

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)

Метод організації мереж Інтернету
речей високої щільності
(тема)

Виконав:
_____ II курсу, групи СПм-22-6
Соробей Б.В.
(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма _____
Системне програмування
(повна назва освітньої програми)

Керівник: _____ проф. Можасв О.О.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ _____ Коваленко А.А.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 123 «Комп'ютерна інженерія» _____
(код і повна назва)

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

Освітня програма _____ Системне програмування _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Соробею Богдану Володимировичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Метод організації мереж Інтернету речей високої щільності _____

затверджена наказом по університету від “ 01 ” квітня 2024 р. № 257 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 15 червня 2024 р.

3. Вхідні дані до роботи _____ комп'ютері з процесором Intelі 7 12700K,
операційна система –Windows, 32 Гб оперативної пам'яті, бібліотека scikit-learn,
мова програмування Python.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

- 1) провести аналітичний огляд розвитку та основних завдань побудови мереж IoT;
- 2) вибрати математичний та програмний інструментарій побудови мережі;
- 3) Розробити метод кластеризації мережі IoT;
- 4) Запропонувати підхід до вибору головних вузлів у мережі IoT;
високої щільності;
- 5) висновки.

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

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел-	02.04.24-08.04.24	
2	Вибір та обґрунтування методики дослідження	09.04.24-16.04.24	
3	Вибір інструментальних засобів	17.04.24-22.04.24	
4	Розробка моделей протоколів	23.04.24-06.05.24	
5	Проведення експериментів	07.05.24-23.05.24	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	24.05.24-03.06.24	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	04.06.24-07.06.24	
8	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	08.06.24-12.06.24	

Дата видачі завдання 01 квітня 2024 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. Можасєв О.О.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 83 с., 22 рис., 3 табл., 2 дод., 14 джерел.

ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ, ГОЛОВНИЙ ВУЗОЛ, ІЄРАРХІЧНА СТРУКТУРА, ФРАКТАЛЬНА РОЗМІРНІСТЬ.

Предметом дослідження є моделі та методи побудови та вибору структури мережі Інтернету речей високої щільності. Об'єктом дослідження є процес організації мереж Інтернету речей високої щільності. Метою дослідження є підвищення ефективності вирішення завдань в бездротових мережах Інтернету речей високої щільності шляхом розробки методу організації мереж Інтернету речей високої щільності, що враховує особливості цих мереж. Визначити характерні особливості мереж високої щільності Інтернету речей. Обґрунтований вибір математичного та програмного інструментарію побудови мережі Інтернету речей високої щільності.

Проведене моделювання структури мережі Інтернету речей високої щільності з використанням фрактальної розмірності простору елементів. Удосконалений метод кластеризації мережі Інтернету речей високої щільності. Запропонований підхід до вибору головних вузлів у мережі Інтернету речей високої щільності.

ABSTRACT

Master's thesis: 83 pages, 22 figures, 3 tables, 2 appendices, 14 sources.

HIGH DENSITY INTERNET OF THINGS, MAIN NODE,
HIERARCHICAL STRUCTURE, FRACTAL DIMENSION.

The subject of the study is models and methods of building and choosing the structure of a high-density Internet of Things network. The object of research is the process of organizing high-density Internet of Things networks. The purpose of the study is to increase the efficiency of solving tasks in wireless high-density Internet of Things networks by developing a method of organizing high-density Internet of Things networks that takes into account the features of these networks. To determine the characteristic features of high-density networks of the Internet of Things. Reasoned selection of mathematical and software tools for building a high-density Internet of Things network.

Modeling of the structure of the high-density Internet of Things network using the fractal dimension of the space of elements was carried out. An improved clustering method for a high-density Internet of Things network. A proposed approach to the selection of master nodes in a high-density Internet of Things network.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ТА ОСНОВНИХ ЗАВДАНЬ ПОБУДОВИ МЕРЕЖ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ	12
1.1 Аналіз розвитку та характеристик концепції Інтернету речей	12
1.2 Протоколи бездротових сенсорних мереж Інтернету речей	18
1.3 Застосування бездротових сенсорних мереж Інтернету речей	20
1.4 Важливість функції самоорганізації мереж зв'язку Інтернету речей	24
1.5 Характерні особливості мереж високої щільності Інтернету речей	26
2 МАТЕМАТИЧНИЙ ТА ПРОГРАМНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ ПОБУДОВИ МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ	29
2.1 Завдання організації мережі Інтернету речей високої щільності	29
2.2 Методи визначення фрактальної розмірності простору мережних елементів	34
2.3 Методи кластеризації простору мережних елементів	35
3 ОРГАНІЗАЦІЯ МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ	44
3.1 Моделювання структури мережі Інтернету речей високої щільності з використанням фрактальної розмірності простору елементів	44
3.2 Метод кластеризації мережі Інтернету речей високої щільності	49
3.3 Вибір головних вузлів у мережі Інтернету речей високої щільності	54
3.3.1 Структура Інтернету речей високої щільності	54
3.3.2 Завдання вибору головних вузлів	57

3.3.3 Вибір головних вузлів кластерів у мережах Інтернету речей високої щільності	63
ВИСНОВКИ.....	69
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	71
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	73
ДОДАТОК Б Публікація	82

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БСМ – бездротова сенсорна мережа

ІКТ – інформаційно-комунікаційні технології

ІР – Інтернет речей

ІРВЩ – Інтернет речей високої щільності

МВ – мегабайт

ОС – операційна система

ПК – персональний комп'ютер

BLE – Bluetooth Low Energy

IoT – Internet of Things

SSL – Secure Sockets Layer

TLS – Transport Layer Security

VPN – Virtual Private Networks

WAN – Wide Area Networks

ВСТУП

Життя сучасного суспільства значною мірою пов'язане з досягненнями у галузі інфокомунікацій, розвитком обчислювальної техніки та методів доставки та обробки інформації, що реалізуються сучасною інфокомунікаційною системою. На сьогодні активно відбувається розвиток такого напрямку як Інтернет речей, який включає в себе комунікації між різними автоматичними пристроями. Проникнення Інтернету речей призводить до появи мереж високої щільності, у випадках, коли концентрація пристроїв у просторі стає великою. Вже сьогодні один пристрій на квадратний метр – далеко не є межою. Більше того, мережі високої щільності, що утворюються в будівлях та спорудах різного призначення, неможливо описати традиційними двовимірними моделями. Це мережі у житлових або офісних багатоповерхових будинках, а також мережі промислових підприємств, що обслуговують різні технологічні об'єкти та процеси.

Ефективність функціонування мереж високої щільності більшою мірою, ніж мереж малої щільності, залежить від методів побудови мережі, вибору її логічної структури. Для керування мережами з великою кількістю пристроїв потрібне застосування ієрархічних структур, що дозволяють локалізувати групи (кластери) із відносно невеликою кількістю пристроїв. Однак для вирішення цього завдання також доводиться оперувати більшими кількостями. Також слід враховувати, що розв'язання цих завдань використовуються обчислювальні засоби контролерів із відносно невисокою продуктивністю.

Для побудови та забезпечення функціонування мереж інтернету речей високої щільності потрібне вдосконалення моделей та методів, які застосовуються у цих завданнях.

Тому, можна зробити висновок, що кількісні зміни у мережах інтернету речей призводять до необхідності розробки моделей і методів, дозволяють враховувати особливості мереж високої щільності, і навіть мереж, розміщених у тривимірному просторі, під час вирішення завдань вибору логічної структури цих мереж, тобто. у задачах кластеризації, виділення головних вузлів мережі, а також у задачах маршрутизації трафіку.

Отже, спираючись на вищевикладене, науково-технічне завдання, спрямоване на розробку методу організації мереж Інтернету речей високої щільності є актуальним та доцільним.

Предметом дослідження є моделі та методи побудови та вибору структури мережі Інтернету речей високої щільності

Об'єктом дослідження є процес організації мереж Інтернету речей високої щільності.

Метою дослідження є підвищення ефективності вирішення завдань в бездротових мережах Інтернету речей високої щільності шляхом розробки методу організації мереж Інтернету речей високої щільності, що враховує особливості цих мереж.

Для досягнення мети повинні бути вирішені такі часткові завдання:

- провести аналіз розвитку та основних завдань побудови мереж Інтернету речей ;
- визначити характерні особливості мереж високої щільності Інтернету речей;
- обґрунтувати вибір математичного та програмного інструментарію побудови мережі Інтернету речей високої щільності;
- провести моделювання структури мережі Інтернету речей високої щільності з використанням фрактальної розмірності простору елементів;
- удосконалити метод кластеризації мережі Інтернету речей високої щільності;
- запропонувати підхід до вибору головних вузлів у мережі Інтернету речей високої щільності.

Наукова новизна дослідження полягає в такому: удосконалено метод кластеризації мережі Інтернету речей високої щільності за рахунок послідовного розрахунку фрактальної розмірності підпросторів кінцевих елементів, що надало вииграш за якістю кластеризації в середньому на 18%.

Практична цінність дослідження полягає в підвищенні ефективності вирішення завдань в бездротових мережах Інтернету речей високої щільності.

1 АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ТА ОСНОВНИХ ЗАВДАНЬ ПОБУДОВИ МЕРЕЖ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

1.1 Аналіз розвитку та характеристик концепції Інтернету речей

Підвищення технологічності пристроїв отримання та передачі інформації, зниження їх вартості а також зближення можливостей, що забезпечуються сучасними технологіями та потребами, зумовлене сучасним станом суспільних відносин та діяльності людини послужило поштовхом до розвитку Інтернету речей (IoT, Internet of Things). За оцінками авторитетних аналітиків, загальна кількість пристроїв ІВ, підключених до мереж зв'язку, неухильно зростає, і вона вже перевищила кількість жителів на Землі. На рисунку 1.1 наведено статистичні дані до 2023 року та прогноз до 2030 року за даними Statista [1]. До 2030 року очікується, що кількість пристроїв IoT становитиме близько 30 млрд, що приблизно в чотири рази перевищить чисельність людства. Є і інші прогнози.

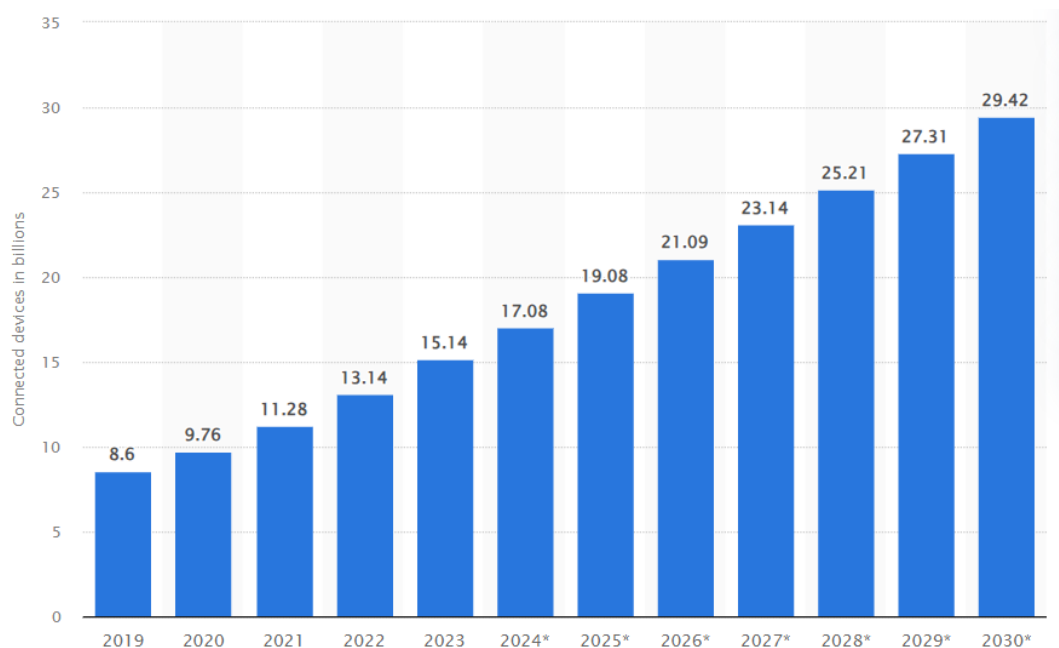


Рисунок 1.1 – Статистика та прогноз зростання
кількості підключених до мережі пристроїв IoT [1]

За визначенням, яке надає МСЕ у документі МСЕ-Т Y.2060 [2], Інтернет речей – «це глобальна інфраструктура для інформаційного суспільства, яка забезпечує можливість надання більш складних послуг шляхом поєднання один з одним (фізичних та віртуальних) речей на основі існуючих та функціонально сумісних інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ)». Мета створення цієї інфраструктури – це підвищення доступності інформації у світовому сенсі, що у рекомендації Y.2060 [2] ілюструється, як показано на рисунку 1.2. Концепція даної інфраструктури припускає наявність комунікації у будь-якому місці (на вулиці, вдома, біля комп'ютера), у будь-який час (вдень, вночі, рухаючись) та будь-яких пристроїв (між комп'ютерами або пристроями, між людьми та пристроями, безпосередньо між людьми без комп'ютерів).

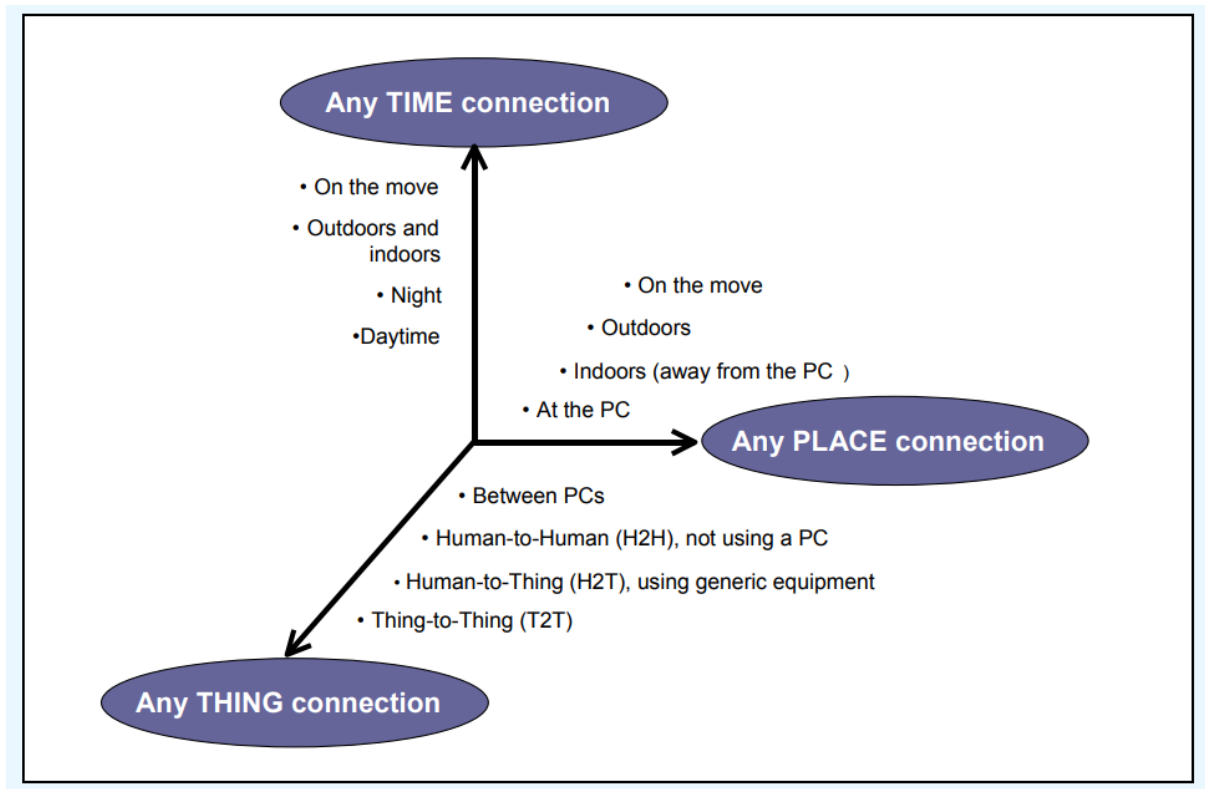


Рисунок 1.2 – Концепція Інтернету речей [2]

Отже, безсумнівно, що IoT розвиватиметься у довгостроковій перспективі. Основними якостями цього процесу слід вважати:

- збільшення кількості пристроїв, підключених до мереж зв'язку, що призводить до виникнення мереж високої щільності;
- проникнення технологій IoT у різні сфери діяльності людини, що тягне за собою розвиток технічних можливостей цих пристроїв та підвищення вимог до показників функціонування мережі, побудованих на них основі;
- створення як локальних спеціалізованих мереж, так і проникнення даної технології у глобальні мережі.

Як найбільш істотну особливість мереж IoT слід вважати кількість підключених пристроїв, яка суттєво перевищує ті кількості, з якими раніше доводилося мати справу в мережах, де кількість підключень визначалася кількістю абонентів (користувачів).

Концепція Інтернету речей відповідно до рекомендацій МСЕ-Т має низку нижчеперерахованих характеристик.

Зв'язність. Будь-яка річ IoT повинна мати можливість бути пов'язаною із глобальною інфокомунікаційною структурою. Це дозволяє мати ширші можливості в управлінні та моніторингу пристроїв, а також відкрити нові перспективи для різних галузей промисловості та наукових досліджень. IPv6 є протоколом зв'язування мережного рівня, що забезпечує унікальні ідентифікатори для пристроїв, підключених до Інтернету. Кожному пристрою, підключеному до мережі, присвоюється унікальна IPv6-адреса, яка дозволяє його ідентифікувати та встановлювати зв'язок з іншими пристроями мережі.

Деякі з прикладів речей, які можуть бути пов'язані з глобальною інфокомунікаційною структурою, включають розумні будинки та розумні міста, де різні пристрої в будинку або міській інфраструктурі, такі як розумні термостати, світлові прилади, камери відеоспостереження та датчики, можуть бути підключені до Інтернету і керуватися віддалено.

Іншим прикладом є пристрої, що носяться людиною, наприклад, такі, як розумний годинник, який може синхронізуватися з Інтернетом для

отримання і відображення інформації про час, погоду, новини та інші повідомленнях.

Крім того, автомобілі, обладнані системами G PS , телематикою та іншими електронними пристроями, також можуть бути пов'язані з Інтернетом та використовуватися для обміну даними та керування пристроями на автомобілі.

Гетерогенність. Пристрої IoT можуть бути використані на різних програмних та апаратних платформах і в різних мережах. Дані пристрої повинні мати можливість взаємодіяти за допомогою різних мереж з іншими пристроями.

Пристрої мережі IoT можуть бути використані в різних програмних та апаратних платформах та працювати у різних мережах, таких як бездротові мережі, локальні мережі, Wide Area Networks (WAN) тощо. Пристрої IoT зазвичай обмінюються даними, використовуючи різні протоколи зв'язку, такі як HTTP, MQTT, CoAP тощо. Для забезпечення взаємодії між пристроями IoT використовуються протоколи та технології, такі як RESTful API, WebSocket та Lightweight M2M. Ці технології забезпечують передачу даних між пристроями в режимі реального часу, а також забезпечують стандартизовану комунікацію між пристроями IoT. Крім того, для забезпечення безпеки передачі даних між пристроями IoT використовуються різні протоколи та методи, такі як Secure Sockets Layer (SSL), Transport Layer Security (TLS), Virtual Private Networks (VPN) і т.д. Ці протоколи та методи допомагають захистити дані при передачі між пристроями IoT та мережу в цілому.

