

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА
ШЕВЧЕНКА**

**ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ
СИСТЕМ**

Кафедра радіотехніки та радіоелектронних систем

«На правах рукопису»

Робота допущена до захисту в ЕК
рішенням кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем
від _____ 2024 року, протокол № _____.
Завідувач кафедри доктор фіз.-мат. наук, професор
_____ Ігор АНІСІМОВ

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

“РОЗРОБКА МОНІТОРИНГУ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ДЛЯ LORA INDOOR”

Виконав:

здобувач 2го курсу магістратури
денної форми навчання
спеціальності 172 - Телекомунікації та радіотехніка
ОПП «Інформаційна безпека телекомунікаційних систем і мереж»
Александров Микита Станіславович _____

Науковий керівник:

к.т.н., асистент Аль Шурайфі Муштак Таліб _____

Рецензент:

к.т.н., доцент кафедри інформатики та програмної інженерії,
Факультет інформатики та обчислювальної техніки, КПІ ім. Ігоря
Сікорського
Зенів Ірина Онуфрїївна _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____ Микита АЛЕКСАНДРОВ

Київ – 2024

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 45с., 4 табл., 15 рис., 21 джерел.

LORA, IOT, МОНИТОРИНГ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ, БЕЗДРОТОВІ МЕРЕЖІ, ШЛЮЗ

Об'єкт дослідження:

Об'єктом дослідження є система моніторингу у режимі реального часу для LoRa Indoor 4 покоління.

Предмет дослідження:

Предметом дослідження є розробка та реалізація алгоритму моніторингу в режимі реального часу для системи LoRa Indoor 4 покоління на основі Python.

Мета дослідження:

Метою дослідження є розробка функціональної системи моніторингу в режимі реального часу для LoRa Indoor з використанням Python, орієнтованої на обробку пакетних даних.

Дана робота присвячена розробці та впровадженню системи моніторингу в реальному часі для внутрішнього використання з використанням технології LoRa. Задачею проекту було створення моніторингової інфраструктури з одним шлюзом та двома вузлами, орієнтованої на внутрішнє середовище.

Централізована архітектура системи була обрана для оптимальної роботи системи моніторингу в приміщенні, що забезпечує ефективний збір, обробку та доступ до даних. Для зберігання та організації даних використовується реляційна база даних, що дозволяє використовувати SQL-запити для отримання необхідної інформації.

Процес моделювання структури мережі LoRa був спрямований на покращення швидкості передачі даних та забезпечення стійкості системи під різними умовами внутрішнього середовища. Покращення параметрів та стратегій відновлення дозволили мінімізувати втрати пакетів навіть в умовах зі значними вимогами.

Отримані результати показали, що система здатна реєструвати та запитувати дані в автоматичному режимі, забезпечуючи внутрішній доступ до моніторингової системи через локальний шлюз. Під час проведення тестування якості обслуговування було виміряно середню пропускну здатність на рівні 20.4 кбіт/с на один пакет та середню втрату пакетів у розмірі 2.25% для зв'язку на відстань 1 метра. Ці результати враховують розмір одного стандартного пакета даних у нашій системі, який включає преамбулу, заголовок і корисне навантаження, що варіюється від 51 до 222 байт. Таким чином, навіть при максимальному розмірі пакета система демонструє стабільну пропускну здатність і мінімальні втрати пакетів, що свідчить про її ефективність та надійність у реальних умовах експлуатації.

Для поліпшення системи рекомендовано додати механізми комунікації та зв'язку до шлюзових систем, а також удосконалити процес шифрування та дешифрування для збільшення безпеки передачі даних у системі моніторингу LoRa Indoor.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
1. ТЕХНОЛОГІЯ LORA ІОТ.....	8
1.1 ІоТ – Інтернет речей.....	8
1.2 LoRa	10
1.3 LPWAN.....	13
1.4 LoRaWAN Network	14
1.5 Проблеми LPWAN та нещодавні рішення.	18
2. АНАЛІЗ ТА ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ	22
2.1. Централізована та децентралізована система.	22
2.2 Вибір засобів для зберігання даних.....	23
3. НАЛАШТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖІ	24
3.1 LoRa симулятори.....	24
3.2 Налаштування параметрів симуляції.	25
3.3. Моделювання структури мережі	31
3.4 Тестування структури мережі LoRa Indoor	35
ВИСНОВКИ.....	42
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА	43

