

Процес пайки олов'яно-свинцевим припоєм ПОС-61 може супроводжуватися виділенням токсичних речовин свинцю, та оксиду кадмію , котрі відповідно з ГОСТ 12.1.007 відносяться до речовин 1-го класу небезпеки. Гранично допустима концентрація свинцю в повітрі робочої зони виробничих приміщень – 0,01 % мг/м^3 , оксиду кадмію – 0,1 мг/м^3

З’єднання свинцю відомі своєю високою токсичністю. Свинець і його з'єднання у нашому випадку це Pb_2O (оксид свинцю) політропними отрутами (тобто діють на різні органи і системи організму) і викликають в основному зміни в нервовій і серцево-судинній системах, а також порушення ферментативних реакцій, вітамінного обміну, знижують імунобіологічну активність людини. Дія

свинцю пов'язана з глибоким порушенням обмінних процесів, в першу чергу білкового обміну, мінерального (кальцію і фосфору) обміну і вітамінного обміну. Найбільш частими формами отруєння свинцем є недокрів'я, свинцеві коліки, плеврит, гепатит. Вже при невеликих дозах настають порушення кровотворних функцій кісткового мозку і руйнування еритроцитів, що веде до недокрів'я.

4.1.4 Освітлення

Для освітлення заплановано робоче загальне рівномірне освітлення та додатково до загального штучного освітлення люмінесцентними лампами денного світла встановлюються системи місцевого освітлення з люмінесцентними лампами білого світла, що сприяють роботі з мілкими деталями. Розряд зорової роботи, а також нормовані показники природного та штучного освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28-2006. Також присутнє одностороннє бічне природнє освітлення.

4.1.5 Шум, вібрація, ультразвук, інфразвук

Шум, вібрація, ультразвук та інфразвук на ділянці, де проводиться монтаж радіоапаратури і приладів відсутні.

4.1.6 Виробничі випромінювання

До виробничих випромінювань відносяться:

– випромінювання оптичного діапазону – ультрафіолетові(УФВ), лазерні(ЛВ), інфрачервоні(ІЧВ);

– електромагнітні випромінювання(ЕМВ) НЧ, ВЧ, УВЧ, НВЧ діапазонів; іонізуючі випромінювання. Джерелом ультрафіолетового випромінювання можуть бути ультрафіолетові лампи, що засвічують рисунок з фоторезисту на фольгованому склотекстоліті при виготовленні друкованої плати.

Для захисту від ультрафіолетового випромінювання виконуються такі заходи:

– операції з виготовленням друкованих плат виконуються з використанням засобів індивідуального захисту (захисні окуляри, халати);

– операції з засвічуванням фоторезисту виконуються з використанням установок закритого типу з таймером.

Основним джерелом електромагнітного випромінювання на виробництві приладів є установка для сушки друкованих плат що працює на основі потужного НВЧ випромінювання. Такі установки працюють з напругою 1200 В та частотою випромінювання понад 2 ГГц. Для запобігання впливу НВЧ випромінювання на організм такі установки екрановані та знаходяться у спеціальному приміщенні.

4.1.7 Небезпека ураження електричним струмом

Джерелами можливої поразки електричним струмом для монтажника радіоапаратури і приладів можуть служити його устаткування.

Причини нещасних випадків від дії електричного струму:

– випадковий дотик до струмопровідних частин, що знаходяться під напругою;

– поява напруги дотику на металевих кожухах електроустаткування у результаті пошкодження ізоляції й інших причин, наближення на небезпечну відстань до струмопровідних частин, що перебувають під напругою, тощо.

Привести конструктивні заходи електробезпеки, що забезпечують захист від випадкового дотику до струмопровідних частин — захисні оболонки і огорожі; безпечне розташування струмопровідних частин (наприклад, розташування струмопровідних частин на недоступній висоті чи в недоступному місці); ізоляція струмопровідних частин, блокування та інше. Зробити вибір конкретного ступеню захисту оболонки відповідно ГОСТ 14255- 69 та привести розшифрування цифр, які входять до позначення ступеню захисту оболонки у відповідності з вимогами ГОСТ 14254-96.