Загалом можливість взаємодії між пристроями IoT через різні програмні та апаратні платформи та забезпечення безпеки передачі даних є важливими аспектами для успішного функціонування мережі Інтернету речей та реалізації її потенційних переваг.

Динамічні зміни. Речі в Інтернеті речей (IoT) можуть мати різні статуси, які можуть змінюватися в залежності від різних факторів, таких як

час, місцезнаходження і т.д. Нижче наведено деякі загальні характеристики статусів речей у мережі IoT:

- пов'язана річ: це річ, яка підключена до Інтернету та має активне мережеве з'єднання. Вона може обмінюватися даними з іншими пристроями та мережами. Наприклад, це можуть бути розумний будинок, в якому безліч пристроїв, таких як розумні лампи, термостати, дверні замки і т.д., пов'язані в IoT мережу і можуть взаємодіяти один з одним і з Інтернетом;

- непов'язана річ: це річ, яка не має підключення до Інтернету або має проблеми з мережним з'єднанням. Наприклад, це може бути датчик, який не може передати дані через відсутність мережного з'єднання;

- спляча річ: це річ, яка знаходиться в режимі сну, щоб зберегти енергію. Наприклад, це може бути сенсор, який прокидається лише тоді, коли спрацює певна умова, така як зміна температури або рух;

- активна річ: це річ, яка активна та готова до роботи. Вона може обмінюватися даними з іншими пристроями та мережами. Наприклад, це може бути камера відеоспостереження, яка готова до запису та передачі даних.

Крім того, характеристики речей у мережі IoT можуть змінюватися в залежності від часу, розташування або інших факторів. Наприклад, може змінюватися кількість речей мережі IoT, їх розташування, стан заряду батареї, рівень сигналу тощо. Ці зміни можуть впливати на роботу мережі та вимагати відповідного налаштування та керування мережею, щоб забезпечити її правильну роботу.

Забезпечення речей послугами. Речі є елементом клієнтської бази, і тому послуги, що надаються тією чи іншою річчю, мають надаватися без обмеження часу для фізичних та віртуальних пристроїв.

На даний момент послуги, що надаються речами в мережі IoT, можуть залежати від часу та конкретних характеристик речі, але в цілому бажано, щоб вони були максимально доступними для споживачів.

Величезна шкала речей. У мережах Інтернету речей кількість пристроїв може досягати десятка трильйонів пристроїв. Прогнозується, що кількість пристроїв у мережах IoT продовжуватиме зростати і може досягти десятків трильйонів пристроїв найближчим часом. Згідно з звітом компанії IDC, до 2025 року кількість пристроїв IoT на планеті досягне 41,6 мільярда, а в іншому дослідженні, проведеному компанією Juniper Research, прогнозується, що до 2026 року кількість підключених пристроїв IoT досягне 83,8 мільярда. Вочевидь, зростатимуть й вартісні показники, відповідні прогнози для Європейського ринку IoT наведені на рисунку 1.3. Таке стрімке збільшення кількості пристроїв IoT стає можливим завдяки розширенню сфери застосування технологій IoT.

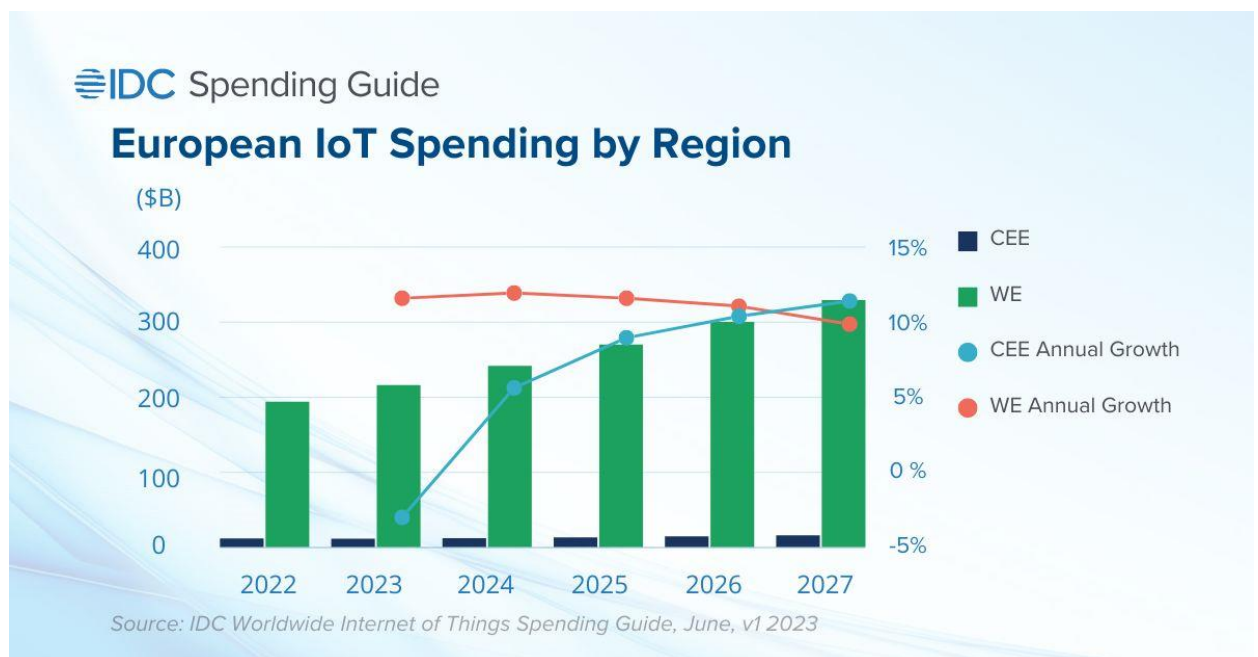


Рисунок 1.3 – Прогноз щодо європейського ринку IoT на найближчі роки [3]

Сьогодні пристрої IoT широко застосовуються в таких сферах як промисловість, охорона здоров'я, міське планування та управління, сільське господарство, транспорт та домашня автоматизація, і це лише деякі з можливих сфер застосування. При цьому паралельно швидко розвиваються бездротові сенсорні мережі, які розглянемо у наступному підрозділі.

1.2 Протоколи бездротових сенсорних мереж Інтернету речей

Бездротові сенсорні мережі (БСМ) почали активно використовуватися наприкінці 1970-х років, коли розробники почали експериментувати з використанням бездротового з'єднання передачі інформації від датчиків. Проте справжній прорив стався у 1990-х роках, коли з'явилися перші бездротові комерційні сенсорні мережі. Вони активно розвивалися і стали доступні широкому колу споживачів. Розвиток мікроелектроніки дозволив створювати компактні, недорогі та енергоефективні датчики та пристрої зв'язку, що сприяло розвитку таких систем. На сьогодні є поширеною низка протоколів БСМ, наведена нижче.

ZigBee. Основним протоколом бездротових сенсорних мереж IoT є Zig Bee, розроблений для забезпечення безпечного та надійного зв'язку між пристроями, що працюють на низькій потужності. Він використовує малоенергетичний радіопротокол IEEE 802.15.4 та забезпечує досить високу швидкість передачі даних на невеликі відстані (до 100 метрів). Цей протокол застосовується у багатьох областях, включаючи розумний будинок, промисловість, логістику та медицину.

Однак Zig Bee не є єдиним та основним протоколом. Існують інші протоколи, такі як Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi, Z-Wave, LoRaWAN та ін. Кожен з них має свої особливості та застосовується в різних сферах діяльності, залежно від вимог до мережі, таких як дальність дії, швидкість передачі даних, енергоспоживання, вартість та і т.д.

Bluetooth. Bluetooth був розроблений для передачі даних між пристроями в короткому діапазоні, зазвичай до 10 метрів, і може підключати до восьми пристроїв. У той же час, бездротові сенсорні мережі можуть складатися із сотень або навіть тисяч пристроїв, які мають обмінюватися даними в радіусі дії до кількох сотень метрів. Крім того, Bluetooth споживає значну кількість енергії, що робить його менш ефективним для бездротових сенсорних мереж, де широко використовуються батарейні та бездротові

пристрої. Тим не менш, є випадки, коли Bluetooth таки застосовується в бездротових сенсорних мережах IoT, наприклад, у невеликих системах моніторингу мікроклімату або в системах моніторингу активності та здоров'я людей. У таких випадках Bluetooth може бути ідеальним вибором завдяки своїй надійності та зручності використання, а також наявності різних профілів та рівнів служб у стандарті Bluetooth, таких як Bluetooth Low Energy (BLE), які можуть бути оптимізовані для бездротових сенсорних мереж.

Wi-Fi. Wi-Fi був створений для передачі даних між комп'ютерами та іншими пристроями в локальних мережах і має досить високий рівень енергоспоживання, тому він не оптимізований для використання в бездротових сенсорних мережах, де зазвичай використовуються батарейні пристрої з низьким рівнем енергоспоживання. Однак деякі пристрої в бездротових сенсорних мережах можуть використовувати Wi-Fi для отримання доступу до Інтернету та передачі даних на великі відстані, наприклад, у міських сенсорних мережах або системах розумного міста. У таких випадках Wi-Fi може бути транспортним протоколом передачі даних на сервери, де вони обробляються і аналізуються.

Однією з переваг Wi-Fi є його висока швидкість передачі даних та широке поширення, завдяки чому існує велика кількість пристроїв з підтримкою Wi-Fi, що робить його більш доступним в економічному плані, ніж деякі інші протоколи бездротового зв'язку.

Z-Wave. Z-Wave використовує меншу частоту – 868,42 МГц у Європі та 908,42 МГц у Північній Америці – що дозволяє краще проникати крізь стіни та інші перешкоди, покращувати передачу сигналу та збільшувати діапазон покриття. Завдяки цьому протокол Z-Wave є гарним вибором для систем розумного будинку та бездротових сенсорних мереж, де потрібне стійке та надійне з'єднання. Z-Wave має низький рівень енергоспоживання, що дозволяє безперебійну роботу пристроїв на батарейній основі протягом декількох років. Це робить Z-Wave ідеальним вибором для бездротових сенсорних мереж, де батареї можуть бути розміщені на великій відстані від

центрального пристрою управління. Однією з помітних переваг протоколу Z-Wave є його здатність забезпечувати пристроям розумного будинку та бездротовим сенсорним мережам стійку та надійну взаємодію. Крім того, завдяки наявності більш ніж 2000 сертифікованих пристроїв та простоті установки та налаштування, Z-Wave може бути використаний практично в будь-якій системі розумного будинку або бездротової сенсорної мережі.

LoRaWAN. LoRaWAN використовує модуляцію з розширенням для передачі даних на великі відстані і в умовах, де доступність сигналу є проблемою. Однією з головних переваг LoRaWAN є його дальність зв'язку, яка може досягати кількох кілометрів у міських умовах і більше 10 кілометрів на відкритій місцевості. Це робить LoRaWAN ідеальним вибором для створення бездротових сенсорних мереж, використовуючи які можна охопити великі території, наприклад міські мережі управління трафіком, водопостачанням, доглядом за зеленими насадженнями і т.д. Крім того, LoRaWAN має низький рівень енергоспоживання, що дає змогу пристроям працювати протягом кількох років на батарейній основі. Це робить його ідеальним для бездротових сенсорних мереж, де батарейні пристрої повинні працювати протягом тривалого часу. LoRaWAN також має захищеність протоколів та підтримує шифрування даних для захисту від несанкціонованого доступу. Це робить LoRaWAN безпечним вибором для передачі конфіденційних даних у бездротових сенсорних мережах.

Таким чином, вибір протоколу бездротової сенсорної мережі для IoT залежить від вимог проекту, функціональності та умов експлуатації.

1.3 Застосування бездротових сенсорних мереж Інтернету речей

Бездротові сенсорні мережі застосовують у різних галузях і сферах діяльності. Деякі з них наведені нижче.

Розумний будинок (рисунок 1.4): бездротові сенсорні мережі використовують в розумних будинках для керування освітленням,

температурою, сигналізацією, автоматичними дверима та ін. Розглянемо приклади таких систем та пристроїв.

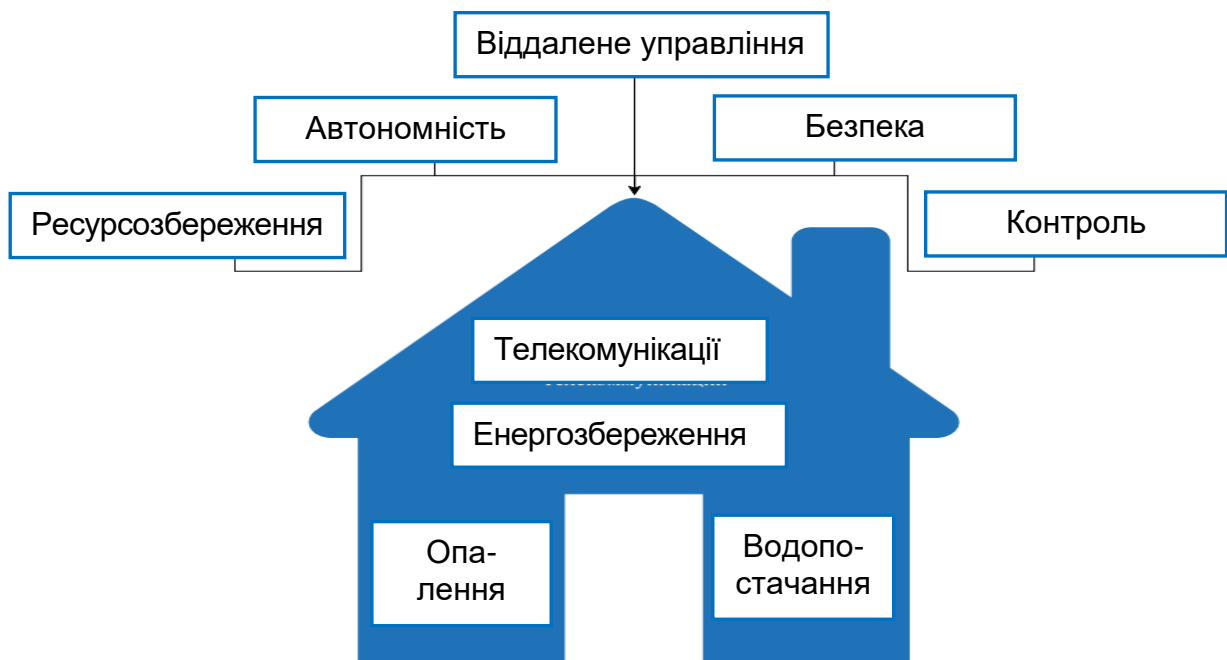


Рисунок 1.4 – Застосування IoT для розумного будинку

Освітлення: БСМ дозволяють автоматично керувати освітленням у будинку на основі наявності людей у конкретній кімнаті чи зоні, рівня природного світла тощо. Це дозволяє скоротити витрати енергії та збільшити комфорт у будинку.

Клімат-контроль: БСМ також можуть використовуватися для керування температурою в різних кімнатах будинку на основі бажаного рівня комфорту в кімнаті та поточній погоди.

Охоронна система: БСМ часто використовуються для керування охоронною сигналізацією в будинку. Датчики можуть контролювати вікна, двері та інші точки доступу на предмет несанкціонованого входу будинок.

Автоматичні двері: БСМ також можна використовувати для автоматичного керування дверима в будинку. Наприклад, система може автоматично відчиняти двері для гостей або мешканців, використовуючи розпізнавання обличчя.

Керування енергоспоживанням: БСМ можуть використовуватися для керування енергоспоживанням у будинку. Датчики можуть контролювати енергоспоживання різних пристроїв, таких як холодильник, кондиціонер, пральна машина тощо.

Таким чином, бездротові сенсорні мережі відіграють важливу роль у створенні розумного будинку, підвищуючи комфорт та безпеку мешканців та знижуючи витрати на енергоспоживання.

Промисловість: БСМ використовуються для моніторингу та управління виробничими процесами в промисловості. Одне із застосування бездротових сенсорних мереж у промисловості - це контроль якості продукції. Сенсори можуть бути використані для вимірювання фізичних характеристик продукції, таких як розмір, вага, температура, вологість і т.д. Це допомагає запобігати дефектам продукції на ранніх етапах виробництва та забезпечує більш високу точність та надійність в оцінці якості кінцевого продукту. БСМ також використовуються для моніторингу стану обладнання та запобігання можливим аваріям. Датчики можуть контролювати стан та ефективність різних машин та систем у реальному часі, а потім передавати отримані дані до центральної системи управління. Це дозволяє операторам швидко реагувати на проблеми та вживати заходів щодо усунення несправностей до того, як відбудуться збої в роботі обладнання. Інше застосування БСМ – це управління та оптимізація виробничих процесів. Сенсори можуть контролювати різні параметри виробничих процесів, такі як швидкість стрічки, температура печі, рівень рідини в резервуарах і т.д. Отримані дані можуть бути використані для оптимізації ефективності та швидкості виробничих процесів, мінімізації витрат на електрику та інші ресурси, а також для скорочення часу обробки продукції.

Таким чином, бездротові сенсорні мережі є важливим інструментом для промислових підприємств, допомагаючи знизити витрати та збільшити продуктивність, забезпечуючи безпечніші та ефективніші умови роботи.

Охорона здоров'я: БСМ використовуються для моніторингу

показників здоров'я пацієнтів, які стежать за станом серцевого ритму, тиском, рівнем кисню в крові та ін. Завдяки цьому технологічному рішенню, пацієнтам не обов'язково перебувати в лікарняній палаті, щоб підтримувати постійний контроль за своїми життєво важливими показниками. За допомогою бездротових датчиків, які часто оснащені спеціалізованими приладами, пацієнти можуть контролювати свої серцеві ритми, рівень кисню у крові, температуру тіла та біль. Отримані дані передаються до центральної системи управління медичні послуги для аналізу. Це дозволяє лікарям своєчасно реагувати на несприятливі зміни у здоров'я пацієнтів та надавати потрібну допомогу. Таким чином, бездротові сенсорні мережі дійсно є новою ерою для моніторингу здоров'я, відкриваючи можливості для більш детального контролю та управління показниками здоров'я пацієнтів у режимі реального часу без необхідності постійного перебування в лікарні.

Транспорт: БСМ використовуються для моніторингу та оптимізації транспортних систем. Одним із способів використання бездротових сенсорних мереж є контроль за рухом транспорту. Системи моніторингу руху дозволяють встановити датчики, які збирають інформацію про потік транспорту та передають її на сервер. Ця інформація може бути використана для визначення потенційних пробок та керування світлофорами, що допоможе знизити час у дорозі, та зменшить конфлікти між транспортними потоками. Бездротові сенсорні мережі також можуть бути використані для збору даних про стан доріг та інфраструктуру. Наприклад, датчики можуть моніторити стан дорожнього покриття, заміряти швидкість вітру, температуру та вологість. Ці дані можуть використовуватися для визначення стану доріг та для покращення технічного обслуговування. Таким чином, бездротові сенсорні мережі є дієвим інструментом для моніторингу та керування транспортними системами, що дозволяє підвищити ефективність та безпеку дорожнього руху.

Охорона навколишнього середовища: БСМ застосовуються для контролю за якістю повітря, водою, забрудненням ґрунту, рівнем шуму тощо.