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

IoT -Інтернет речей

LoRa – Long Range

LPWAN - Low Power Wide Area Network

CSS - chirp-spreading spectrum

МГц – мегагерц

TTN - The Things Network

R – Бітрейт

B - Ширина смуги пропускання

S – Коефіцієнт розширення

ED – End devices

GW – Gateway

NS - Network Server

ВСТУП

В сучасному світі технологічних інновацій та зростаючої кількості підключених пристроїв, мережі Інтернету речей (IoT) стають ключовим інструментом для збору та обробки даних. Широке впровадження Інтернету речей у наше повсякденне життя дозволило мільярдам фізичних і віртуальних об'єктів з'єднуватися і спілкуватися за допомогою стандартних протоколів зв'язку. Зі збільшенням сфер застосування і розгортання IoT, глобальні мережі з низьким енергоспоживанням (LPWAN) - це новий набір технологій з великим радіусом дії, низьким енергоспоживанням і низькою вартістю зв'язку, які обіцяють забезпечити зручне з'єднання для широкомасштабного розгортання IoT. Відкритий стандарт LoRaWAN є одним з основних відомих і впливових протоколів LPWAN. Low Power Wide Area Network (LoRaWAN) визначає специфікації рівня MAC для фізичного рівня LoRa. Технологія LoRa дозволяє фізичному рівню передавати дані на великі відстані, адаптуючи модуляцію з розширенням спектру (chirp-spreading spectrum, CSS) [1]. Це робить її ідеальним вибором для реалізації різних застосувань, де важливо отримувати дані від великої кількості пристроїв, розташованих на значних відстанях один від одного.

За останні роки кількість IoT-пристроїв, які використовують технологію LoRa, значно зросла. Це створює потребу в системах моніторингу та збору даних з цих пристроїв. Системи моніторингу в реальному часі використовують мережі LoRaWAN для збору та обробки даних з IoT-пристроїв. Ці системи дозволяють користувачам отримувати актуальну інформацію про стан об'єктів, що контролюються.

Мережі LoRa використовуються в різних галузях, включаючи сільське господарство, медицину, промисловість та екологію. Моніторинг даних в реальному часі стає ключовим для досягнення успіху у цих галузях.

З підвищенням обсягу даних, які передаються через мережі LoRa, зростає і потреба в забезпеченні безпеки та аутентифікації користувачів.

Актуальність цього аспекту стає важливою для запобігання несанкціонованому доступу та забезпечення конфіденційності даних.

Системи моніторингу в реальному часі здатні надавати користувачам актуальну інформацію та забезпечувати негайну реакцію на події. Це робить їх зручними та ефективними інструментами для великої кількості сфер.

1. ТЕХНОЛОГІЯ LORA IOT

1.1 IoT – Інтернет речей

Інтернет речей (IoT) - це система взаємопов'язаних обчислювальних пристроїв, механічних і цифрових машин, об'єктів, тварин або навіть людей, кожен з яких має унікальний ідентифікатор (User identifier, UID) і може передавати дані через мережу без потреби у взаємодії людини з людиною або комп'ютером.

Прикладами "речей" у Інтернеті речей може бути особа з імплантованим серцевим монітором, сільськогосподарська тварина з біочіпом, автомобіль з вбудованими датчиками, які повідомляють водія про стан шин, або будь-який інший природний або штучний об'єкт, якому може бути присвоєна IP-адреса і який здатний передавати дані через мережу..

Застосування IoT стає все поширенішим серед організацій у різних галузях для підвищення ефективності роботи, кращого розуміння потреб клієнтів, надання розширеного обслуговування, покращення процесів прийняття рішень та збільшення вартості бізнесу.

IoT ґрунтується на традиційних телекомунікаційних мережах та інших засобах передачі інформації і є розширенням звичайного Інтернету. У випадку IoT, кінцеві пристрої (end devices) виконують широкий спектр функцій, а сам Інтернет - це процес обробки та обміну даними між цими пристроями та мережею (рис. 1.1).