Експлуатаційні заходи безпеки включають установку загального рубильника у приміщенні, який дозволяє одночасно вимикати все електрообладнання, вимогу не залишати включеною апаратуру без уваги чи заборону самостійно ремонтувати устаткування, що знаходиться під напругою та інше.

4.2 Розробка заходів з охорони праці

4.2.1 Нормалізація повітря робочої зони

Мікроклімат – метеорологічні умови внутрішнього середовища приміщень, які визначаються діючими на людину сполученнями температури, відносної вологості, швидкості руху повітря і теплового випромінювання.

Робота монтажника радіоапаратури та приладів не вимагає фізичної напруги, підняття і перенесення важких предметів, виконується сидячи. Енерговитрати не перевищують 120 кКал/год, отже ця робота може бути віднесена до категорії важкості – легка фізична $Ф_U$.

Для забезпечення вищевказаних оптимальних метеорологічних умов у помешканні передбачена місцева система опалення в холодному періоді, та загальна, проточно-витяжна вентиляція та газоприймач місцевого відсмоктування в теплому, відповідно до СНиП 2.04.05-92.

4.2.2 Виробниче освітлення

У приміщенні використовуються люмінесцентні лампи ЛБ 40- Світовий потік Фл = 2850 люменів.

Лампи люмінесцентні серії ЛБ (люмінесцентна біла) – лампи люмінесцентні низького тиску. Призначені для освітлення закритих приміщень, а також для зовнішньої установки, що працюють в електричних мережах змінного струму напругою 220 В, частотою 50 Гц. Всі люмінесцентні лампи відрізняються

підвищеною світловою віддачею, невеликим споживанням енергії і дуже тривалим терміном служби.

Лампи люмінесцентні низького тиску являють собою скляну циліндричну трубку-колбу, внутрішня поверхня якої покрита люмінофором. По обох кінцях лампи впаюються ніжки з катодами. Основним джерелом оптичного випромінювання в люмінесцентних лампах є шар люмінофора, збуджуваного ультрафіолетовим випромінюванням електричного розряду в парах ртуті. Люмінесцентні лампи мають у кілька разів більшу світлову віддачу, ніж лампи розжарювання.

4.2.3 Захист від виробничого шуму та вібрацій

Нормативні значення шуму і вібрації на робочому місці, яке аналізують у проекті забезпечуються організаційними і технічними заходами і засобами.

Основні організаційні заходи:

– раціональне розташування робочого місця;

– експлуатація комп’ютерного обладнання відповідно до вимог його паспорта і проведення своєчасних профілактичних ремонтів;

– постійний контроль режиму праці і відпочинку.

Основні технічні заходи:

– віброзвукопоглинання (подвійне чи потрійне засклення, влаштування тамбурів біля дверей, облицювання стін звукопоглинальними матеріалами – фанерою, плитами із дерев’яних стружок, скляним чи мінеральним волокном, картоном, волосяною повстю, вовняною тканиною, штукатуркою, гіпсовими плитами та іншими шпаристими матеріалами; покриття підлоги утепленим лінолеумом; використовування вібраційних килимків для матричних принтерів).

4.2.4 Захист від електромагнітних полів

На робочому місці усі джерела електромагнітного випромінювання (паяльна станція, лампа лупа, провод живлення) находяться в металевому корпусі, який являється екраном.

4.2.5 Електробезпека

Лінія електромережі для живлення РЕА, периферійних пристроїв РЕА і для обслуговування, ремонту і наладки РЕА виконується як окрема групова мережа, шляхом прокладки фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприладів і прокладається від стійки групового розподільного пункту до розеток живлення. Загальні вимоги до виробничих процесів вказані в ГОСТ12.3.002-75.