Дані можуть бути аналізовані та використані для моніторингу та управління системами очищення повітря, води, для запобігання забруднення ґрунту, управління та скорочення шумового забруднення і т.д.

Спорт та фітнес: БСМ можуть використовуватись для відстеження фізичної активності, здоров'я та фітнесу. Вони можуть використовуватися для контролю серцевого ритму, кількості пройдених кроків, вимірювання калорій, збору даних про вправи та і т.д. Такі мережі зазвичай складаються з невеликих пристроїв, які можна носити на тілі та які збирають дані за допомогою вбудованих сенсорів, таких як акселерометри, гіроскопи та пульсометри. Зібрані дані можуть бути передані на сервер, де вони обробляються та аналізуються для виявлення трендів та патернів у фізичній активності та здоров'ї. БСМ мають величезний потенціал для покращення якості життя та підвищення ефективності різних сфер діяльності. Вони можуть допомогти у вирішенні багатьох проблем і підвищенні безпеки, ефективності та комфорту для людей.

1.4 Важливість функції самоорганізації мереж зв'язку Інтернету речей

Мережа, що самоорганізується – це мережа, яка може змінювати свою структуру і конфігурацію, щоб краще відповідати вимогам навколишнього середовища та забезпечити ефективну передачу даних. У такій мережі вузли можуть взаємодіяти між собою та приймати рішення в автономному режимі без участі центрального управління. Такі мережі можуть бути реалізовані за допомогою різних технологій, таких як бездротові мережі, сенсорні мережі, керування трафіком в локальних мережах (LAN) і т. д. Важливими властивостями таких мереж є масштабованість і гнучкість, що робить їх особливо привабливими для застосування в складних і динамічних середовищах.

Самоорганізація є важливою функцією сучасних мереж зв'язку, що дозволяє їм адаптуватися до умов, що змінюються, швидко і ефективно

обслуговувати велику кількість користувачів і забезпечувати надійність зв'язку.

Деякі з функцій, що забезпечуються самоорганізацією мереж зв'язку, наведені нижче.

Автоконфігурація: мережі зв'язку можуть автоматично налаштовувати свої параметри, такі як ІР-адреси, маршрутизація, налаштування безпеки тощо без участі операторів зв'язку. Це дозволяє прискорити процес налаштування мережі та зменшити ймовірність помилок.

Адаптивність: мережі можуть швидко адаптуватися до зміни умов, таких як збільшення трафіку або відмова пристроїв. Наприклад, мережа може перенаправити трафік на ширші канали, коли відбувається збільшення трафіку, що забезпечує ефективніше використання ресурсів мережі.

Розподілена обробка інформації: самоорганізація дозволяє виконувати обробку інформації на кожному вузлі мережі, мінімізуючи кількість обробки на центральних серверах та зменшуючи затримки у передачі даних.

Координація: мережі зв'язку можуть автоматично координувати роботу різних пристроїв та вузлів мережі для оптимізації використання ресурсів та забезпечення надійності зв'язку.

Виявлення та усунення помилок: мережі зв'язку можуть самостійно виявляти та усувати помилки, такі як обриви з'єднання або неполадки в обладнанні, наприклад, мережі можуть проводити діагностику та перенаправляти трафік через альтернативні шляхи у разі обриву з'єднання.

Оптимізація ресурсів: мережі зв'язку можуть оптимізувати використання ресурсів, наприклад, шляхом динамічного регулювання пропускної спроможності каналів зв'язку залежно кількості трафіку тощо.

Управління навантаженням: мережі зв'язку можуть оптимізувати використання ресурсів та забезпечити балансування навантаження, наприклад, розподіляючи трафік між різними каналами зв'язку або збільшуючи пропускну спроможність тих каналів, що знаходяться під найбільшим навантаженням.

Функції самоорганізації мереж зв'язку важливі для забезпечення надійності, ефективності та гнучкості роботи мереж, в умовах технологічного середовища, що швидко змінюється. Особливу роль вони грають у мережах IoT високої щільності.

1.5 Характерні особливості мереж високої щільності Інтернету речей

Розвиток IoT веде до зростання кількості пристроїв, підключених до мережі. Зважаючи на те, що ці пристрої часто локалізовані в деякій цільовій області простору, це призводить до їхньої високої концентрації, тобто до зростання кількості з розрахунку на одиницю простору. У цьому випадку може бути недостатньо плоскої (двовимірної) моделі, оскільки пристрої можуть розміщуватися і взаємодіяти в тривимірному просторі, причому третій вимір (висота) може бути дуже суттєвим з точки зору організації взаємодії між її вузлами. Наприклад, гетерогенна мережа IoT може включати в себе елементи, розміщені на повітряних, в том числа, висотних та космічних платформах. Такі мережі IoT також мають місце і в різних будівлях: багатоповерхових будинках та спорудах, на промислових об'єктах і, можливо, в інших випадках. Основною ознакою того, що мережу необхідно розглядати як тривимірну є розподіл її вузлів у просторі. Якщо область обслуговування така, що її «висота» може бути порівняна з іншими двома вимірами, то таку мережу слід розглядати як тривимірну, наприклад, в області висотної забудови, наведеної на рисунку 1.5 [4].

Найбільш характерною особливістю мережі високої щільності є те, що в зоні зв'язку довільно взятого вузла мережі може виявитися досить багато вузлів мережі, які активно впливають на його роботу. Цей вплив проявляється у зниженні пропускної спроможності мережі. Фактично, це накладає обмеження та може негативно впливати на інтенсивність виробленого вузлами мережі трафіку IoT.

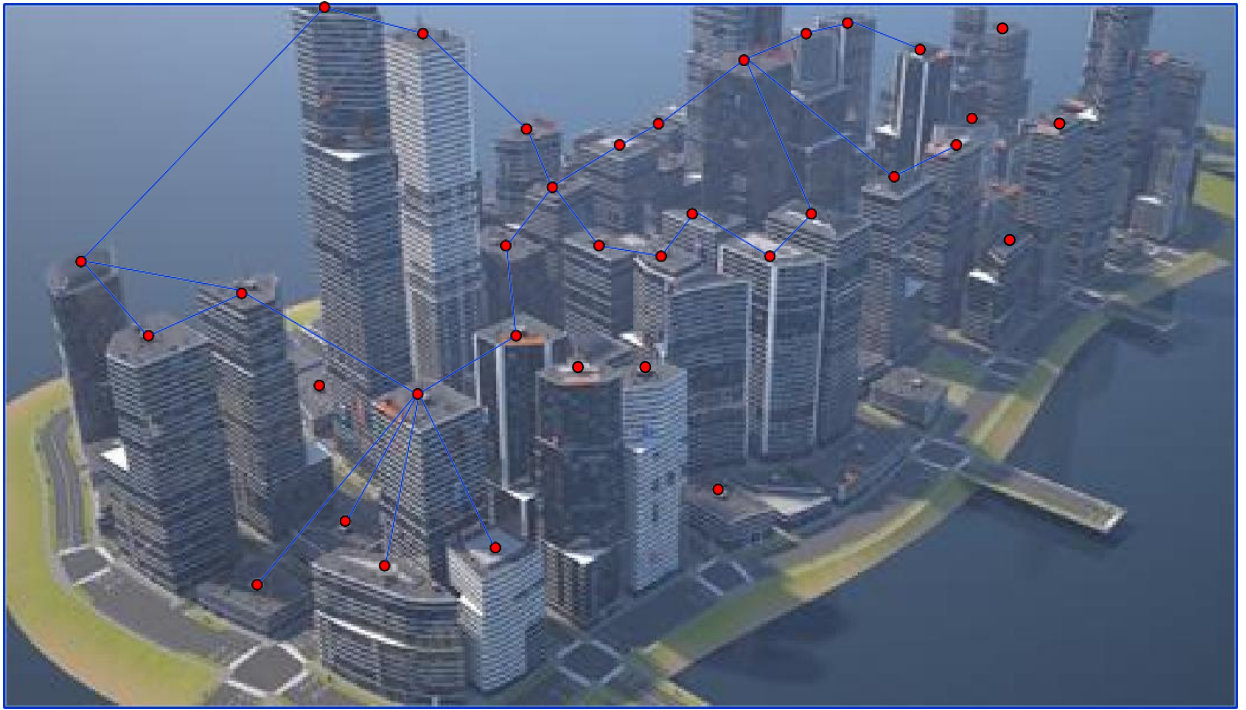


Рисунок 1.5 – Модель потенційно можливого майданчика
для розміщення тривимірних мереж ІВ [4]

Поряд із негативними властивостями мають місце і позитивні якості, якщо мережі Інтернету речей мають високу щільність. Завдяки високій щільності вузлів є велика ймовірність знайти вузол поруч із довільно обраною точкою простору. Ця якість дозволяє будувати мережу тієї структури, котра з якихось міркувань є потрібною, наприклад, є однією із структур, наведених на рисунку 1.6.

Ця властивість також дозволяє спростити деякі процедури. Наприклад, у деяких випадках знайти найкоротший маршрут у такій мережі може бути простіше, тому що найкоротша відстань визначається по прямій, отже, вузли, що входять до цього маршруту теж найімовірніше будуть розташовані поблизу цієї прямої. Зрозуміло, такі спрощення не завжди можливі. Не завжди можливо отримати дані про координати вузлів мережі, тому необхідно мати методи, що дозволяють вибирати структуру мережі та керувати нею в умовах великої кількості вузлів.

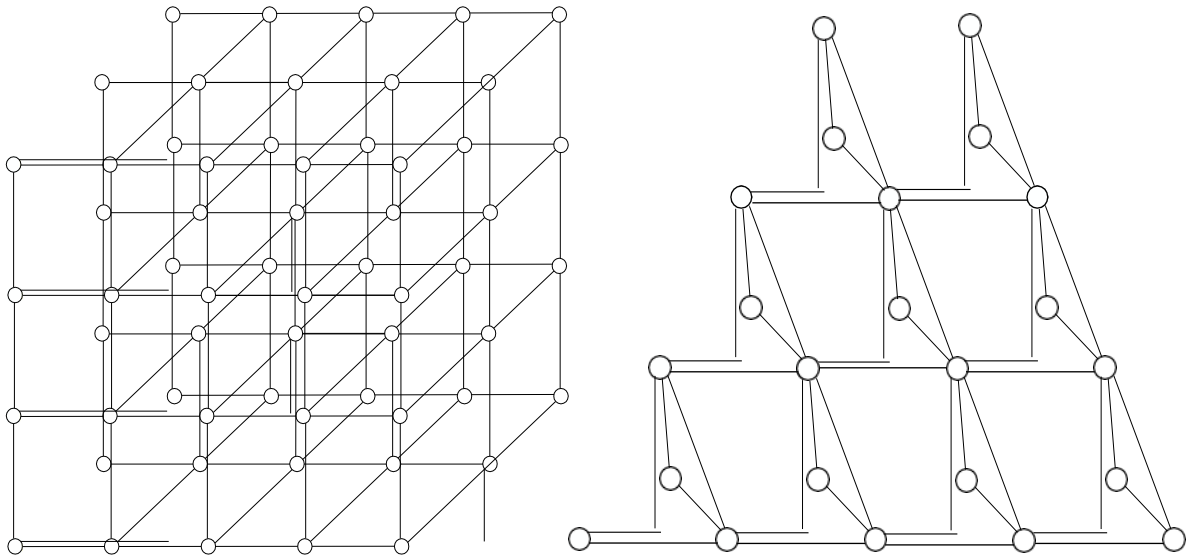


Рисунок 1.6 – Приклади моделювання структури мережі високої щільності

Тривимірна мережа може мати різну структуру, зокрема, це може бути регулярна структура у вигляді різного роду ґрат або довільна структура. Однак, у більшості випадків, структура такої мережі пов'язана із структурою оточення, в якому вона створюється.

Отже, для побудови мереж високої щільності Інтернету речей потрібне розроблення такого методу, що дозволяє вирішувати завдання моделювання та керування мережею з великою кількістю пристроїв, тобто враховує специфічні особливості даної мережі.

2 МАТЕМАТИЧНИЙ ТА ПРОГРАМНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ ПОБУДОВИ МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ

2.1 Завдання організації мережі Інтернету речей високої щільності

Реалізація мереж Інтернету речей з великою кількістю вузлів у відносно малому просторі призводить до високої концентрації пристроїв, що створює складності як з точки зору реалізації мережі, так і з точки зору її моделювання та аналізу. Ці складності насамперед визначаються занадто великою кількістю пристроїв. Під час організації децентралізованої самоорганізованої мережі (ad hoc мережі), нею необхідно управляти, тобто знаходити та підтримувати маршрути доставки трафіку. Це завдання досить легко вирішується при відносно малій кількості вузлів за допомогою відомих алгоритмів маршрутизації, проте при великій кількості вузлів, воно суттєво ускладнюється.

Наприклад, навіть при розмірі мережі у тисячу вузлів, для побудови матриці маршрутизації доведеться використовувати таблицю розміром у мільйон чарунок, тобто приблизно не менше 4 Мбайт оперативної пам'яті, а процес пошуку шляху буде пропорційний кількості не менше мільйона операцій, що виконуються процесором вузла. Враховуючи, що процесори (контролери) пристроїв мережі Інтернету речей у багатьох випадках, мають невисокі обчислювальні можливості і невеликий обсяг оперативної пам'яті, то рішення такого завдання для них є дуже складною проблемою, а з урахуванням того, що тисяча вузлів це далеко не межа, завдання суттєво ускладнюється. Для роботи з такими мережами необхідно створювати ієрархічну структуру, в якій треба виділяти кластери, що являють собою окремі ad-hoc мережі, котрі взаємодіють через шлюзи. У якості шлюзів можуть, в ряді випадків, виступати енергонезалежні вузли, що мають велику пропускну спроможність. Такі вузли часто бувають жорстко

прив'язані до інфраструктури, а мережі у цьому випадку називають інфраструктурними. Перевагою таких мереж у порівнянні з ad-hoc мережами, де всі вузли рухливі, є відносно стабільна структура. Таким чином, завдання кластеризації є одним із основних завдань побудови мережі Інтернету речей високої щільності (ІРВЩ).

Розглянемо мережу ІРВЩ з точки зору розміщення її в просторі. У багатьох випадках при моделюванні наземних мереж бездротового зв'язку, коли вузли взаємодіють один з одним у зоні прямої видимості або еквівалентної за розмірами області простору, застосовуються геометричні моделі, що оперують елементами мережі на площині, тобто застосовуються двомірні моделі. У випадку ІРВЩ такі моделі не завжди застосовні через те, що в таких мережах вузли можуть розташовуватися не тільки на площині, але і в будь-якій точці навколишнього простору. У такому випадку можна розглядати необмежені області простору, наприклад, наземні вузли на транспортних засобах, повітряні вузли на БПЛА і висотних літальних апаратах, космічні вузли на штучних супутниках землі (рисунку 2.1). Така мережа неоднорідна і має специфіку кожному зі згаданих рівнів.

Неоднорідність такої мережі визначається різними факторами, такими як: щільність вузлів певного рівня в просторі, особливості вузлів кожного з рівнів, особливості оточення, в якому розташовані вузли, відстані між вузлами, інтенсивність трафіку тощо. Наприклад, вузли розміщені на транспортних засобах знаходяться в оточенні дорожньої інфраструктури, вузли, що носяться (натільні) розміщені в просторі життя людей, вузли на БПЛА знаходяться в повітряному просторі і т.п.

Рівні такої мережі дуже відрізняються з погляду технічних засобів забезпечення зв'язку, тому вузли кожного з рівнів також суттєво відрізняються. Поруч із тим ще має місце відмінність у характері обслуговуваного трафіку. Як очевидно з рисунку 2.1 вузол вищого рівня є шлюзом між мережами нижчих і вищих рівнів. Таким чином, у таких вузлах має місце значний транзитний трафік.

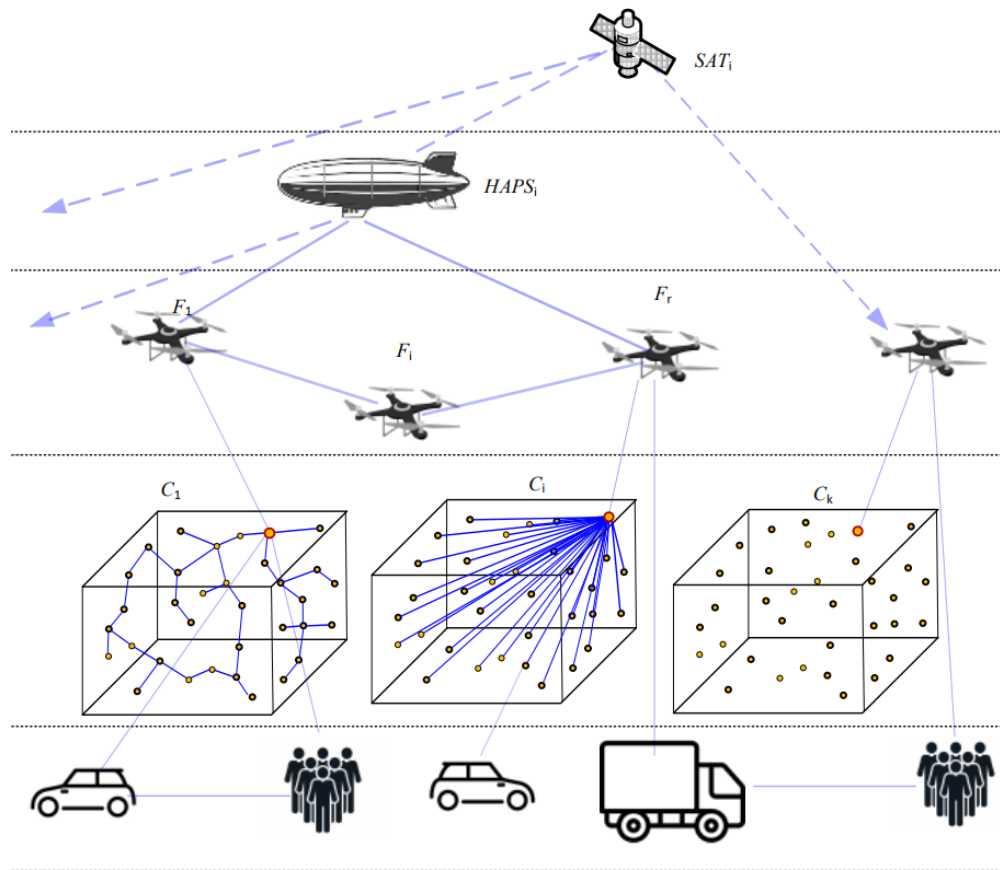


Рисунок 2.1 – Багатошарова просторова мережа речей високої щільності

Для керування такою мережею необхідно вибрати вузли, які виконуватимуть роль шлюзів (головні вузли кластерів). Забезпечення зв'язку між кластерами може бути окремим завданням і для цього можуть бути потрібні додаткові вузли, в якості яких, наприклад, для наземної мережі можуть бути використані вузли, розміщені на БПЛА. Завдання цих додаткових вузлів – забезпечити досяжність зв'язку між вузлами різних кластерів, якщо вони знаходяться на відстані, що перевищує дальність зв'язку.

Необхідність такого рішення залежить від взаємного розташування вузлів кластерів та характеристик засобів забезпечення зв'язку.