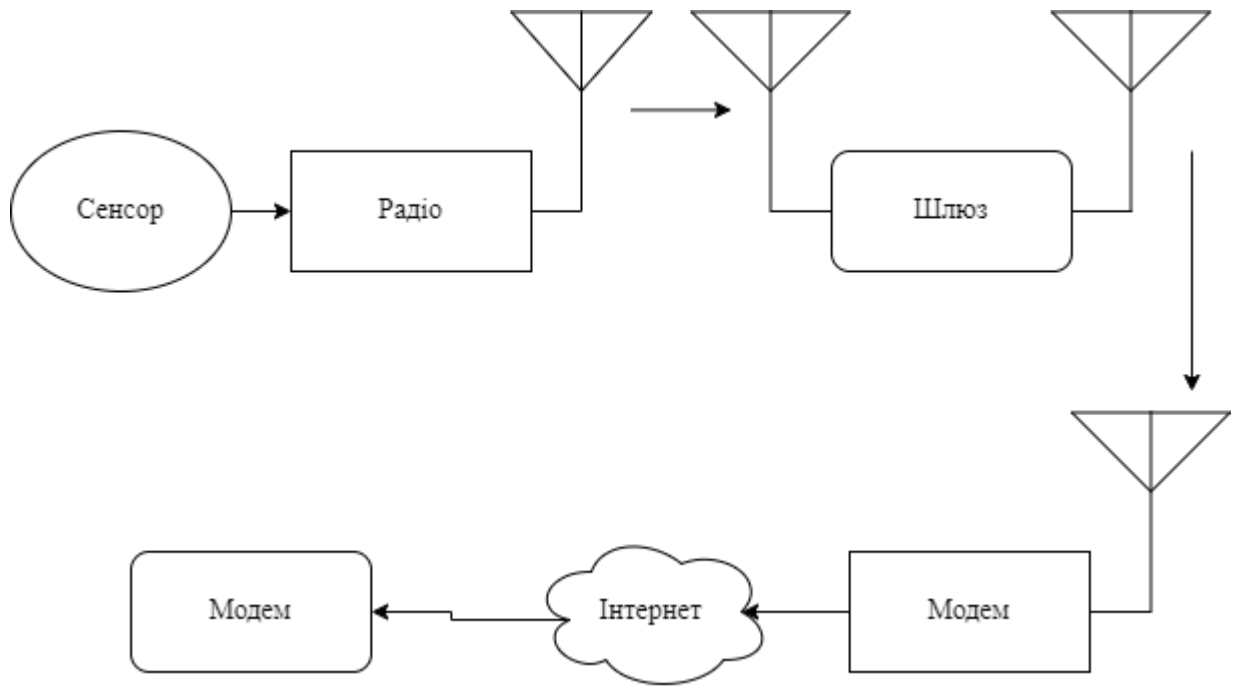


Рисунок 1.1 – Сценарії бездротового з'єднання для IoT

На рисунку 1.2 зображено структуру бездротового зв'язку в межах Інтернету речей (IoT). Крім того, в Інтернеті речей застосовуються шість ключових стандартів бездротового зв'язку, щоб відповідати різним вимогам у розробці IoT [2].

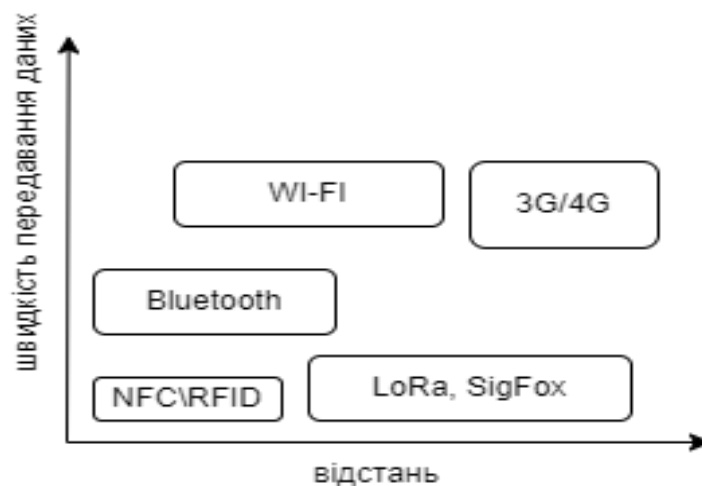


Рисунок 1.2 – Місце технологій IoT у сімействі бездротових стандартів [3].