Монтаж, обслуговування, ремонт і налагодження пристроїв, блоків при вимкнутому живленні, повинно виконуватися при наступних вимогах:

– пристрої та додаткова апаратура , заземлені;

– робітники повинні виконувати роботу інструментом з ізоляційними ручками, стоячи на діелектричному килимку або бути в діелектричних калошах;

– електроінструмент повинен бути на напругу не більше 36 В;

4.3 Пожежна безпека

Радіомонтажна ділянка – пожежонебезпечна зона. Технологічні операції (паяння, лудіння. обпалення ізоляції) проводяться з використанням горючих лудильних розчинів і при підвищеній температурі.

Для уникнення пожежі електропаяльники та електрообпалювачі повинні бути оснащенні спеціальними діелектричними термостійкими підставками.

Приміщення повинні бути оснащені вентиляцією. Лудильні розчини потрібно зберігати у герметично закритому посуді і без потреби не відкривати.

Для уникнення пожежі потужну апаратуру потрібно розміщувати в будівлі не нижче III ступеня вогнестійкості. Потужні генераторні установки повинні бути оснащені охолодженням.

У випадку виникнення пожежі на ділянці повинні бути негайно відключені електронагрівальні прилади.

Первинні засоби пожежогасіння: вогнегасники, пожежний інвентар та пожежний інструмент.

Для гасіння пожеж промисловість випускає різні вогнегасники. Найбільшого поширення набули водопійні, водяні, газові (вуглекислотні) і порошкові. За ефективністю пожежогасіння гасіння, економічністю та іншими показниками більш перспективними вважаються порошкові вогнегасники.

Первинні засоби пожежогасіння розміщують на пожежних щитах. Вони фарбуються у червоний колір.

Організаційні заходами протипожежної профілактики: є вступний інструктаж під час вступу на роботу, навчання персоналу правилам пожежної безпеки; видання необхідних інструкцій і плакатів, засобів наочної агітації, плану евакуації персоналу у випадку пожежі.

4.4 Охорона навколишнього середовища

Україна – одна з найбільш урбанізованих країн Європи – в містах проживає близько 70 % населення.

Висока концентрація техногенних об'єктів сприяє забрудненню навколишнього середовища, знижує комфортність життя. Основними джерелами забруднення атмосфери міста є транспорт, енергетичні системи та промисловість.

У містах, як правило, підвищений радіоактивний фон через використання в будівництві гірських порід, що містять природні радіоактивні з’єднання. В будь-яких приміщеннях цей фон не повинен перевищувати 20 мкР на годину. Для його контролю в санстанціях, будівельних комбінатах діють радіологічні лабораторії.

Зниження якості атмосферного повітря небезпечне для здоров'я міських мешканців. Найбільш поширеною шкідливою домішкою повітряного середовища є чадний газ. Надмірна кількість цього газу в повітрі призводить до швидкої стомлюваності людини, головного болю, запаморочення, ослаблення пам'яті, порушення діяльності серцево-судинної та інших систем.

Надзвичайно небезпечні діоксини, бензопірен – канцерогени, що містяться в будь-якому димі – вогнища, особливо коли в ньому спалюють полімерні упаковки, вихлопні автомобільні гази, промислові викиди. Ці речовини викликають онкологічні захворювання.

Сприяють захворюванням не тільки хімічні, а й фізичні (міський шум), фізико-хімічні забруднення (підвищений штучний електромагнітний і природний радіоактивний фон).

Під час виготовлення світлодіодної тестового макету з використанням радіотрансиверів CC2538 та ESP8266 викидів у навколишнє середовище майже немає, оскільки досить повну очистку від шкідливих викидів забезпечують спеціальні фільтри, встановлені в очисних спорудах. В майбутньому передбачається вдосконалення очисних споруд та перехід на маловідходні технології.

ВИСНОВКИ

Об’єктом дослідження у магістерській кваліфікаційній роботі була математична модель обміну інформації в бездротових мережах з радіотрансиверами ESP8266 та CC2538. В роботі розглянуто теоретичні основи принципів побудування бездротових сенсорних мереж з використанням топологій зірки та сітчастої топології, проведено огляд сучасних популярних протоколів бездротового зв’язку та їх специфікацій.