Неважко помітити, що кластери можуть бути визначені по-різному. Наведений на рисунку 2.2 приклад демонструє випадок, коли кластери явно виражені і можуть бути легко визначені різними алгоритмами. Однак на практиці така виразність кластерів далеко не завжди має місце. Виділення

кластера можна розглядати як багатокритеріальну завдання оптимізації, точне рішення якої можна отримати лише перебором всіх варіантів, що реалізується практично. Для вирішення завдань кластеризації розроблено багато алгоритмів, які дозволяють отримати раціональні рішення.

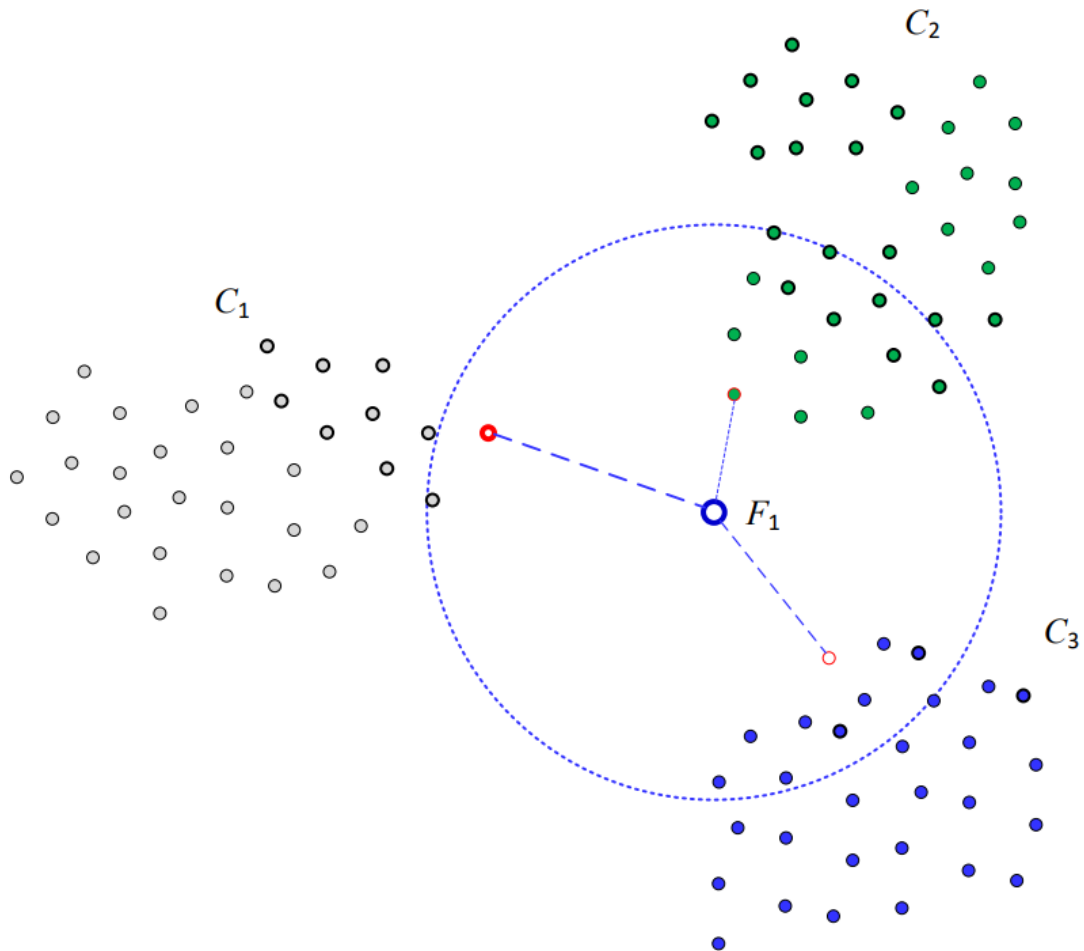


Рисунок 2.2 – Забезпечення зв'язків між кластерами

Розв'язання задачі кластеризації з використанням узагальнюючих відомих алгоритмів може бути складним через велику кількість елементів, що підлягають кластеризації (вузлів мережі). Таким чином, вибір методу кластеризації з урахуванням специфіки простору елементів, що кластеризуються, також є одним із основних завдань побудови мережі Інтернету речей високої щільності.

Розв'язання задач кластеризації залежить від структури мережі. Структура мережі визначається кількістю вузлів мережі та зв'язків між ними. Якщо припустити, що ці вузли однакові, а зв'язок залежить від їх взаємного розміщення, то структура мережі визначається розподілом вузлів у просторі. Очевидно, що цей розподіл може бути різним. Вузли можуть групуватися або бути рівномірно розподілені в просторі. Угрупування вузлів можуть мати однаковий чи різний характер, але слід зазначити, що однозначно описати структуру достатньо складно.

Завдання моделювання тривимірної мережі Інтернету речей високої щільності також є одним з основних завдань опису мереж, що вивчаються. Для моделювання мереж бездротового зв'язку використовують математичні моделі точкових процесів. Більшість таких моделей розроблені для двовимірних випадків, опису різних картографічних елементів і потребують модифікації для випадку тривимірних моделей.

Однією з характеристик геометричних структур є фрактальна розмірність (ФР), що відбиває особливості геометричних фігур. ФР не є універсальною характеристикою, проте дозволяє описати особливості мережі, які не можна описати іншими методами. Застосування ФР як додаткової характеристики може дати можливість підвищити ефективність застосовуваних методів.

Таким чином, в результаті розгляду завдань побудови та моделювання мереж Інтернету речей високої щільності можна зробити висновок про те, що до таких завдань слід віднести:

- завдання кластеризації мережі з урахуванням особливостей мереж у тривимірному просторі та високій щільності пристроїв;
- завдання вибору головних вузлів кластерів та завдання забезпечення зв'язності між кластерами;
- завдання моделювання мережі Інтернету речей високої щільності з використанням тривимірних точкових процесів та з урахуванням фрактальної розмірності простору елементів.

2.2 Методи визначення фрактальної розмірності простору мережних елементів

Фрактальна розмірність – це чисельний показник, що характеризує фрактальні структури чи множини шляхом кількісної оцінки їхньої складності як відношення зміни деталізації до зміни масштабу. Дане поняття використовується для характеристики різних об'єктів, починаючи від абстрактних і закінчуючи практичними явищами, такими як турбулентність, потоки рідини, міська інфраструктура, фізіологія людини, медицина, тенденції ринку, часові лави тощо.

Фрактальна розмірність відрізняється від звичної топологічної розмірності, але може збігатися з нею. Вона збігається з топологічною розмірністю для традиційних геометричних форм. Однак, для фрактальних множин або фігур збігу немає. Якщо теоретична фрактальна розмірність множини перевищує його топологічну розмірність, то вважається, що ця множина має фрактальний характер. Наприклад, якщо розглянути лінії на площині, то для прямих ліній фрактальна розмірність дорівнюватиме одиниці, а для деяких кривих вона буде більше одиниці і менше двох. Таким чином, фрактальною розмірністю можна характеризувати криву. Вона дає уявлення та чисельну оцінку того, наскільки крива відрізняється від прямої або від площини. Якщо вона близька до двох, то це означає, що крива настільки складна, що майже повністю заповнює собою площину.

Вибір способу оцінки фрактальної розмірності залежить від того, яким чином задана мережа зв'язку. Можна уявити провідну мережу, в якій властивості ліній зв'язку в незначній мірі залежать від географічного положення вузлів. У такому разі метрикою, що визначає властивості мережі, будуть метрики, що базуються на властивостях ліній зв'язку. Однак у разі мереж Інтернету речей високої щільності мають місце мережі бездротового зв'язку, у яких просторове взаємне розташування вузлів мережі має значний вплив на показники функціонування. Слід зазначити, що у разі бездротових

мереж, незважаючи на залежність від положення вузлів мережі, отримати дані про їх розташування може бути занадто складним завданням. У цьому випадку мережу доведеться описувати параметрами ліній зв'язку.

Відомі два основні способи оцінки фрактальної розмірності бездротових мереж – це метод підрахунку контейнерів (box-counting) та метод вирощування кластера (cluster growing).

Для реалізації методу підрахунку контейнерів потрібна інформація про розподіл вузлів мережі у просторі, тобто. потрібна інформація про координати вузлів мережі. Метод вирощування кластера зводиться до побудови зв'язного фрагмента мережі (компонента графа, що описує мережу). При цьому достатньо знання лише параметрів (параметра) ліній зв'язку між вузлами мережі, наприклад рівня сигналу або відношення сигнал/шум.

Для моделювання мереж Інтернету речей високої щільності, розміщених у будівлях та спорудах, слід розглядати тривимірні моделі як мережі, так і її оточення. Для моделювання можна використовувати тривимірні фрактали.

Однією з відмінних рис фрактальної мережі є її ієрархічний характер і повторюваність (схожість) структур на різних рівнях ієрархії. У мережі Інтернету речей високої щільності для управління мережею також має створюватися ієрархічна структура, яка може мати кілька рівнів. Структура мережі на одному з рівнів може бути схожа на інші рівні. Це дає підстави припустити, що такі мережі можуть мати фрактальні властивості. Принаймні фрактальна розмірність Інтернету речей високої щільності може бути чисельною характеристикою її структури.

2.3 Методи кластеризації простору мережних елементів

Методи кластеризації досліджують подібні закономірності, приховані у даних. Метою цих методів є пошук оптимального поділу для множини

незалежних об'єктів на групи (кластери) по максимуму «внутрішньо кластерної» подібності та «міжкластерної» відмінності.

Ідентифікація довільних форм, адаптованість до високої розмірності та усунення зашумлених екземплярів – універсальні завдання кластерного аналізу. Проте неоднорідна щільність і слабка пов'язаність елементів впливають на якість кластеризації. Неоднорідна щільність об'єктів призводить до того, що кластер з нерівномірною щільністю може бути розділений на частини, а розріджені кластери легко прийняти за шум (випадкові об'єкти, що не належать до кластерів). Слабка зв'язність призводить до того, що важко визначити сусідні кластери. Хоча розроблені численні методи кластеризації, засновані на різних принципах, цього ще недостатньо для ефективного вирішення багатьох проблем, використовуючи близькість тільки фізичну відстань або щільність.

Кластеризація на основі поділу та на основі з'єднання – це два широко використовувані методи для зв'язування незалежних точок. Кластеризація на основі поділу знаходить центри кластерів і призначає елементи найближчі до них за допомогою вимірювання відстаней. Відомі алгоритми, *k-means* (*k*-середніх) та *k-medoids* (*k*-медіод) знаходять оптимальні центри кластерів, постійно змінюючи центр мас кожного кластера. Однак ці алгоритми не можуть ідентифікувати нееліпсоїдальні кластери і мають низьку стійкість до шуму.

Кластеризація шляхом знаходження піків щільності (*CDP*) покращує стратегію пошуку центрів кластерів на основі уявлення про те, що центри кластерів характеризуються високою щільністю локально. *CDP* дозволяє виявляти кластери довільної форми та шумові елементи, але правило асоціації може призвести до невірного призначення граничних елементів, коли різні кластери, що сильно відрізняються розміром, розташовані близько один до одного.

Кластеризація на основі зв'язності досить точно ідентифікує довільні форми шляхом безперервного агрегування об'єктів в областях з їхньою

високою щільністю із зростанням. Як правило, просторова кластеризація на основі щільності з шумом (DBSCAN) групує кругові околиці зв'язкових об'єктів, щільність яких вища за порогову. Хоча такий підхід зберігає локальні деталі форми кластера, але при цьому можна легко прийняти розріджені кластери як шум і навіть розділити кластер, коли об'єкти розподілені нерівномірно. Алгоритми WaveCluster та CLIQUE наносять вихідні об'єкти на сітку та об'єднують зв'язані чарунки сітки у кластери. З'єднання об'єктів із застосуванням сітки сприяє економії часу, але слабозв'язані кластери можуть бути невірно розділені, крім того, є складнощі з визначенням кластерів з низькою щільністю.

Як підхід для пошуку границь кластерів може бути використаний метод локальної гравітаційної кластеризації (LGCM). Він використовує дві метрики на основі середнього зсуву: центральність (CE) та координатність (CO), щоб виміряти узгодженість між локальними «силами тяжіння» та напрямки середнього зміщення сусідів. Цей метод здатний розрізняти внутрішні та граничні об'єкти кластерів, і формує кластери, поєднуючи граничні та непомічені об'єкти. Проте внутрішні об'єкти в розріджених скупченнях важко виявити, оскільки середній зсув має тенденцію зміщуватися у бік щільних областей. Метрики на основі щільності, такі як Reverse K-Nearest Neighbors (RKN), зазвичай використовуються для виявлення граничних точок кластерів.

На рисунку 2.3 наведено приклади розв'язання задач кластеризації на площині кількома алгоритмами з використанням відомого датасету для кластеризації, наведеного в [5]. Були використані такі алгоритми як k-means, Affinity Propagation, Mean Shift, Spectral Clustering, Ward, Agglomerative Clustering, DBSCAN, HDBSCAN, OPTICS, BIRCH, Gaussian Mixture.

З допомогою цих алгоритмів у програмі, код якої наведений у додатку А, вирішувалися шість прикладів кластеризації:

- приклад 1 – два вкладені кільця об'єктів;
- приклад 2 – два серпоподібні кластери;

- приклад 3 – три кластери різного розміру з різною кількістю та щільністю об'єктів, розташовані поблизу один одного;
- приклад 4 – три кластери у формі еліпса;
- приклад 5 – три компактно розміщені кластери;
- приклад 6 – накопичення об'єктів в одній області.

З рисунку 2.3 бачимо, що жоден з алгоритмів не вирішив всі завдання абсолютно вірно.

Результати розв'язання прикладів кластеризації наведено у таблиці 2.1, в котрій використано такі позначення: «-» – завдання не вирішено, «+» – завдання вирішено, «*» – завдання вирішено частково. Найпростішим завданням була кластеризація компактних кластерів (приклад 5), його виконали всі алгоритми. На рисунку 2.4 наведено ілюстрацію результатів аналізу на кількість правильно вирішених завдань кластеризації.

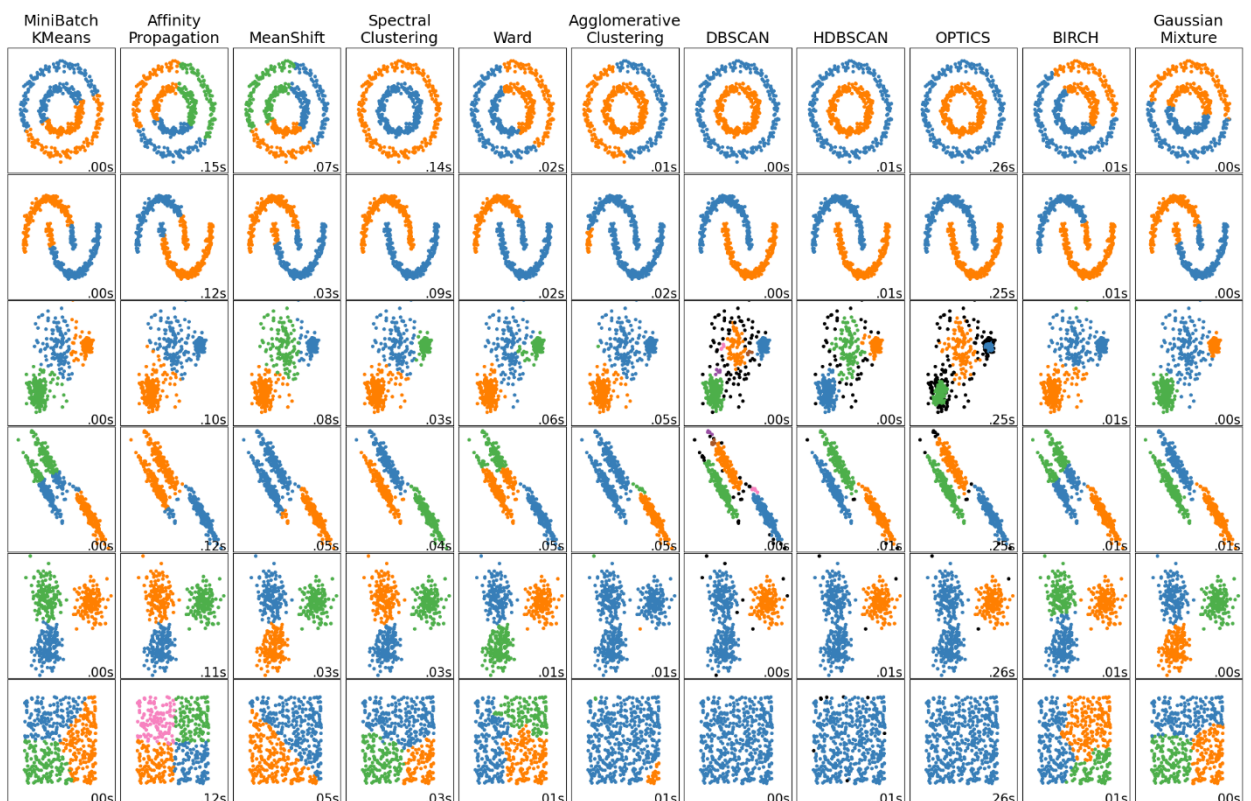


Рисунок 2.3 – Приклади розв'язання задач кластеризації на площині

Таблиця 2.1 – Порівняння алгоритмів

Номер прикладу	Результат розв'язання задачі алгоритмом:										
	k-means	Affinity Propagation	Mean Shift	Spectral Clustering	Ward	Agglomerative Clustering	DBSCAN	HDBSCAN	OPTICS	BIRCH	Gaussian Mixture
1	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-
2	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-
3	*	*	*	+	+	+	-	+	*	-	+
4	-	-	-	+	-	-	+	+	*	-	+
5	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
6	+	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+

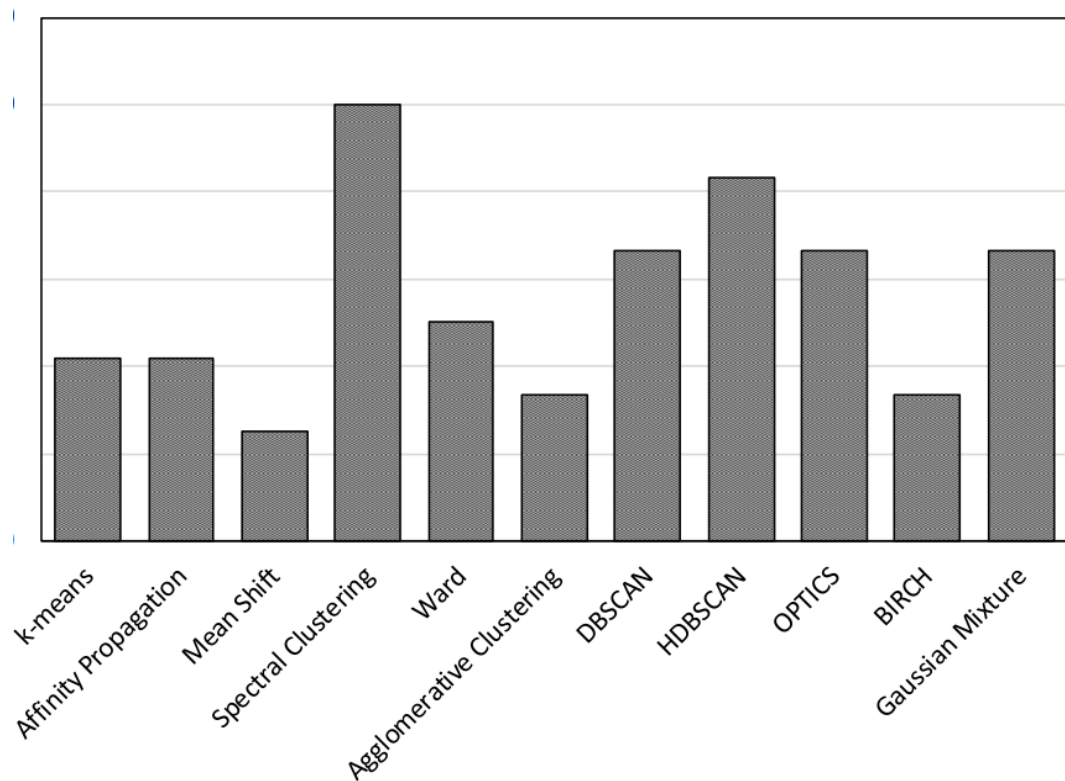


Рисунок 2.4 – Діаграма вірно вирішених завдань кластеризації

Найскладнішими були завдання кластеризації кластерів у формі вкладених кілець (приклад 1), серпоподібних кластерів (приклад 2), їх

вирішили чотири алгоритми Spectral Clustering, DBSCAN, HDBSCAN та OPTICS.