1.2 LoRa

У цю сучасну епоху зростання IoT (Інтернет речей) відбувається дуже швидко. Існує безліч додатків IoT, що використовуються в різних сферах життя, таких як промисловість, медицина, сільське господарство, тваринництво, безпека, транспорт і домогосподарства. Швидке зростання IoT також впливає на різні пропозиції методів передачі даних IoT, одним з яких є LoRa. LoRa, що означає "Long Range" - це одна з систем зв'язку LPWAN (малопотужна глобальна мережа), яка має можливість передачі даних на великі відстані, що підтримується розробками компаній IBM, Semtech, Actility, та ін., які є членами LoRa Alliance. Метою розвитку LoRa є малопотужна (з живленням від батареї) передача кінцевих вузлів, які будуть передавати певну кількість пакетів даних за певний час.

LoRa спеціально розроблений Semtech для роботи в 433.868 або 915 МГц ISM Band (залежить від регіонального розміщення) зі швидкістю передачі між 0,25 кбіт/с-50 кбіт/с на канал[4]. Параметри, які, можливо, будуть змінені в LoRa є смуга пропускання, коефіцієнт рознесення і швидкість передачі коду. Коефіцієнт розповсюдження - це, коротко кажучи, тривалість щebetання. LoRa працює з коефіцієнтами поширення від 7 до 12. SF7 - це найкоротший час в ефірі, а SF12 буде найдовшим. Кожен крок у бік збільшення коефіцієнта поширення подвоює час перебування в ефірі для передачі того ж обсягу даних

LoRaWAN - це протокол зв'язку та системна архітектура мережі, в той час як фізичний рівень LoRa забезпечує зв'язок на великі відстані. Він має найбільший вплив на визначення часу автономної роботи вузла, пропускну здатність мережі, якість обслуговування, безпеку і різноманітність додатків, що обслуговуються мережею [5]. Архітектура мережі LoRaWAN складається з чотирьох типів пристроїв, а саме кінцевих вузлів, шлюзу, мережевого сервера і сервер додатків. Кінцеві вузли зв'язуються з шлюзом за допомогою з'єднання LoRa. Шлюз працює як з'єднувальний міст між кінцевими вузлами та мережевими серверами, де користувачі зберігають і обробляють дані. Шлюз

використовує IP backhaul для відправки даних на мережевий сервер, який має велику пропускну здатність. Типова архітектура LoRa показана на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Типова архітектура LoRa.

LoRa є фізичним рівнем технології LoRaWAN, який відповідає за керування модуляцією, потужністю, приймачем і передавальними радіостанціями, а також формування сигналів.

Архітектура LoRaWAN базується на наступних діапазонах частот у безліцензійному просторі:

- **915 МГц:** Використовується у США з обмеженнями на потужність, але без обмежень на робочий цикл.
- **868 МГц:** Використовується в Європі із робочим циклом 1% або 10% в залежності від конкретних обмежень.
- **433 МГц:** Використовується в Азії.

Ці діапазони частот дозволяють LoRaWAN працювати у безліцензійному спектрі і забезпечують зручність використання та розгортання для різних регіонів світу з врахуванням місцевих правил і обмежень щодо частот.

LoRa використовує похідну технології Chirp Spread Spectrum (CSS), що балансує швидкість передачі даних з чутливістю в смузі фіксованого каналу. CSS був розроблений у 1940-х роках для військового довговолнового зв'язку, які використовують модульовані імпульси чірпа для шифрування даних. Цей метод виявився особливо стійким до завад, ефекту Доплера і багатопробного розповсюдження. [3]

Чірпи (chirps) є синусоїдальними хвилями, що поступово збільшуються або зменшуються в часі. Оскільки чірпи використовують весь канал для зв'язку, вони відносно надійні у відношенні до перешкод. Можна уявити сигнали чірпів як звуки, які поступово змінюють свою частоту (наприклад, схоже на поклик кита).