Основні результати магістерської роботи:

– розглянуто основні підходи до побудування структури та моделювання бездротових сенсорних мереж за допомогою теорії графів;

– досліджено алгоритми керування топологією мережі

– розроблено алгоритм керування топологією для зменшення рівня інтерференції та підвищення відмовостійкості мереж а також для підвищення автономності пристроїв у мережах за рахунок оптимізації енергоспоживання;

– розглянуто алгоритми геомаршрутизації у бездротових сенсорних мережах із сітчастою топологією

– розроблено алгоритм з можливістю визначення відносних та абсолютних координат пристроїв у мережі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008 : 2015. Державний стандарт України. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення [Текст] . – Введ. 23.02.95. – К. ІПрІн, УкрІНТЕІ, ГВСЕЦНАНУ. – 39 с.

2. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Overview and Architecture [Електронний ресурс] // ieee. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: https://ieeexplore.ieee.org/document/6847097.

3. Zigbee Base Device Behavior (BDB) v1.0 [Електронний ресурс] // ZigBee Alliance. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/12/docs-13-0402-13-00zi-Base-Device-Behavior-Specification-2-1.pdf.

4. 6LoWPAN network architecture and System stack overview [Електронний ресурс] // Texas Instruments. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: https://www.ti.com/lit/wp/swry013/swry013.pdf?ts=1638394896467.

5. Thread Specification [Електронний ресурс] // Thread Group. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: https://www.threadgroup.org/ThreadSpec.

6. Introduction to Ad hoc Networks [Електронний ресурс] // Department of Computer Science Johns Hopkins University. – 2008. – Режим доступу до ресурсу: https://www.cs.jhu.edu/~cs647/intro_adhoc.pdf.

7. Prakash R. Unidirectional Links Prove Costly in Wireless Ad-Hoc Networks / Prakash. // International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications. – 1999. – №3.

8. Wang Y. Localized Construction of Bounded Degree Planar Spanner / Y. Wang, X. Li. // Joint Workshop on Foundations of Mobile Computing. – 2003.

9. Подлесный С.Ю. Сенсорная сеть и электронный балласт для индивидуального управления уличными светильниками [Текст]/ С.Ю. Подлесный// Автоматизация в промышленности. – 2011. − №9. – С. 9-12.

10. Долуханов М.П. Распространение радиоволн [Текст]: Учеб. для ВУзов/ М.П. Долуханов. – 4-е изд. – М.: Связь, 1972. – 336 с.

11. Hill J.L. System Architecture for Wireless Sensor Networks [Text]: A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Computer Science/ J.L. Hill; [Univerisy of California, Berkeley]. – Berkeley, CA, USA, 2003. – 196 p.

12. Скрипов С.А. Математические модели и оптимизация передачи данных в беспроводных сетях со специальной топологией [Текст]: автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук: 05.13.18/ С.А. Скрипов; [Челябинский государственный университет]. – Челябинск, 2010. – 18 с.

13. Панфилов Д. Введение в беспроводную технологию ZigBee стандарта 802.15.4 [Текст]/ Д. Панфилов, М. Соколов// Электронные компоненты. – 2004. − №12. – С. 73-79.

14. Краткий теоретический курс по технологии беспроводных сетей ZigBee, а также демонстрационный открытый проект радиомодуля на базе ZigBee [Електронний ресурс]/ INDEMDSYS – разработчики электроники и встраиваемых систем. – Режим доступа: http://indemsys.ru/theoretical-electronics/62-wireless-networks/69-zigbee-project-embedded.html.

15. ZigBee Specification [Text]: 053474r06, Ver. 1.0. − Accepted by ZigBee Alliance Board of Directors. – 2005. – 378 p.

16. Sohrabi K. Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network [Текст]/ K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, G.J. Pottie// IEEE: Personal communications. – 2000. – Vol. 5, №5. – P. 16-27.

17. Majumder K. Clustered Chain based Power Aware Routing (CCPAR) Scheme for Wireless Sensor Networks [Текст]/ K. Majumder, S.K. Sarkar// International Journal on Computer Science and Engineering (IJCSE). – 2010. – Vol. 2, №9. – P. 2963-2963.