Наступний за складністю був приклад 3 (три кластери різного розміру з різною кількістю та щільністю об'єктів), його також правильно вирішили чотири алгоритми, але ще чотири алгоритми прийняли рішення, близьке до правильного рішення.

Приклад 6 також виявився досить складним, оскільки кластери у ньому складно помітити.

Лідером з алгоритмів по можливості розв'язання даних прикладів можна виділити спектральний алгоритм (Spectral Clustering), він вирішив більшу частку поставлених завдань.

У таблиці 2.2 наведено дані про час, витрачений для вирішення даних задач. Завдання (Додаток А) вирішувалися на комп'ютері з процесором Intel i7 12700K, 32 Гб оперативної пам'яті. Порівняння було реалізовано за допомогою бібліотеки scikit-learn мовою Python, при кластеризації по 2000 об'єктів датасету [5], аналогічних за структурою для кожного із 6 прикладів (таблиця 2.3).

Як видно з таблиці 2.2, найбільш швидкими алгоритмами є DBSCAN, BIRCH і Gaussian Mixture, а найбільш повільним Affinity Propagation.

З таблиці видно значний розкид часу розв'язання задач, причому він залежить як від завдання, так і від обраного алгоритму. Як видно, найуспішніший за розв'язанням задач спектральний алгоритм більше ніж від 19 до 99 разів за часом поступається алгоритму DBSCAN у частині задач, що вирішуються обома алгоритмами.

Таблиця 2.2 – Порівняння алгоритмів

Номер прикладу	Результат розв'язання задачі алгоритмом:										
	k-means	Affinity Propagation	Mean Shift	Spectral Clustering	Ward	Agglomerative Clustering	DBSCAN	HDBSCAN	OPTICS	BIRCH	Gaussian Mixture
1	0,34	2,09	0,06	0,74	0,04	0,03	0,01	0,02	0,46	0,01	0,01
2	0,03	5,37	0,03	0,99	0,04	0,03	0,01	0,02	0,44	0,01	0,00
3	0,03	1,93	0,10	0,19	0,27	0,22	0,01	0,02	0,44	0,01	0,01
4	0,05	1,87	0,04	0,34	0,34	0,31	0,01	0,02	0,43	0,01	0,01
5	0,04	1,78	0,03	0,29	0,04	0,03	0,02	0,02	0,43	0,01	0,00
6	0,05	1,92	0,04	0,21	0,05	0,02	0,01	0,03	0,43	0,01	0,00
S	0,11	2,49	0,05	0,46	0,13	0,11	0,01	0,02	0,44	0,01	0,01

На рисунку 2.5 наведено ілюстрацію результатів оцінки середнього значення часу розв'язання задач кластеризації.

Також варто зазначити, що абсолютна величина часу розв'язання задач кластеризації відносно високо. При реалізації алгоритмів на мікроконтролерах, обчислювальні можливості яких можуть бути нижчими, приблизно на два порядки, час обчислення в ряді випадків може перевищити десятки секунд, а з урахуванням меншого обсягу оперативної пам'яті, що є специфікою комутаційних вузлів, воно може бути значно більшим.

Застосовність проаналізованих алгоритмів на вирішення завдань в мережах Інтернету речей високої щільності слід розглянути як з погляду їх обчислювальної складності, так і з погляду достатності вихідних даних.

З погляду обчислювальної складності найбільший інтерес представляють найменш «складні» алгоритми, що мають мінімальний час вирішення завдань, наприклад, такі як DBSCAN, BIRCH, Gaussian Mixture. З урахуванням можливостей кластеризації

Як видно з таблиці 2.2, найбільш швидкими алгоритмами є DBSCAN, BIRCH і Gaussian Mixture, а найбільш повільним Affinity Propagation.

З таблиці видно значний розкид часу розв'язання задач, причому він залежить як від завдання, так і від обраного алгоритму. Як видно, найуспішніший за розв'язанням задач спектральний алгоритм більше ніж від 19 до 99 разів за часом поступається алгоритму DBSCAN у частині задач, що вирішуються обома алгоритмами.

У таблиці 2.1 пропонує такі алгоритми як DBSCAN і Gaussian Mixture. Також слід зауважити, що для вирішення цих завдань потрібні вихідні дані про положення (локалізацію) вузлів мережі.

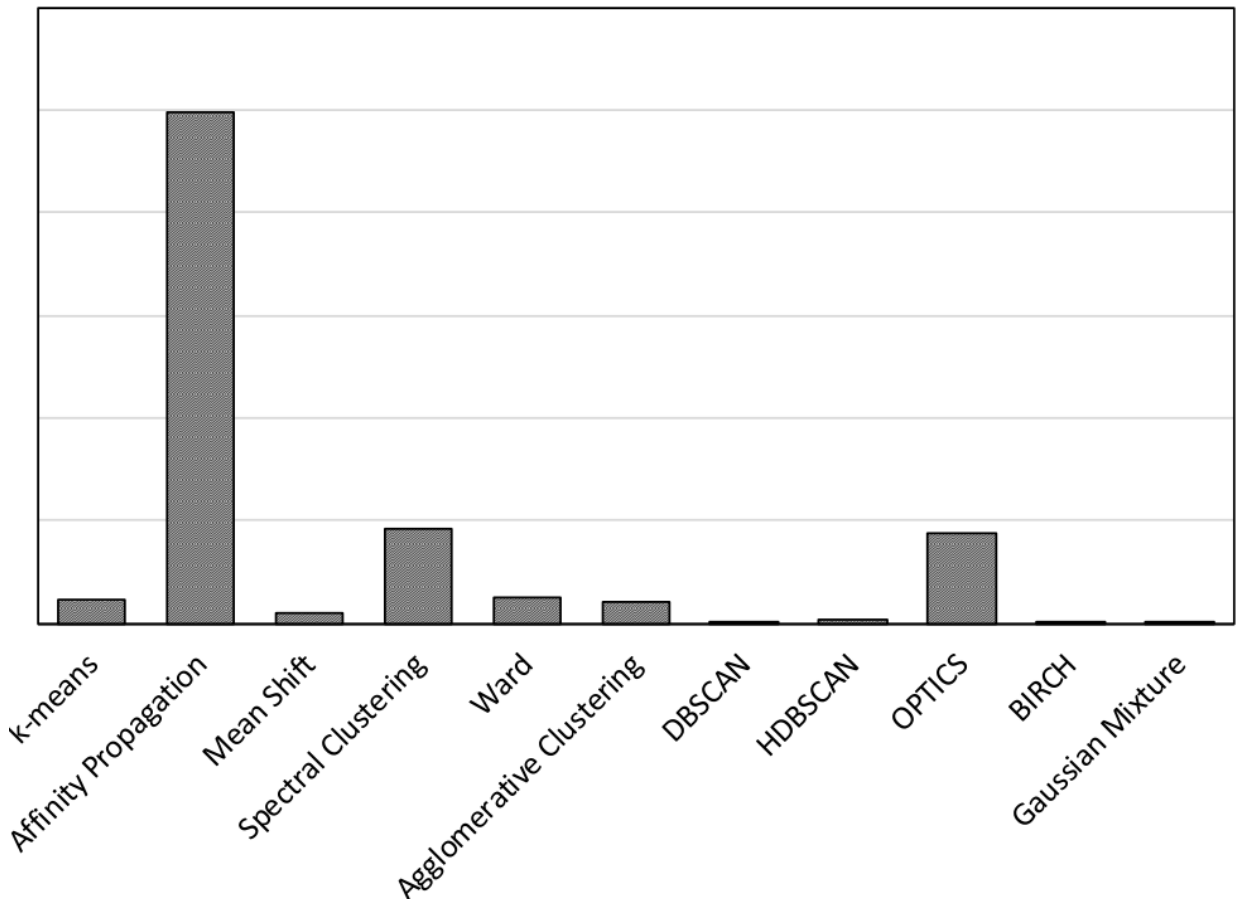


Рисунок 2.5 – Середній час розв'язання задач кластеризації

Також слід зауважити, що дані алгоритми засновані на загальних принципах кластеризації за деякою метрикою, що базується на відстані або деякому показнику якості. Для вирішення завдань кластеризації в мережі Інтернету речей високої щільності бажано враховувати особливості, характерні саме для мережі зв'язку. Як таку особливість може бути зв'язність, тобто. можливість встановлення з'єднання між вузлами мережі.

Далі буде наведено метод кластеризації, реалізований з урахуванням даної можливості.

3 ОРГАНІЗАЦІЯ МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ

3.1 Моделювання структури мережі Інтернету речей високої щільності з використанням фрактальної розмірності простору елементів

Методи теорії фракталів дозволяють отримати чисельні оцінки, що характеризують структуру мережі. Це надзвичайно корисно в задачах планування, оскільки чисельні характеристики дозволяють робити порівняння і дають розуміння, наприклад, які методи маршрутизації трафіку слід застосувати в тій чи іншій мережі.

Вважатимемо, що мережа складається з n вузлів, а дальність зв'язку вузла становить r . Найчастіше, при організації мережі в певній будові дальність зв'язку вузлів обмежена не тільки відстанню, а й перешкодами на шляху розповсюдження сигналу, такими як стіни, міжповерхові перекриття, шахти ліфтів тощо. Тому розподіл вузлів у таких випадках є нерівномірним, а вузли утворюють кластери, розмір яких залежить від особливостей будови. Приклад на рисунку 3.1 демонструє можливий варіант розміщення вузлів.

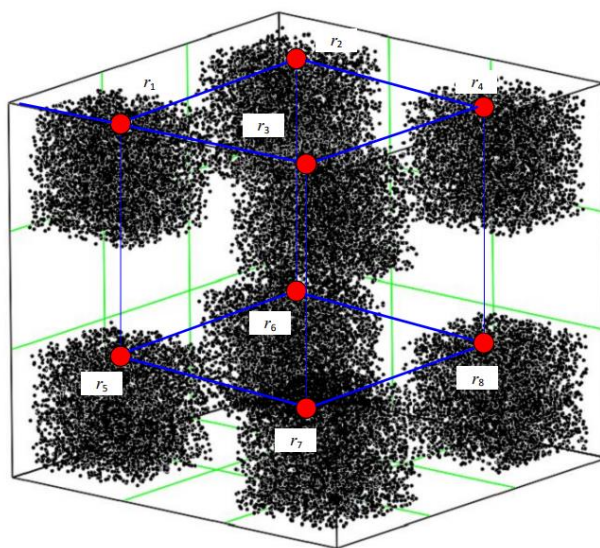


Рисунок 2.6 – Приклад розміщення вузлів мережі Інтернету речей високої щільності у тривимірному просторі

Забезпечення зв'язності кластерів може здійснюватися як з використанням бездротової технології, яка відрізняється від тієї, яка використовується для зв'язку всередині кластера, так і з використанням провідних технологій. В останньому випадку виділяється головний вузол кластера, який є шлюзом із провідною мережею. Зазвичай такі вузли відрізняються наявністю мережного живлення (необмеженого запасу енергії), а мережа з їх використанням називається інфраструктурною. На рисунку 3.1 наведено можливий варіант розподілу інфраструктурних вузлів у мережі (інфраструктурні вузли виділені червоним кольором).

Основним завданням побудови мережі є виділення кластерів серед великої кількості вузлів. Кластери можуть мати різну форму, наприклад, яка залежить від форми приміщення, а також щільності розподілу вузлів у них.

Будемо характеризувати структуру мережі за допомогою значення фрактальної розмірності (ФР). Можна виділити два методи оцінки ФР для мережі: метод підрахунку «контейнерів» (BC, *box-counting*) та метод вирощування кластера (CG, *cluster-growth*). Метод BC полягає у циклічному підрахунку кількості «контейнерів», що містять елементи мережі при поетапному зменшенні розміру «контейнеру», рисунку 3.2,а.

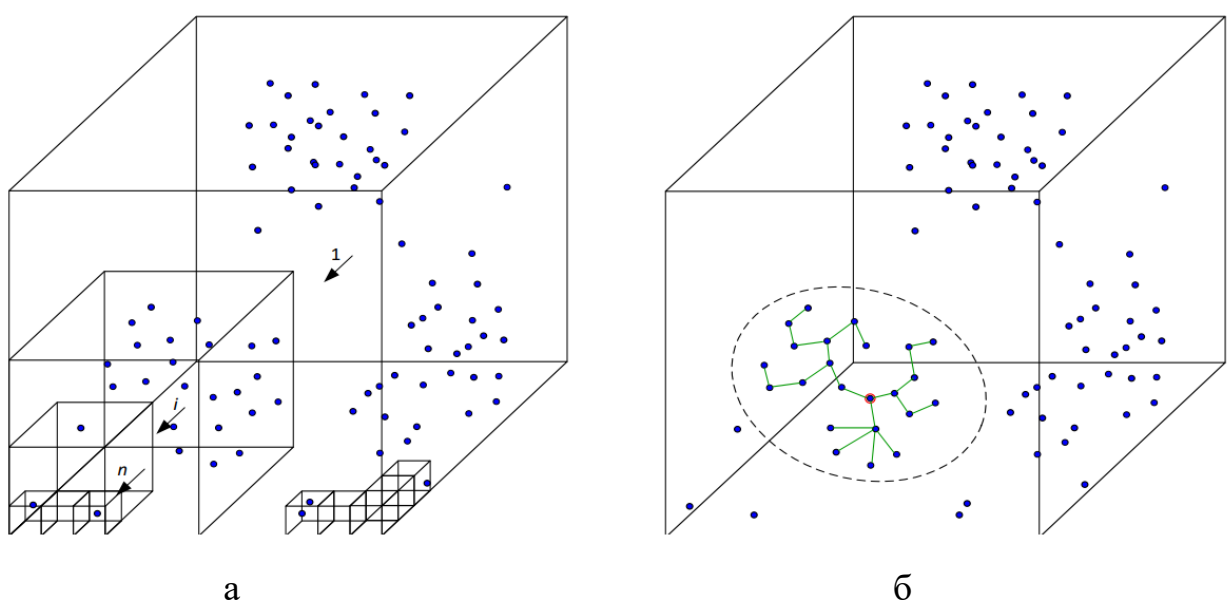


Рисунок 3.2 – Приклад оцінки фрактальної розмірності мережі

Залежність N_r (кількості m -мірних сфер радіусу r , що містять елементи мережі) від розміру «ящика» має логарифмічний характер та апроксимується виразом

$$\lg N_r = d_f \cdot \lg \frac{1}{r}, \quad (3.1)$$

де d_f – фрактальна розмірність множини елементів.

При використанні методу С G, рисунку 3.2, б, вибирається випадковий вузол мережі, визначається максимальна довжина зв'язку r та будується кластер з вузлів, що знаходяться в досяжності, тобто на відстані d , яка не перевищує r). Надалі r збільшується, причому розмір кластера також збільшується. У цьому випадку M_r – це маса кластера, що дорівнює кількості вузлів мережі ньому.

Залежність M_r від r має такий вигляд:

$$\lg M_r = d_f \cdot \lg r. \quad (3.2)$$

Ці методи схожі за механізмом оцінки фрактальної розмірності, проте метод ВС оперує розмірами області розміщення вузлів і вимагає певної їхньої геометричної прив'язки, а метод С G оперує лише відстанню між вузлами. Слід зауважити, що відстань можна замінити і іншою метрикою, наприклад, величиною загасання сигналу або метрикою, отриманої на основі рівня потужності сигналу або відношення сигнал/шум, що може бути зручно при розгляді бездротової мережі.

З погляду аналізу мережі зв'язку метод С G дозволяє зробити його доступнішими засобами. Розглянутий у цьому методі кластер характеризує зв'язність мережі, а процес зміни його розміру зі зміною метрики r характеризує зміну її зв'язності. Процес зміни зв'язності також характеризує і фрактальна розмірність, тому що згідно виразів (3.1) та (3.2) вона визначається характером цієї залежності. За характером зміни цих

залежностей можна будувати висновки щодо структури мережі. Наприклад, близька до лінійного характеру зміна притаманна процесу зростання мережі у межах області, виділеної як кластер. Різка зміна відповідає фазовому переходу до зв'язного стану. На рисунку 3.3 наведено ілюстрацію процесу «вироснування кластера» в мережі з 500 вузлів. Для наочності наведена не ізометрична проекція, а двовимірне зображення, отримане як проекція вузлів мережі на горизонтальну площину.