Швидкість передачі бітів (бітрейт) у LoRa є функцією швидкості чірпа і швидкості передачі символів. Бітрейт (R_b) представляє собою добуток коефіцієнта розширення (S) і ширини смуги пропускання (B). Таким чином, бітрейт може змінюватись від 0,3 до 5 кбіт/с і обчислюється за формулою:

$$R_b = S \times \frac{1}{\left\lfloor \frac{2^S}{B} \right\rfloor} \quad (1.1)$$

Технологія LoRa використовує специфічну форму модуляції, яка дозволяє досягати значної передачі даних на великі відстані при низькій потужності, що було підтверджено військовими дослідженнями. У LoRa дані кодуються шляхом збільшення або зменшення частоти, і на одній і тій же частоті можуть відправлятися кілька передач з різною швидкістю передачі даних.

CSS (Chirp Spread Spectrum) дозволяє отримувати сигнали на рівні, що на 19,4 дБ нижче рівня шуму за допомогою FEC (Forward Error Correction), що забезпечує високу надійність передачі даних. Крім того, спектр частоти CSS поділяється на кілька піддіапазонів для ефективного використання радіочастотного спектру.

LoRa використовує канали шириною 125 кГц і може виділяти шість таких каналів для передачі даних. Це дозволяє оптимально використовувати

радіочастотний спектр і забезпечує можливість одночасної передачі даних на різних каналах з мінімальним впливом один на одного.

Кадр LoRa передається з певним коефіцієнтом розширення. Чим вищий коефіцієнт розширення, тим повільніше відбувається передача даних, але збільшується дальність зв'язку. Кадри LoRa є ортогональними, що дозволяє відправляти кілька кадрів одночасно, кожен з власним коефіцієнтом розширення. У LoRa існує шість різних значень коефіцієнта розширення від $SF = 7$ до $SF = 12$.

SF7: Найвища пропускна здатність, але найменша чутливість і найкоротша дальність передачі даних. Це використовується для короткодальних зв'язків або в умовах, коли важлива швидкість передачі даних.

SF8, SF9: Загальні режими для більшої дальності і кращої чутливості, але з меншою пропускною здатністю порівняно з SF7.

SF10, SF11, SF12: Найбільші значення SF, що забезпечують найбільшу чутливість і найбільшу дальність зв'язку, але при цьому пропускна здатність є найнижчою.

Типовий пакет LoRa включає преамбулу, заголовок і корисне навантаження розміром від 51 до 222 байт.

Мережі LoRa мають функцію Adaptive Data Rate (ADR), яка дозволяє динамічно масштабувати ємність мережі залежно від щільності вузлів та інфраструктури. ADR керується мережевим управлінням у хмарі. Вузли, розташовані близько до базової станції, можуть мати більш високу швидкість передачі даних завдяки кращій якості сигналу. Вузли, що знаходяться в непосредній близькості, можуть передавати дані, після чого звільняють свою смугу пропускання і швидко входять у режим сну в порівнянні з віддаленими вузлами, які передають з меншою швидкістю.[3]

1.3 LPWAN

Пристрої IoT та M2M підключаються бездротовим способом за допомогою технологій малопотужних глобальних мереж (LPWAN). Вони

можуть реагувати, відчувати навколишнє середовище і вмикатися в будь-який час і в будь-якому місці, щоб оновлювати дані в реальному часі в хмару [6]. LPWAN покликані вирішити кілька проблем з існуючими технологіями стільникових мереж малого радіусу дії і зв'язку для вирішення додатків IoT.



Рисунок 1.4 – Різноманітність застосувань LPWAN

Пристрої MassiveIoT підключаються в різних додатках (рис. 1.4), таких як розумні будівлі, розумні лічильники, розумне сільське господарство, капілярні мережі, дистанційна охорона здоров'я, підключені автомобілі, розумні вулиці, безпека і контроль дорожнього руху, дистанційне виробництво, розумні мережі, логістика, відстежування та управління автопарком [7]

1.4 LoRaWAN Network

Завдяки своїй мережевій структурі "зірка-зірка", LoRaWAN забезпечує безпечний двосторонній зв'язок в обох напрямках. Хоча технологія LoRa/LoRaWAN пропонує багато переваг з точки зору низької швидкості передачі даних і енергоспоживання, широкого покриття, простоти, можливості розгортання приватної мережі, безпеки і простоти в управлінні завдяки топології "зірка-зірка", недавні дослідження виявили ряд потенційних проблем з мережами LoRa/LoRaWAN, особливо з точки зору масштабованості у великомасштабних сценаріях.