18. Kuhn F. Initializing Newly Deployed Ad Hoc and Sensor Networks [Text]/ F. Kuhn, Th. Moscibroda, R. Wattenhofer// MobiCom '04 Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking, NY, USA. – 2004. – P. 260-274.

19. Kong L. Accelerating Initialization for Sensor Networks [Text]/ L. Kong, L. Fu, X. L., M.-Y. Wu// GLOBECOM'09 Proceedings of the 28th IEEE conference on Global telecommunications, NJ, USA. – 2009. – P. 3860-3865.

20. Иваненко В.А. Анализ протоколов передачи данных от узлов в беспроводных сенсорных сетях [Текст]/ В.А. Иваненко// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №2/10 (50). – С. 9-12.

21. Галкін П.В. Аналіз моделей та оптимізації збору інформації в бездротових сенсорних мережах //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 5. – №. 9 (71).

22. Galkin P. et al. Approaches for Safety-Critical Embedded Systems and Telecommunication Systems Design for Avionics Based on FPGA //2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). – IEEE, 2019. – С. 391-396.

23. Галкін П.В. Розробка лабораторного комплексу по вивченню вбудованих систем управління і промислової автоматизації. – 2017.

24. Галкин П.В. Модель беспроводной сенсорной сети на основе гиперграфа //сб. матер. фор./ПВ Галкин//17–й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке. – 2013. – Т. 4. – С. 71-72.

25. Игнатьева Т.И., Заяц А. М. Модельное представление узлов беспроводной сенсорной сети //Актуальные вопросы в лесном хозяйстве. – 2020. – С. 133-138.

26. Галкин П.В. Модель и алгоритм управления информационными потоками в бес-проводной сенсорной сети //Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – 2015. – №. 1. – С. 17-32.

27. Ключников В.О. Выбор оптимального протокола маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях передачи данных //Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8. – №. 2. – С. 11-12.

28. Башир А., Мокров Е.В. Модель контроля перегрузок в облачных системах беспроводных сенсорных сетей //Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. – 2021. – С. 25-27.

29. Wattenhofer R. A Practical Topology Control Algorithm for Ad-Hoc Networks / R. Wattenhofer, A. Zollinger. // International Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks. – 2004. – №4.

30. Burkhart M. Does topology control reduce interference? / M. Burkhart, P. von Rickenbach. // Int. Symposium on Mobile ad hoc networking & computing (MobiHoc). – 2004.

31. Гребешков А.Ю., Кузнецов Я. М. Общая модель описания отказов оборудования сенсорных беспроводных сетей //Проблемы и перспективы внедрения инновационных телекоммуникационных технологий. – 2020. – С. 72-77.

32. Десницкий В.А., Чечулин А. А., Дойникова Е. В. МЕТОДИКА ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ //Перспективные направления развития отечественных информационных технологий. – 2020. – С. 197-198.

33. Заяц А.М., Хабаров С. П. Построение моделей беспроводных сетей с учетом энергопотребления и мобильности ее узлов //Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2020. – №. 232. – С. 252-264.

34. Воробьева Д.М., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Выбор скорости движения головного узла в гетерогенной беспроводной сенсорной сети с подвижными головными узлами //Электросвязь. – 2020. – №. 12. – С. 20-24.

35. Astapenya V., Sokolov V., Ageyev D. Experimental Evaluation of an Accelerating Lens on Spatial Field Structure and Frequency Spectrum //2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). – IEEE, 2020. – С. 203-206.

36. Лемешко О.В., Євдокименко М. О. Вдосконалення потокової моделі маршрутизації в мультисервісній телекомунікаційній мережі із забезпеченням якості обслуговування //Системи озброєння і військова техніка. – 2020. – №. 1 (61). – С. 31-43.

37. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Міждержавний стандарт. Документація. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования [Текст] . – Введ. 01.01.1979. – К. ІПрІн, УкрІНТЕІ, ГВСЕЦНАНУ. – 4 с