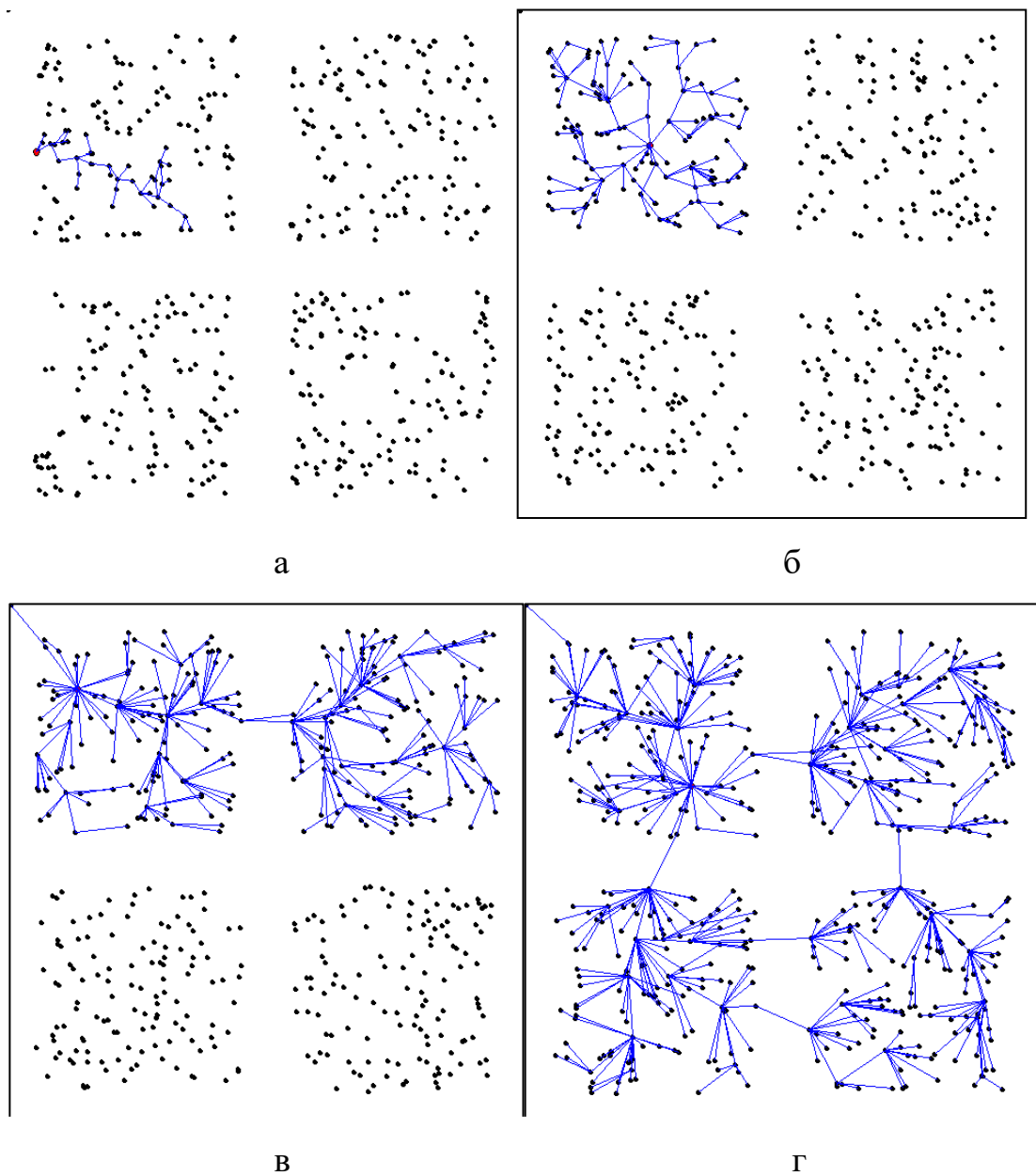


Рисунок 3.3 – Приклад процесу «вироснування кластера»
у мережі Інтернету речей високої щільності

На рисунку 2.8, а наведено початкову мережу на першій стадії вирощування кластера, на рисунку 2.8, б – 2.8, г наведені різні наступні стадії розвитку процесу вирощування. Ці стадії доцільно зіставити з графіком залежності кількості вузлів мережі Інтернету речей високої щільності від величини r , наведеному на рисунку 3.4.

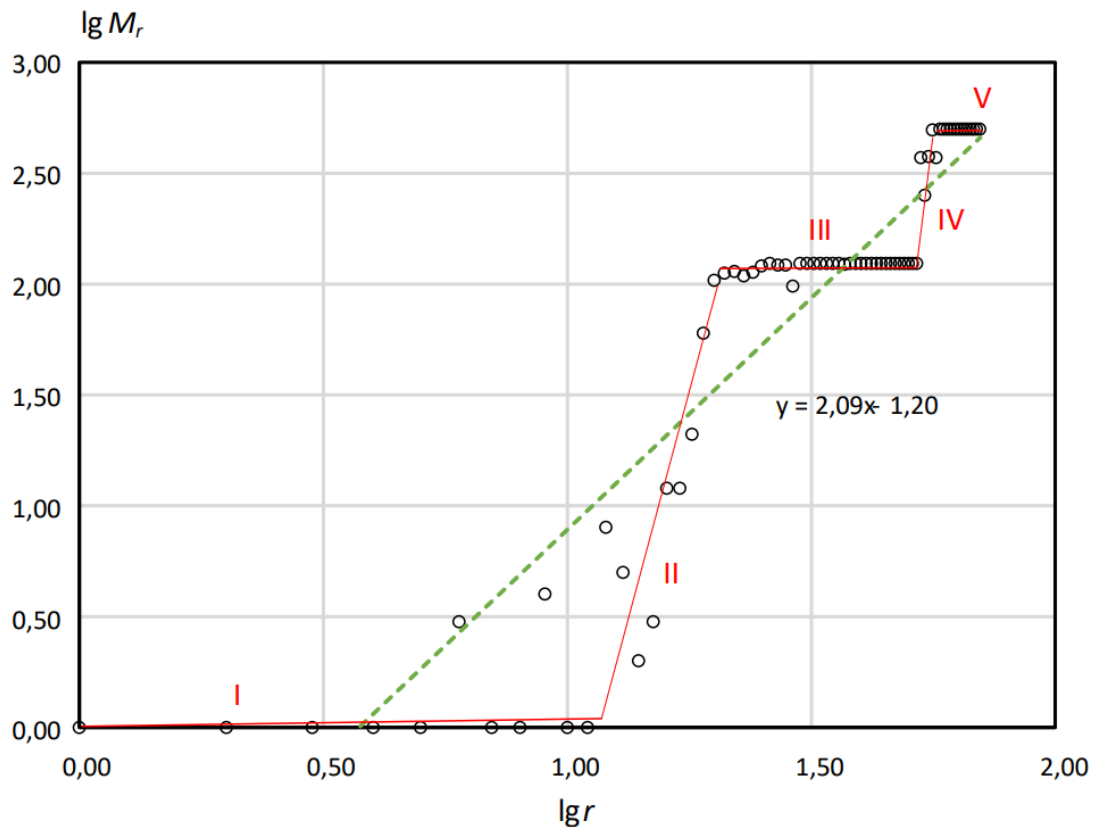


Рисунок 3.4 – Залежність кількості вузлів від величини r

На рисунку 3.4 наведено дані, одержані методами вирощування кластера. На отриманому графіку виділено 5 ділянок, у межах яких побудовано кусочно-лінійну апроксимацію (червона лінія). Усі отримані дані апроксимовані лінійною залежністю (зелена пунктирна лінія). Розглядаючи наведений графік, можна виділити 5 характерних ділянок, що позначені цифрами від I до V. На початковому етапі (ділянка I), що відповідає рисунку 3.3, а, відбувається повільне зростання мережі в межах однієї групи вузлів. Ділянка II відповідає переходу групи вузлів у стан повної зв'язності, що

відповідає рисунку 3.3, б. На ділянці ІІІ, у цьому прикладі, зростання обсягу мережі немає. На ділянці І V відбувається інтенсивне зростання обсягу мережі через приєднання інших кластерів, що відповідає рисунку 3.3, в і 3.4 г. На ділянці V обсяг мережі знову не змінюється, тому що мережа повністю зв'язна. Прямі пунктирні лінії зеленого кольору описують фрактальну розмірність мережі, її нахил дає значення фрактальної розмірності d_f приблизно рівною 2,09, тобто щільність елементів для даного прикладу вже не дозволяє плоску апроксимацію.

Якщо розглянути ділянки ІІ і І V окремо, то коефіцієнт нахилу апроксимуючої прямої для них становить приблизно 10,70 та 10,50 відповідно. Ці ділянки відповідають фазовому переходу структури у зв'язний стан.

Наведений аналіз показує, що зміни кількості вузлів у кластері (розмір мережі) дозволяє зробити висновок про локалізацію кластера відповідно до зміни характеру залежності. У наведеному на рисунку 3.4 прикладі ділянка ІІ І свідчить про локалізацію першого кластера. Протяжність цієї ділянки залежить від відстані між кластерами. Таким чином, описаний метод оцінки фрактальної розмірності мережі Інтернету речей високої щільності можна застосувати для її подальшої кластеризації.

3.2 Метод кластеризації мережі Інтернету речей високої щільності

Наведений вище аналіз показує можливість використання методу оцінки фрактальної розмірності для кластеризації мережі. Принцип запропонованого методу полягає у вирощуванні кластера та контролю приросту кількості вузлів. Зменшення приросту кількості вузлів до досить малої величини свідчить про виділення першого кластера. Усі зв'язні вузли позначаються як вузли першого кластера і виключаються з подальшого розгляду. Далі процес циклічно повторюється з випадкової позиції до моменту локалізації наступного кластера. Процес локалізації кластерів

повторюється, доки всі вузли в заданій області не будуть приписані до своїх кластерів.

Алгоритм методу кластеризації наведено на рисунку 3.5, де вхідна мережа описана матрицею $\mathbf{D}$ розміру $n \times n$:

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ \dots & d_{ij} & \dots \\ d_{n1} & \dots & d_{nn} \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

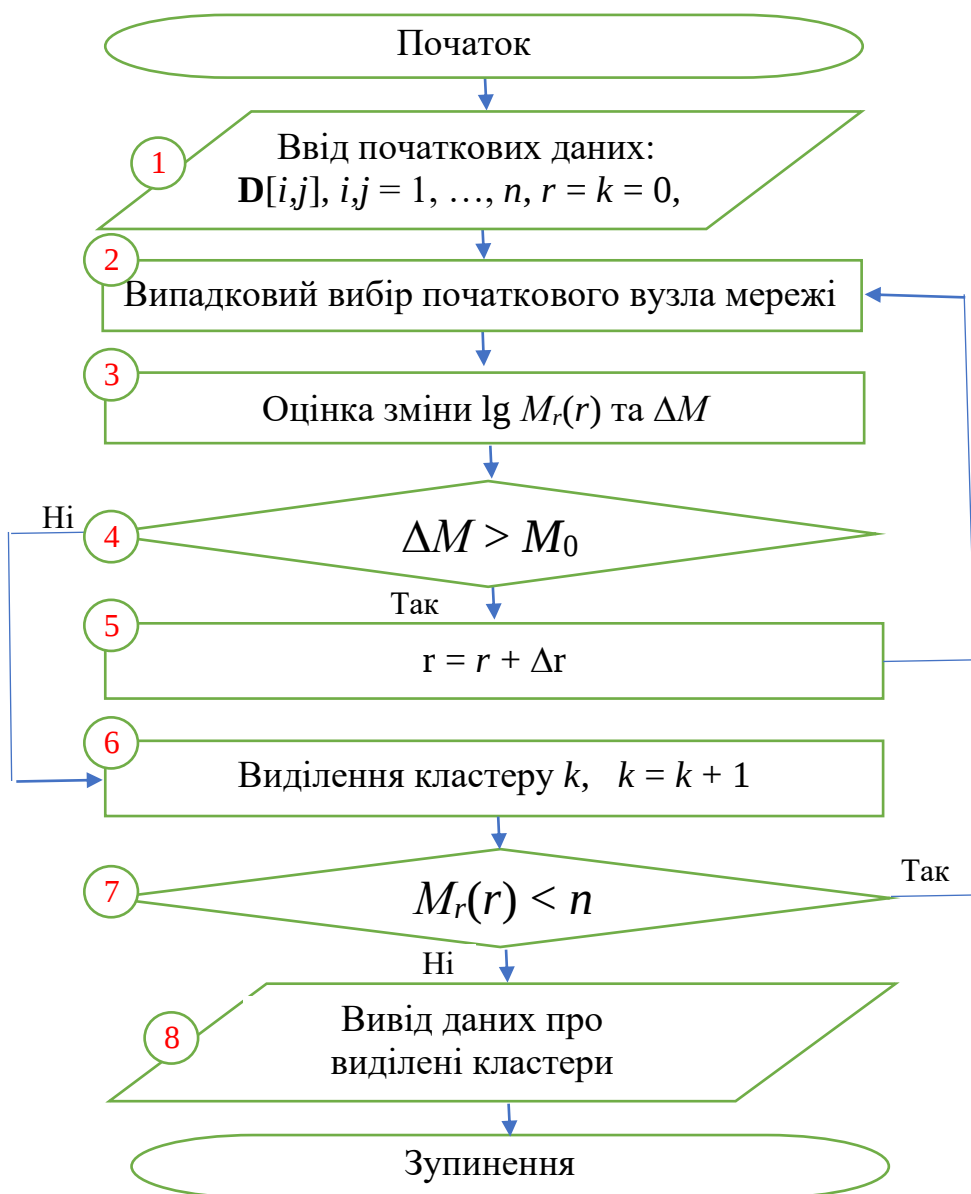


Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритму методу кластеризації мережі Інтернету речей високої щільності

Елементи матриці d_{ij} є метрикою, що характеризує досяжність вузла j з вузла i . Як було зазначено вище, така метрика може бути відстанню або іншою метрикою, отриманою на основі рівня потужності сигналу або відношення сигнал/шум, згасання. Якщо d_{ij} це відстань, то для мережі, розміщеної в тривимірному просторі, вона може бути обчислено як

$$d_{ij}^{(D)} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \quad (3.2)$$

де $x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j$ – координати вузлів i і j відповідно в тривимірному просторі.

Вибір метрики відбивається на правилах формування кластера, використовуваному методом C G. Кластер формується, починаючи з випадкового стартового вузла, приєднанням нових вузлів, якщо значення метрики (відстань) до вузла, що належить кластеру, трохи більше r . Побудова кластера може бути реалізована пошуком у глибину. Розмір Δr є збільшенням r при побудові залежності розміру мережі від величини метрики, вона підбирається емпірично.

Вхідними даними (крок 1) для даного алгоритму є такі:

- дані про кількість вузлів мережі n ;
- матриця D , що містить значення метрики;
- величина зміни кроку Δr ;
- лічильник числа кластерів k .

Далі (крок 2) випадковим чином вибирається вузол, який використовується як стартовий для наступного кроку алгоритму.

На наступному кроці виконується побудова кластера з поточною величиною метрики r . Результатом є логарифм кількості вузлів у побудованому кластері, яке може набувати значень від 0 до $\lg n$. Також проводиться оцінка зміни кількості вузлів у кластері порівняно з попереднім циклом. Зміна є випадковою, а її величина залежить від Δr і розподілу

метрики в матриці R , тому прийняття рішення на наступному кроці 4 про те, що приріст розміру мережі є малим, робиться за декількома послідовними результатами.

На кроці 4 приймається рішення про виділення кластера або подальше продовження його локалізації. Кластер виділяється, якщо приріст розміру мережі не перевищує величини M_0 , інакше значення метрики збільшується на величину Δr (крок 6) і процес повертається до кроку 2.

Якщо критерій виконується, то на кроці 6 проводиться виділення вузлів локалізованого кластера та виключення їх із подальшого розгляду. Кількість локалізованих кластерів k зростає на одиницю. На наступному кроці проводиться перевірка кількості вузлів мережі, не віднесених до одного кластеру, якщо вона не нульова, то процес виділення кластерів повторюється, тобто проводиться перехід до кроку 2.

В іншому випадку процес кластеризації завершено, на кроці 8 здійснюється висновок щодо результатів кластеризації і алгоритм завершує цикл проведення кластеризації.

Порівняння запропонованого алгоритму з алгоритмами F O R E L, k -середніх та DBS C A N за вимогами до вхідних даних при кластеризації мережі Інтернету речей високої щільності наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Порівняння алгоритмів кластеризації

Алгоритм	Необхідність завдання параметрів		
	Кількість кластерів	Розмір кластера	Щільність вузлів в кластері
FOREL	-	+	-
k -середніх	+	-	-
DBSCAN	-	-	+
Запропонований алгоритм	-	-	-

З наведеної таблиці видно, що запропонований алгоритм вимагає найменшої кількості вихідних даних, що дозволяє його застосовувати у

випадках з невідомою кількістю кластерів, їх розмірів та форми, а також за різної щільності вузлів у кластерах. Найбільш близьким із наведених алгоритмів можна вважати DBSCAN, проте для застосування в умовах різної щільності вузлів в кластерах потрібна його модифікація.

До недоліків запропонованого алгоритму слід віднести необхідність наявності чіткої межі між кластерами з малою щільністю вузлів. Така межа, як правило, має місце в будівлях та спорудах у вигляді стін та міжповерхових перекриттів, які вносять істотне згасання при розповсюдженні радіосигналу. Цей метод може знайти застосування у задачах побудови мереж Інтернету речей високої щільності в тривимірних об'єктах.

Частка помилки (у відсотках)

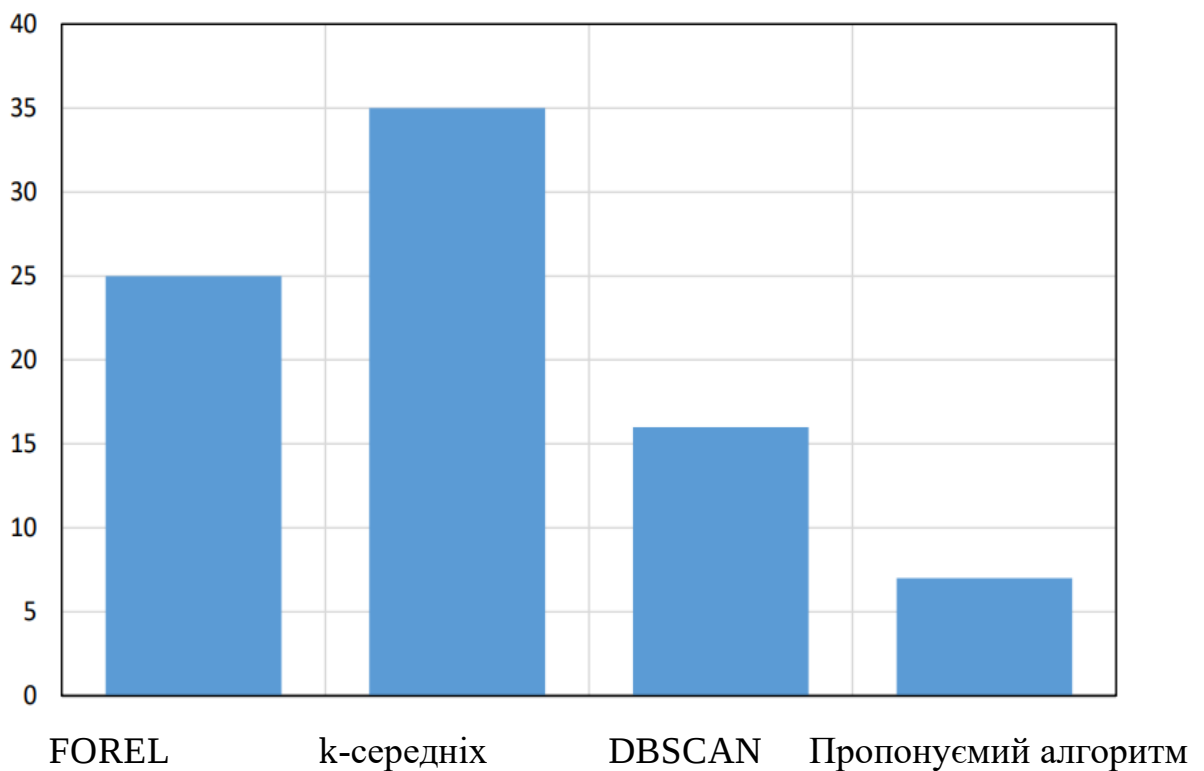


Рисунок 3.6 – Порівняння алгоритмів кластеризації

Для порівняльного аналізу алгоритмів було обрано кілька тестових прикладів, у яких задавалися різні групи вузлів, що відрізняються формою, розподілом вузлів та щільністю. Для їхнього чисельного порівняння підраховувалась кількість помилок кластеризації. Під рішенням завдання

кластеризації розумілося виділення (кластеризація) заданих груп вузлів, а під помилкою розумілося віднесення вузлів однієї групи до різних кластерів. На рисунку 3.6 наведені чисельні оцінки, розраховані як частка помилок кластеризації.

Слід зазначити, що з огляду на те, що для алгоритмів FOREL і k -середніх слід задавати вхідні дані, такі як розмір кластера та кількість кластерів, то частка помилок для них отримана усередненням результатів при випадковому виборі кількості кластерів та їх розміру.