LoRaWAN - це хмарний мережевий протокол MAC-рівня, який розроблений і підтримується LoRa Alliance для визначення верхніх рівнів мереж великої протяжності з фізичним рівнем LoRa. Це технологія LPWAN для бездротового підключення об'єктів до Інтернету в регіональних, національних або всесвітніх мережах з живленням від батарей, яка спрямована на задоволення основних потреб IoT, включаючи двосторонній зв'язок, наскрізний захист, мобільність і локалізацію. Фізичний рівень LoRa підтримує лінії зв'язку на великі відстані, в той час як протокол LoRaWAN в основному функціонує як протокол для маршрутизації мережевого рівня між шлюзами LoRaWAN і пристроями LoRa. LoRaWAN також керує швидкістю передачі даних, частотами зв'язку і потужністю передачі для всіх вузлів мережі, які є асинхронними і передають дані на вимогу. Як показано на рисунку 3, передані дані кінцевим пристроєм будуть прийматися сусідніми шлюзами, які перенаправляють корисне навантаження даних на хмарний сервер (The Things Network (TTN)), інтегрований в кілька платформ IoT. Дубльовані пакети будуть фільтруватися на мережевому сервері, який також керує мережею і забезпечує безпеку даних. Використовуючи будь-яку з доступних інтеграцій, отримана інформація передається на сервери додатків (веб-панелі управління та мобільні додатки). Архітектура технології LoRaWAN визначає три основні типи пристроїв наступним чином:

Кінцеві пристрої (End Device, ED): Пристрої, які приймають низхідний (Downlink, DL) трафік від мережевого сервера або генерують висхідний (Uplink, UL) трафік для передачі на шлюзи;

Шлюзи (Gateway, GW): Це пристрої, які демодулюють зв'язок LoRa і передають його між мережевим сервером і кінцевими пристроями в бездротовій мережі. Дротові або бездротові точки доступу з'єднують шлюзи з Інтернетом. Шлюз LoRaWAN є складним пристроєм, який одночасно прослуховує радіо на декількох каналах і доставляє тисячі EN одночасно;

Мережевий сервер (Network Server, NS): Це пристрій, який служить ядром мережі LoRaWAN, збираючи трафік з усіх кінцевих пристроїв в мережі і обробляючи його на сервері додатків. його на сервері додатків (рис. 1.5).

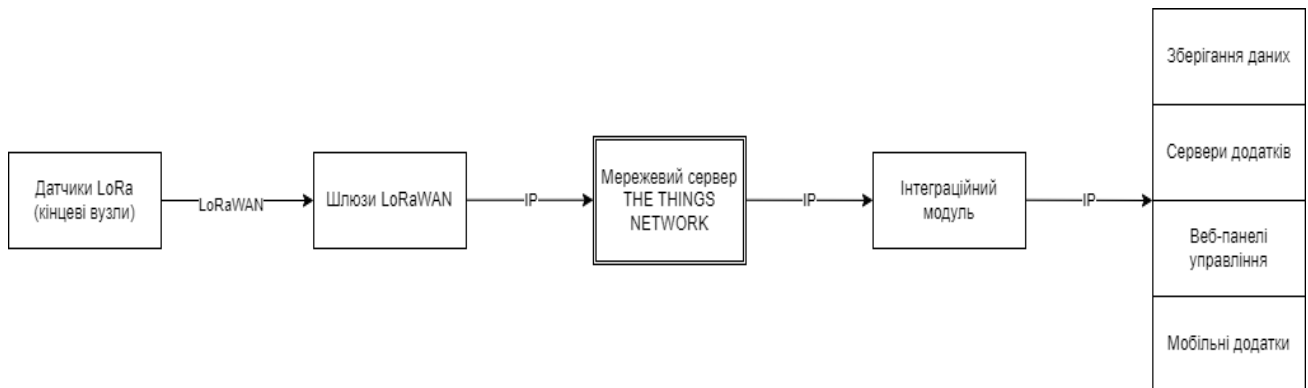


Рисунок 1.5 – Архітектура мережі LoRaWAN.