Отримані результати демонструють виграш запропонованого алгоритму в середньому на 18%.

3.3 Вибір головних вузлів у мережі Інтернету речей високої щільності

3.3.1 Структура Інтернету речей високої щільності

Традиційно виділяють три такі основні типи структури мережі Інтернету речей – це структура зірки (рисунку 3.7, а), деревоподібна структура (рисунку 3.7, б) та ad hoc (mesh), рисунку 3.7, в.

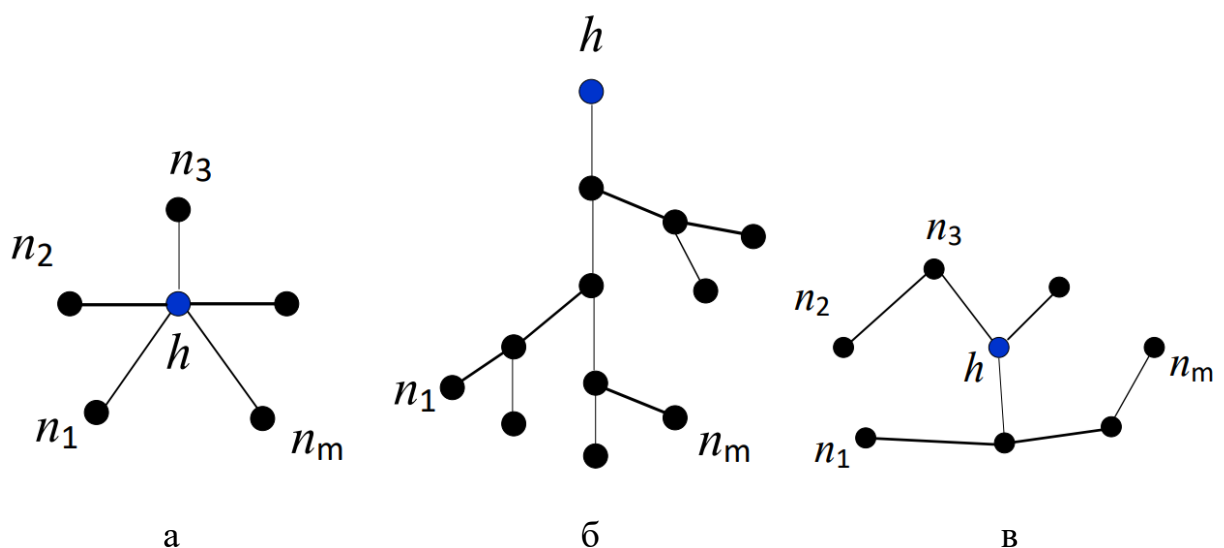


Рисунок 3.7 – Типові структури мережі Інтернету речей

Структура зірки найпростіша з погляду реалізації, але її можливості обмежені дальністю зв'язку вузла.

Найбільш гнучкою є структура зв'язаної мережі, тобто. *ad hoc*. У цій структурі вузли мережі можуть виконувати функції транзиту повідомлень і можуть бути збудовані різні маршрути. Це дає можливість значно розширити зону обслуговування мережі, оскільки вона не обмежена дальністю зв'язку. Однак практичні обмеження все ж таки є, так як занадто велика довжина маршруту (велика кількість транзитних ділянок) призводить до зростання затримки доставлення та зниження швидкості передачі і зростання ймовірності втрат.

До того ж при рухомих вузлах протяжний маршрут з більшою ймовірністю зруйнується, ніж короткий. Значну складність створює велика кількість вузлів мережі, оскільки це безпосередньо впливає на обчислювальну складність завдань, які вирішуються при управлінні мережею.

Для спрощення завдань управління доцільно проводити кластеризацію мережі, тобто. поділ усієї множини вузлів на групи (кластери), в яких виділяється один вузол, який називають головним вузлом (ГВ).

Усі вузли кластера передають дані лише через ГВ. Таке рішення спрощує управління мережею, оскільки багато завдань можуть вирішуватися лише на рівні окремих кластерів, які мають у своєму складі значно менше вузлів, і лише на рівні головних вузлів проводиться обмін з іншими кластерами. Така структура у багатьох випадках є багаторівневою.

Головні вузли кластерів виконують більше роботи з передачі трафіку, ніж елементи кластерів і витрачають набагато більше енергії. У разі, коли при побудові мережі можна використовувати стаціонарні (нерухомі) вузли, що мають мережне живлення (або батареїне), їх зручно використовувати як ГВ, в такому випадку говорять про інфраструктурні мережі. В іншому випадку використовують різні алгоритми вибору та періодичної заміни ГВ з метою економії витрати енергії.

У кожному випадку ГВ є критично важливим елементом мережі, оскільки він обслуговує кілька маршрутів передачі.

Вибір ГВ впливає на обслуговування трафіку. Зокрема, якщо розміри кластера перевищують дальність зв'язку вузлів, то ньому також необхідно створювати маршрути. Тоді вибір ГВ має бути таким, щоб забезпечити, по можливості, близькі умови для всіх елементів кластера або гарантувати найменшу якість обслуговування.

На рисунку 3.8 наведено приклад багаторівневої кластеризації мережі Інтернету речей з головними вузлами.

На нижньому рівні створюються кластери з кінцевих вузлів мережі, наступний рівень складають головні вузли цих кластерів. Теоретично рівнів кластеризації може бути доволі багато. Практично їх кількість обмежена тільки можливостями ГВ, які повинні обслуговувати велику кількість вузлів на підлеглих рівнях.

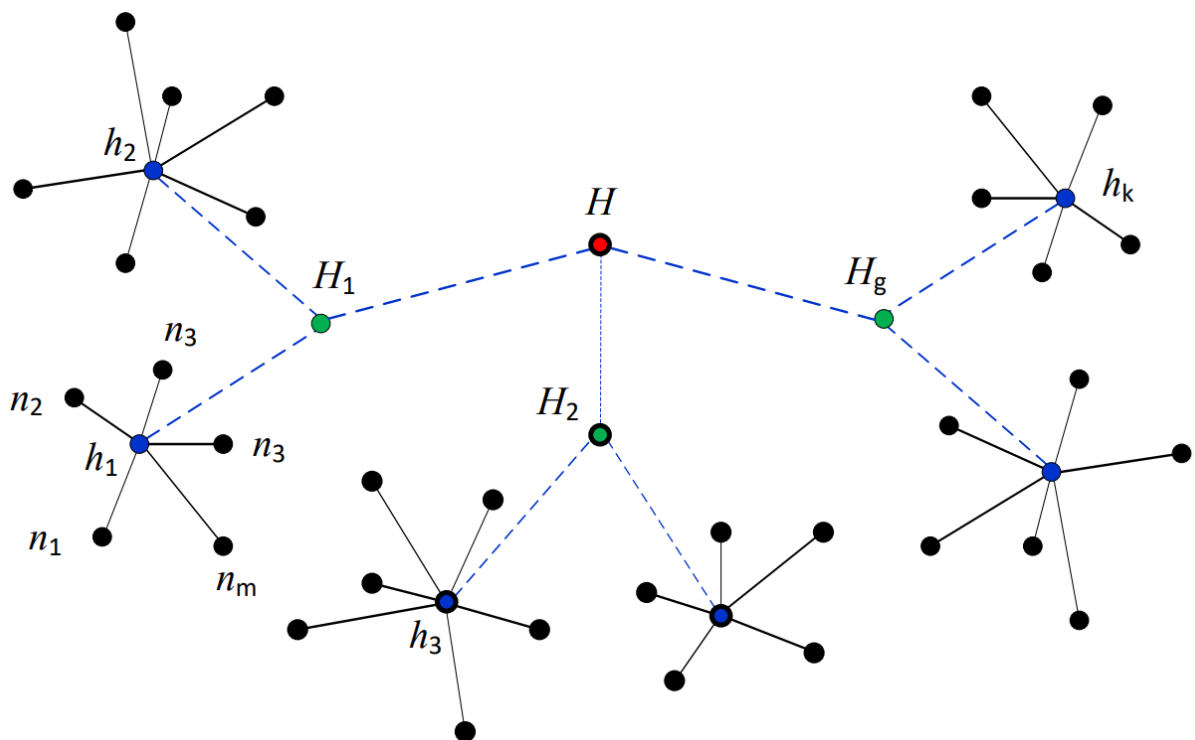


Рисунок 3.7 – Багаторівнева кластеризація

3.3.2 Завдання вибору головних вузлів

Вибори головного вузла кластера – це процес вибору вузла всередині кластера, що відіграє роль провідного вузла. ГВ кластера зберігає інформацію, що стосується його кластера. Ця інформація включає список вузлів в кластері і шлях до кожного вузлу.

Обов'язок ГВ полягає у тому, щоб підтримувати зв'язок з усіма вузлами власного кластера. Однак ГВ повинен мати можливість спілкуватися і з вузлами інших кластерів, які можуть бути пов'язані безпосередньо або через відповідний ГВ, або через шлюзи. Зв'язок здійснюється у три етапи:

- по-перше, ГВ кластера отримують дані, відправлені його членами,
- по-друге, він може стискати дані;
- по-третє, він може передавати дані на шлюз або інший ГВ.

Правильно обраний ГУ може знизити споживання енергії та збільшити термін служби мережі.

Вибір конкретного вузла як головного вузла кластера – дуже важлива, але складна робота. Можна враховувати різні фактори для вибору найкращого вузла як ГВ кластера. Фактори вибору включають розташування вузла по відношенню до інших вузлів, рухливість, енергію, безпеку та пропускну здатність вузла.

Дуже часто вузли безпроводної сенсорної мережі мають обмежений запас енергії та ресурсів. Процес вибору збільшує загальні витрати мережі. Таким чином, процес вибору також має враховувати обмеження щодо обробки та енергоспоживання вузлів.

Усі методи вибору ГВ мають деякі спільні риси, наприклад, вони можуть враховувати запас енергії, рухливість вузла тощо.

Оскільки мережа не управляє стаціонарною інфраструктурою, вона стикається з низкою проблем, таких як:

- часті відключення каналів,
- приховані вузли,

- зміна топології через рухливість,
- більше перешкод і обмежена пропускна здатність через загальне середовище поширення,
- високе енергоспоживання на мобільних пристроях.

Всі функції мережі, такі як формування топології мережі, множинний доступ і маршрутизація даних по найбільш відповідних шляхах, повинні виконуватися розподіленим чином. Ці завдання особливо складні через обмежену смугу пропускання, запропоновану в бездротовому каналі.

Мережі Інтернету речей часто працюють без підтримки будь-якої фіксованої інфраструктури або централізованого адміністрування (тобто мережі без інфраструктури) і є такими, що повністю самоорганізуються і самоконфігуруються.

Слід відзначити, що можливе і використання інфраструктурних елементів, в такому випадку мережа буде гібридною або інфраструктурною. Такій мережі характерні властивості як мережі ad hoc, так і мережі з жорсткою інфраструктурою.

Наявність інфраструктурних елементів дозволяє суттєво підвищити функціональні можливості мережі.

В одноранговій мережі всі вузли мережі з'єднуються динамічно і довільним чином, утворюючи мережу, залежно від їхньої дальності зв'язку та положення. Вузли можуть безпосередньо зв'язуватися з усіма вузлами в межах дальності зв'язку. Оскільки є обмеження дальності зв'язку, два вузли можуть не мати можливості спілкуватися безпосередньо, і вони повинні покладатися на інші вузли для пересилання своїх пакетів.

У Інтернеті речей можуть розглядатися різні типи однорангових мереж, такі як мобільна однорангова мережа (MANET), бездротова мережа (WMN), бездротові сенсорні мережі (WSN) і автомобільні однорангові мережі (VANET) і т.д.

Зокрема, при проектуванні однорангової мережі важливу роль мають можливості та обмеження, які фізичний рівень накладає на продуктивність

мережі. Кожен із вузлів має бездротовий інтерфейс та обмінюється даними один з іншими вузлами з використанням радіозв'язку або іншої бездротової технології. Портативні комп'ютери та персональні цифрові помічники, які безпосередньо взаємодіють один з одним, є одними з прикладів вузлів в одноранговій мережі. Вузли в одноранговій мережі часто є мобільними, але можуть також складатися зі стаціонарних вузлів, таких як точки доступу в Інтернет.

Ad-hoc мережа не використовує жодного централізованого адміністрування. Це робиться для того, щоб мережа не зруйнувалася лише тому, що один із мобільних вузлів виходить із зони дії передавача інших. Вузли повинні мати можливість входити/виходити з мережі на власний розсуд. Через обмеження дальності передачі вузлів може знадобитися кілька переходів задля досягнення інших вузлів.

Кожен вузол, який бажає брати участь у мережі ad hoc, повинен бути готовий пересилати пакети іншим вузлам, тобто. виконувати функції транзиту. Таким чином, кожен вузол може діяти як хост та маршрутизатор для прийому і пересилання пакетів, і він може довільно переміщатися, залишати мережу або вимикатися. Більше того, нові вузли можуть несподівано приєднатися до мережі. Мережа використовує переваги бездротового середовища зв'язку. Іншими словами, у провідній мережі фізичне кабельне розведення апріорі обмежує топологію з'єднання вузлів, цього обмеження немає в бездротовій області, і при умові, що два вузла знаходяться в межах дальності зв'язку, вони можуть реалізувати миттєвий зв'язок між собою. Ці характеристики роблять її нестабільною мережею, в якій зв'язки між вузлами часто розриваються.

У таких динамічних топологіях кожен вузол відповідає за встановлення з'єднань із сусідніми вузлами та за ретрансляцію пакетів від імені інших вузлів, тому тимчасові мережі можуть бути створені без підтримки інфраструктури або з обмеженою підтримкою. Завдяки цим властивостям мережа має великий потенціал застосування у різних сценаріях, таких як

зв'язок на полі бою та аварійне відновлення. Сценарії застосування включають надання допомоги при стихійних лихах, зв'язок між транспортними засобами в автоматизованих дорожніх системах, аварійно-рятувальні служби.

Розглянемо характеристики рухомої мережі Інтернету речей. Мережа має кілька відмінних характеристик, які сильно відрізняють її від звичайних мереж.

Динамічні топології: вузли можуть вільно переміщатися із різною швидкістю. Важко передбачити рух вузла та його траєкторію. Тому топологія мережі може змінюватися випадковим та непередбачуваним чином.

Обмежена пропускна здатність. бездротові канали мають меншу пропускну спроможність, ніж провідні мережі. Однак в даний час деякі стандарти пропонують більш високі швидкості передачі даних, які можна порівняти зі швидкостями E t h e r n e t . Крім того, на пропускну здатність бездротового зв'язку впливають умови навколишнього середовища, замирання, шум або перешкоди.

Обмеження енергії. У безпроводній сенсорній мережі вузли можуть бути оснащені батареями з обмеженою ємністю. Вузли не мають достатньої потужності передачі для досягнення всіх вузлів у мережі. Це обмежує зв'язок вузлів, зв'язок є тільки з обмеженою кількістю сусідніх вузлів.

Обмеження середовища. У бездротовій мережі неможливо одночасно передавати та приймати. Усі вузли мережі використовують загальне середовище поширення. Втрата повідомлень, в основному, відбувається через колізії та інші перешкоди.

Обмежена фізична безпека. У мережах M A N E T пакети даних передаються у радіоканалі. Отже, зловмиснику відносно легко отримати доступ до всіх пакетів даних, працюючи в нерозбірливому режимі та використовуючи аналізатор пакетів. Вузли також можуть зазнавати навмисного глушіння або атак типу «відмова в обслуговуванні».

Проблеми мережі M A N E T . Проблеми, пов'язані з безпекою,

знаходяться на прикладному рівні, якість обслуговування – на транспортному рівні, маршрутизація – на мережному рівні, управління потужністю – на каналному/прикладному рівні.

Рівень програми. Рівень програми, з якою взаємодіє користувач, залежить від прикладного завдання. Решта всіх рівнів використовується для створення безшовного інтерфейсу для мережних потреб прикладного рівня. Функції інших рівнів змінюються залежно від вимог програми. Визначено номери ідентифікацій, таких як партнери зв'язку, якість обслуговування конфіденційності, автентифікація користувача, а також низку інших обмежень.

Служби програм, що надаються прикладним рівнем, включають передачу файлів, електронну пошту та мережні програмні служби.

Транспортний рівень. Транспортний рівень відповідає за встановлення наскрізного з'єднання, наскрізну доставку пакетів даних, керування перевантаженням та керування потоком. Транспортні протоколи допомагають створювати сеанси зв'язку між комп'ютерами та гарантують надійне переміщення даних між комп'ютерами.

Мережний рівень. У мережі джерело та пункт призначення не знаходяться в зоні прямої передачі/прийому один одного. Переадресація з кількома переходами використовується для вузлів, які не знаходяться у зоні прямого зв'язку. Такий непрямий зв'язок через переадресацію з кількома переходами називається маршрутизацією. За налаштування та підтримку маршрутів від джерела до будь-якого пункту призначення відповідає мережний рівень. Мережний рівень потребує достатньої інформації про топологію мережі зв'язку для забезпечення ефективних маршрутів. Є дві основні функції мережного рівня: виявлення маршруту та обслуговування маршруту. Виявлення маршруту використовується для пошуку маршруту від джерела до місця призначення, хоча обслуговування маршруту використовується для підтримки існуючого маршруту у міру зміни топології відповідно до мобільності вузла.

Фізичний рівень. Фізичний рівень – це апаратне забезпечення. Електронні компоненти фізичного рівня – це антена та передавач/приймач, наприклад, у бездротовому вузлі. Основними функціями є модуляція та кодування фізичного рівня. Як правило, використовуються протоколи IEEE на фізичному рівні:

Канальний рівень. Обмежена смуга пропускання бездротового каналу у поєднанні з втратами при розповсюдженні радіохвиль та широкомовним характером радіопередач роблять зв'язок по бездротовому каналу ненадійним. Протоколи канального рівня використовуються для додавання надлишкових біт інформації до біт даних, щоб захистити їх від помилок в каналі. Протоколи прямої корекції помилок додають до даних контрольовану надмірність, щоб забезпечити надійну передачу даних ненадійними каналами. Типові системи канального кодування містять вихідний код для зменшення надмірності даних, за яким слідує канальний кодер, що додає контрольовану надмірність до стиснутих даних.

По суті, протоколи маршрутизації зазвичай поділяються на три різновиди:

- протокол маршрутизації на основі таблиць,
- протокол маршрутизації на вимогу,
- протокол гібридної маршрутизації.

Table Driven/Proactive (протоколи попереджувальної маршрутизації) періодично збирають інформацію про маршрутизацію та зберігають її в одній або кількох таблицях маршрутизації.

Відмінності між протоколами цього класу полягають у структурі маршрутизації, кількості таблиць, частоті оновлень, використанні вітальних повідомлень та наявності центрального вузла.

On-Demand / Reactive (реактивні протоколи маршрутизації) виявляють або підтримують маршрут за необхідності. Це знижує накладні витрати, які створюються проактивними протоколами. Стратегія затоплення

використовується виявлення маршруту. Протоколи реактивної маршрутизації можна розділити на дві групи:

- маршрутизація від джерела,
- маршрутизація по ланцюжків.