У порівнянні з іншими бездротовими технологіями, LoRaWAN забезпечує можливість встановлення приватних мереж, а також легку інтеграцію з різними мережевими платформами WAN (наприклад, TTN). Завдяки цьому, а також своїм специфікаціям з відкритим доступом, LoRaWAN привернула інтерес наукової спільноти, виробників технологій і постачальників послуг з моменту своєї першої появи на ринку [8].

Адаптивна швидкість передачі даних (Adaptive Data Rate, ADR) включена в мережу LoRaWAN для вибору швидкості передачі, яка краще відповідає умовам каналу. LoRaWAN працює у вільних регіональних частотних діапазонах, таких як 915 МГц в Америці, 868 МГц в Європі та 433 МГц в Азії в якості несучої частоти. В якості пропускну здатності використовується 125, 250 або 500 кГц. Для виявлення і виправлення помилок LoRaWAN використовує швидкість кодування і кількість використовуваних бітів, щоб показати це. Поєднання всіх вищезазначених функцій зробило LoRaWAN потужною технологією для передачі даних на дуже великі відстані в додатках IoT.

Завдяки своїй специфічній модуляції, LoRa є багатоцільовою технологією, яка може бути універсальною і функціонувати в різних типах

середовищ і групах додатків. LoRaWAN визначає три режими роботи як класи [9]: А, В і С. Всі вузли повинні бути ініціалізовані класом А, оскільки це режим вибору за замовчуванням, коли ED в будь-який час надсилають дані до GW через MAC-протокол LoRaWAN на основі ALOHA.

На рисунку 1.6 наведено часову діаграму роботи пристроїв LoRaWAN різних класів.

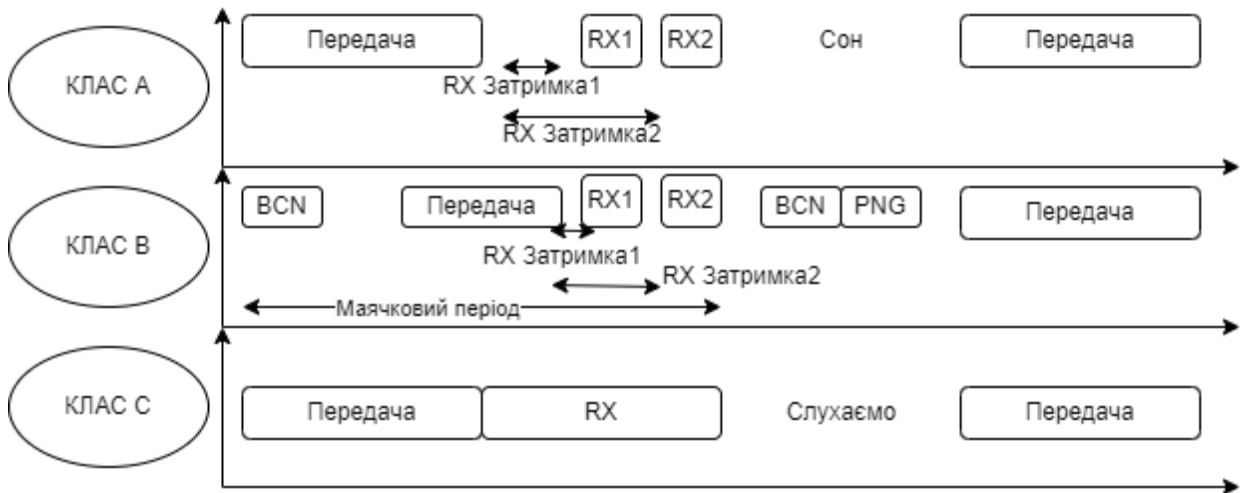


Рисунок 1.6 – Часова діаграма роботи пристроїв LoRaWAN.

Клас А: Цей клас використовує два вікна прийому в певний час після кожної передачі UL. Як показано на часовій діаграмі на Рисунку 4, на початку цих вікон прийому дозволені лише DL-передачі. Що стосується першого вікна, то DL-передачі здійснюються з використанням тих самих налаштувань каналу і швидкості передачі даних, що і попередня UL-передача. Тим не менш, у другому вікні використовуються статичні налаштування (тобто DR0 (SF12/125 КГц)) на частоті 869,525 МГц.