Гібридні протоколи, ці протоколи мають як реактивні, так і проактивні функції. Проактивна стратегія використовується для виявлення та підтримки маршрутів до довколишніх вузлів, у той час як маршрути до віддалених вузлам

Проблема із маршрутизацією. Маршрутизація є найбільш фундаментальним дослідницьким питанням, і вона повинна забезпечувати обмеження споживаної енергії, пропускної спроможності та мобільності вузлів. Ось деякі проблеми з маршрутизацією в таких мережах:

- асиметричні канали,
- накладні витрати на маршрутизацію,
- інтерференція,
- динамічна топологія.

3.3.3 Вибір головних вузлів кластерів у мережах Інтернету речей високої щільності

Вважатимемо, мережа Інтернету речей складається з n вузлів:

$$V = \{v_1, \dots, v_n\}, \quad (3.3)$$

які розподілені у тривимірному просторі, приклад наведений на рисунку 3.9.

Будемо також вважати, що у мережі можуть бути виділені кластери вузлів за допомогою метода кластеризації, запропонованого у підрозділі 3.2.

Завданням побудови мережі є вибір позицій розміщення головних вузлів у мережі Інтернету речей. У загальному випадку, в мережі може бути кілька кластерів, що складають множину кластерів

$$C = \{c_1, \dots, c_K\} \quad (3.4)$$

із K непересічних кластерів, які можуть мати довільну форму та довільну кількість елементів.

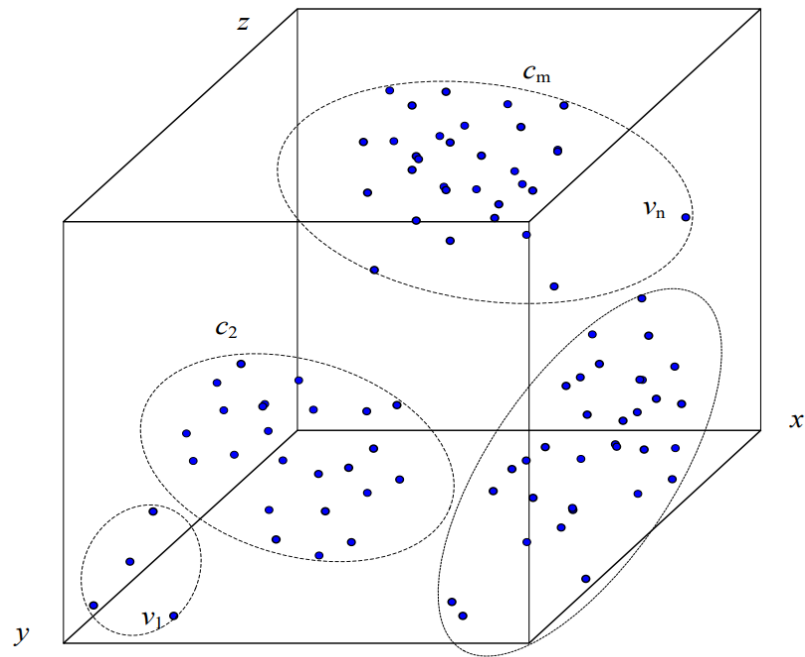


Рисунок 3.9 – Модель мережі Інтернету речей у тривимірному просторі

Якщо вузли в межах кластера утворюють зв'язкову мережу ad-hoc, то для їх обслуговування можна використовувати один або більше ГВ, рисунку 3.10.

Для спрощення завдання вважатимемо, що позиція ГВ збігається з позицією якогось вузла кластера. Також вважатимемо, що канали передачі симетричні, тобто. Показники каналів передачі в обох напрямках можна вважати ідентичними.

ГВ є центрами концентрації трафіку, т.к. всі вузли кластера здійснюють передачу даних крізь них. Тому для забезпечення якості функціонування мережі при виборі позицій ГВ необхідно виходити як з мінімуму протяжності маршруту, так з трафіку, що обслуговується. Визначимо вимоги до розміщення ГВ в такий спосіб.

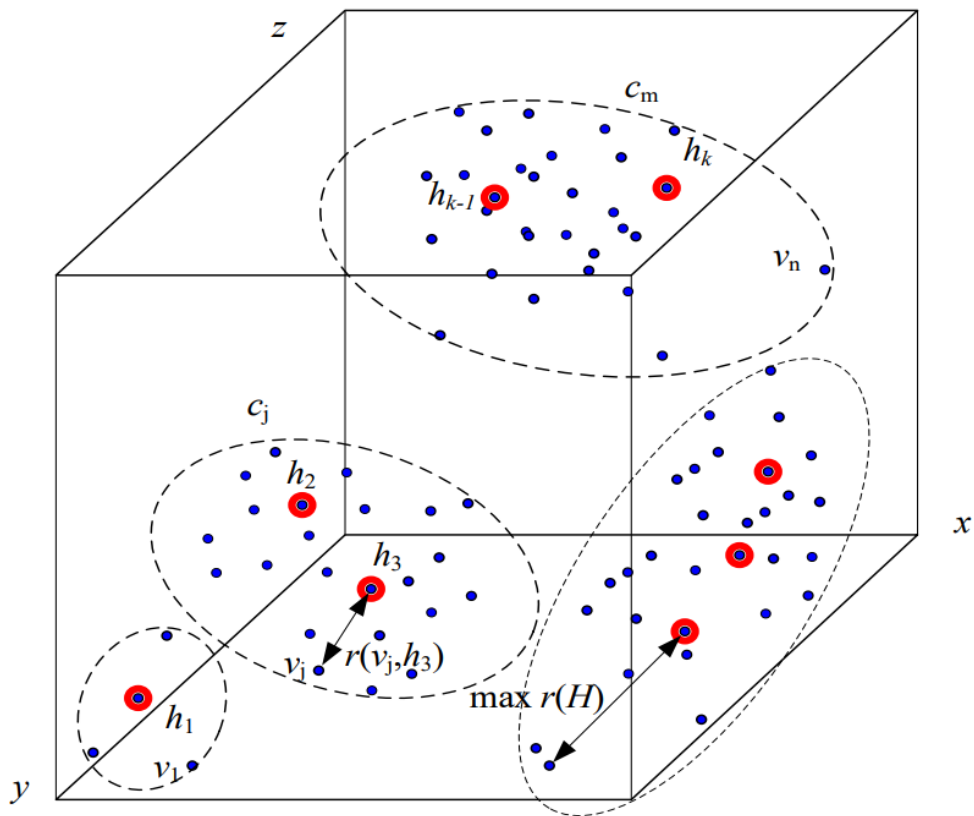


Рисунок 3.9 – Приклад тривимірного кластера

Нехай $r(v_j, h)$ – це відстань між j -м вузлом кластера і найближчим головним вузлом. Положення ГВ h слід вибрати так, щоб мінімізувати відстань до максимально віддаленого вузла мережі, тобто. забезпечити у гіршому випадку припустиму якість зв'язку.

Це завдання можна розглянути як завдання оптимізації, в якій цільова функція

$$r(h) = \min \left(\max_{v \in V} (d(v, h)) \right), \quad h \in V. \quad (3.5)$$

Слід зазначити, що вибору одного вузла найчастіше недостатньо, у такому разі йдеться про вибір множини головних вузлів

$$H = \{h_1, \dots, h_k\}, \quad H \subset V. \quad (3.6)$$

Завдання (3.5)-(3.6) – це завдання пошуку центру графа, утвореного вузлами кластерів.

Центр графа – вершина, максимальна відстань (довжина найкоротшого шляху) від якої до решти вершин мінімальна.

Завдання пошуку центру графа вирішується пошуком усіх найкоротших шляхів у графі, наприклад, з використанням алгоритму Флойда-Уоршалла та знаходженням центру графа за цими даними. Використання такого підходу цілком припустимо, якщо кількість вузлів кластера (вершин у графі) не надто велика як з позиції обчислювальної складності, так і з позиції можливості обслуговування трафіку, який вони виробляють.

Обчислювальна складність полягає в тому, що пошук усіх найкоротших шляхів вимагає час, що визначається кубом кількості вузлів (вершин) $O(n^3)$. Це вирішуване завдання, але за великої кількості вузлів час її вирішення може бути неприпустимо великим.

У разі мережі Інтернету речей високої щільності можна вдатися до спрощення завдання за рахунок тієї властивості, що довжина найкоротшого шляху в такій мережі близька до відстані між вершинами. Це логічно впливає з того, що найкоротша відстань між двома точками визначається по прямій, що проходить через них, а у разі мережі Інтернету речей високої щільності велика ймовірність того, що транзитні вузли шляху будуть дуже близько до цієї прямої. У такому випадку достатньо знати відстань між вузлами або їх координати.

Можливість обслуговування визначається продуктивністю ГВ та пропускною спроможністю маршрутів. Найчастіше одного ГВ недостатньо обслуговування всіх вузлів мережі. Тоді завдання можна розглядати як пошук кількох вузлів. Це завдання відоме як завдання пошуку k -кратного центру графа. Поряд з виконанням умови (3.5) алгоритми відрізняються точністю одержуваних рішень і обчислювальною складністю.

У таблиці 3.1 наведено основні характеристики низки алгоритмів: обчислювальна складність та статистичні оцінки точності рішення.

Таблиця 3.1 – Характеристики алгоритмів

Алгоритм	Час виконання	Точність рішення	Обчислювальна складність
HS	1,532	0,175	$O(n^2 \lg n)$
Gon	1,503	0,122	$O(kn)$
CDS _h	1,035	0,031	$O(n^2 \lg n)$
CDS	1,020	0,027	$O(n^4)$
HS+	1,258	0,110	$O(n^3 \lg n)$
GON+	1,304	0,120	$O(kn^2)$
CDS _h +	1,017	0,025	$O(n^3 \lg n)$

З таблиці видно, що точність рішення тим вища, що вища обчислювальна складність алгоритму. Слід зазначити, що алгоритм CDS є не найкращим наближеним рішенням, однак забезпечує більш високу точність рішення. Найпростіший за обчислювальною складністю алгоритм GON дає велику помилку рішення. Як бачимо із таблиці 3.1, модифіковані алгоритми дозволяють дещо підвищити точність рішення, проте підвищують обчислювальну складність у n разів.

Обчислювальна складність та час виконання алгоритму можуть мати істотне значення, особливо в завданнях управління мережею, коли для вирішення використовуються ресурси щодо низькопродуктивних обчислювальних пристроїв (контролерів). У таких випадках необхідно використовувати найбільш прийнятний алгоритм та забезпечити при цьому вимоги щодо якості обслуговування трафіку.

Для оцінки відносної складності алгоритму введемо коефіцієнт, що відбиває кількість операцій, яка є необхідною для зменшення помилки на 1%. Отримані оцінки наведено на рисунку 3.11, де величина коефіцієнту θ отримана як кількість ітерацій значення $n = 1000$ при $k = 100$.

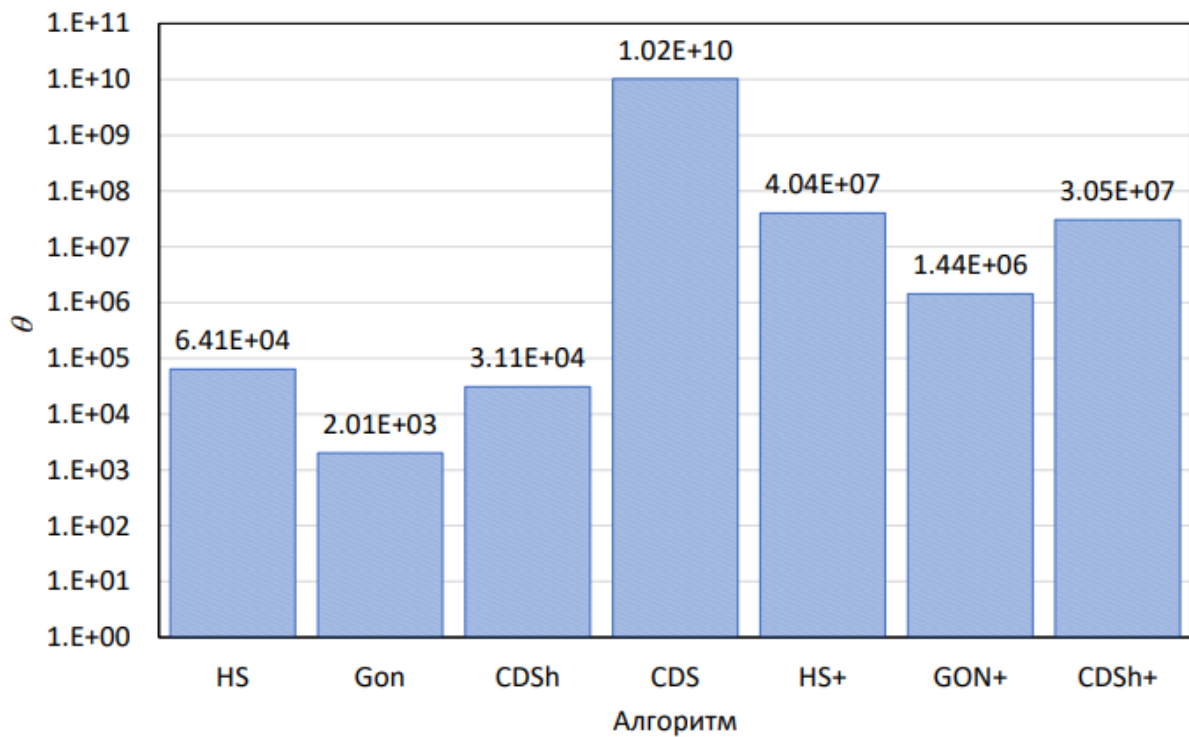


Рисунок 3.11 – Відносна складність алгоритмів

З рисунку 3.11 видно, що найменшу відносну складність у даних умовах має алгоритм GON, з ним можна порівняти алгоритми CDSh та HS. Алгоритм CDS має значно меншу ефективність (на сім порядків).

ВИСНОВКИ

Сукупність отриманих у кваліфікаційній роботі результатів дозволило вирішити актуальне науково-технічне завдання удосконалення методу організації мереж Інтернету речей високої щільності

В результаті проведених досліджень отримані такі наукові та практичні результати:

1. Проведений аналіз розвитку та основних завдань побудови мереж Інтернету речей. Сучасний стан цього процесу та його перспектива дозволяють зробити висновок про велику кількість пристроїв, підключених до мереж зв'язку. Це призводить до необхідності вибору адекватного модельно-методичного апарату, що дозволяє працювати з такими кількостями.

2. Концепція Інтернету речей визначає, що будь-які пристрої чи речі тепер можуть взаємодіяти між собою у будь-який час у довільній точці простору. Фактично, це констатує можливість побудови мереж довільної структури, що забезпечують зв'язність між її вузлами та можливість доставки необхідної інформації. Для реалізації цього положення також необхідні методи, що дозволяють реалізувати формування структури та організації мережі Інтернету речей з великою кількістю пристроїв у довільній галузі простору, тобто Інтернету речей високої щільності.

3. Обґрунтований вибір математичного та програмного інструментарію побудови мережі Інтернету речей високої щільності. Показано, що для підвищення ефективності мережі потрібно провести кластеризацію мережних елементів, поступово розраховуючи фрактальну розмірність аналізованого підпростору. Обраний метод визначення фрактальної розмірності простору мережних елементів. Визначені вимоги до удосконалення методу кластеризації простору мережних елементів.

4. Проведено моделювання структури мережі Інтернету речей високої щільності з використанням фрактальної розмірності простору елементів. За допомогою моделі запропонований підхід до оцінки фрактальної розмірності мережі Інтернету речей високої щільності, який можна застосувати для її подальшої кластеризації.

5. Удосконалений метод кластеризації мережі Інтернету речей високої щільності. Запропонований метод дозволяє зробити кластеризацію вузлів мережі, коли вони мають досить виражений розподіл за групами, що, наприклад, має місце в багатоповерхових будинках і будовах. Перевагою методу є можливість кластеризації груп вузлів, що мають різну форму та щільність. Порівняно з низкою поширених методів кластеризації він показав на тестових прикладах виграш на 18% за часткою помилок кластеризації.

6. Запропонувати підхід до вибору головних вузлів у мережі Інтернету речей високої щільності. При виборі алгоритму розв'язання задачі необхідно забезпечити компроміс між критеріями точності, якості рішення та часу його отримання (обчислювальної складності). Метод адаптивного вибору головних вузлів дозволяє підвищити ефективність мережі до 8 % порівняно з випадковим вибором алгоритму розв'язання завдання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Mozhaiev O., Kuchuk N., Shtepa D., Sorobei B. Study of the Internet of Things network construction tasks. // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2024. – Т. 1 (75). – С. 137-141. doi: 10.26906/SUNZ.2024.
2. Заковоротний О., Орлова Т. Порівняльний аналіз хмарних та туманних середовищ Інтернету речей, Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2023. Вип. 3(73). С. 152-154.
3. Петровська І. Ю., Кучук Г. А. Розподіл обчислювальних ресурсів у хмарних системах. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. Вип. 2 (68). С. 75–78. DOI: <http://dx.doi.org/10.26906/SUNZ.2022.2.075>.
4. Kuchuk G., Nechausov S., Kharchenko, V. Two-stage optimization of resource allocation for hybrid cloud data store. *Int. Conf. on Information and Digital Technologies*. Zilina, 2015. P. 266-271. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DT.2015.7222982>.
5. Кучук Г.А., Коваленко А. А., Лукова-Чуйко Н. В. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава . ПНТУ, 2017. Вип. 2(42). С. 117-120.
6. Sharma, M., Kaur, P. Reliable federated learning in a cloud-fog-IoT environment. *Journal of Supercomputing*. 2023. Vol. 79(14). P. 15435–15458. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11227-023-05252-w>.
7. Baucas, M.J., Spachos, P. Improving Remote Patient Monitoring Systems Using a Fog-Based IoT Platform with Speech Recognition. 2023. *IEEE Sensors Journal*. Vol. 23(15). P. 17611–17618. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2023.3287916>.
8. Essalhi, S.E., Raiss El Fenni, M., Chafnaji, H. A new clustering-based

optimised energy approach for fog-enabled IoT networks. *IET Networks*. Vol. 12(4). P.155–166. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/ntw2.12082>.

9. Number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide from 2019 to 2023, with forecasts from 2022 to 2030. Statista. Telecommunications. URL: <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide>.

10. ITU Internet Reports. The Internet of Things. ITU, November, 2005. URL: <https://www.itu.int/net/wsis/tunis/newsroom/stats/The-Internet-of-Things-2005.pdf>.

11. . Kowalczyk A. European IoT Spending to Reach Nearly \$227 Billion in 2023, Despite Ongoing Market Uncertainty, Says IDC. June 2023. URL: https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prEUR250941023&utm_medium=embed&utm_campaign=idc_embed&utm_source=referral. Дата звернення 11.10.2023.

12. . Burton A. Houdini Procedural City Generator. October 2020. URL: <https://80.lv/articles/houdini-procedural-city-generator-09>.

13. . Comparing different clustering algorithms on toy datasets. URL: https://scikit-learn.org/stable/auto_examples/cluster/plot_cluster_comparison.html

14. She R., Sun M. Security Energy Efficiency Analysis of CR-NOMA Enabled IoT Systems for Edge-cloud Environment. *Int. Journal of Computational Intelligence Systems*. 2023. Vol. 16(1), 118. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s44196-023-00273-y>.

15. . Bonomi, F.; Milito, R.; Natarajan, P.; Zhu, J. Fog computing: A platform for internet of things and analytics. In *Big Data and Internet of Things: A Roadmap for Smart Environments*; Springer: Cham, UAE, 2014; pp. 169–186.