Клас В: Цей клас є додатковим режимом для ED, який потребує отримання додаткової інформації від базової станції як підтвердження (ACK) того, що використання цього режиму є кращим. Незважаючи на відсутність попередньої передачі від EN, GW відкривають більше вікон прийому, передаючи синхронізаційні маячки. Кількість вікон прийому, дозволених класом В, більша, ніж у класі А, але з більшим споживанням енергії, ніж у

класі А. Після кожної передачі UL відкриваються додаткові звичайні вікна прийому, на додаток до синхронізованого відкриття двох стандартних вікон прийому, які називаються пінг-слотами. Маячки GW періодично надсилаються кожні 128 с, щоб гарантувати синхронізацію. Корисне вікно маячка - це проміжок часу між двома маячками. Він згрупований у 212 пінг-слотів тривалістю 30 мс, кожен з яких має значення від 0 до 4095 [10].

Клас С: Вузли тримають свої вікна прийому відкритими весь час, закриваючи їх лише тоді, коли UL надсилає пакет до одного з них. Ці EN збільшують енергоспоживання, оскільки клас С змушує пристрої постійно приймати, що несумісно з класом В. Пристрої, які підтримують клас С, не реалізують клас В.

1.5 Проблеми LPWAN та нещодавні рішення.

Є три важливі характеристики LPWAN, які можуть задовольнити ключові вимоги додатків Інтернету речей: висока енергоефективність, широкомасштабне розгортання і низька вартість. Енергоефективність є основним параметром для збільшення терміну служби системи. Цьому критерію добре відповідають мережі LoRa, де вузли LoRa можуть працювати з мінімальним обслуговуванням протягом більш тривалого терміну служби - до 10 років. Серед перешкод для мереж LoRa, таким чином, є споживання енергії. Споживану енергію кінцевих пристроїв можна розділити на два типи: (1) енергоспоживання мікроконтролера, яке змінюється в залежності від обраної хост-плати, і (2) енергія, споживана бездротовою передачею, яка повністю залежить від технології LoRa і активності вузла [11]. Для підвищення енергоефективності в LoRa було проведено багато досліджень. Запропоноване рішення в [12] розділене на два етапи. На першому етапі пропонується покращений алгоритм стисненого зондування, відомий як ISL0, з використанням складної тригонометричної функції замість гауссової для реконструкції мережеских даних і зменшення кількості вузлів LoRa, які передають дані, що дозволяє уникнути зіткнень і затримок. На другому етапі

пропонується механізм розкладу сну для надійного збору даних з моніторингом стану пристрою.

Покращення швидкості вилучення даних (DER) має на меті підвищити пропускну здатність мережі. У роботі [13] автори змоделювали роботу висхідних вузлів за допомогою математичної моделі на основі зібраних експериментальних даних, застосувавши DER як нову метрику для вимірювання продуктивності мережі LoRa. Передані повідомлення в мережі LoRa повинні бути отримані на внутрішній системі. Іншими словами, кожне передане повідомлення має бути отримане принаймні одним шлюзом LoRa. Таким чином, автори визначили метрику DER як відношення отриманих до переданих повідомлень за певний інтервал часу. Отримане співвідношення DER є функцією розташування вузла або шлюзу, їх кількості та активності. LoRa демонструє ефект захоплення, оскільки є формою частотної модуляції. Ефект захоплення виникає, коли два сигнали з різною потужністю досягають приймача. Якщо різниця в потужності сигналів занадто мала, приймач не зможе декодувати жоден з отриманих сигналів. Таким чином, дослідження пропонує додати більше шлюзів для підвищення пропускну здатності LoRa. Ряд досліджень був присвячений масштабованості мережі LoRaWAN. Проблема масштабованості установок LoRaWAN виникає через велику кількість запитів АСК від кінцевих пристроїв і обмеження робочого циклу, якому повинен відповідати шлюз. Відсутність масштабованості може призвести до хаосу в поточній інформації про масштабованість, яка в основному є комерційною і передбачає найкращий сценарій. У [11] автори пропонують додати більше шлюзів для підвищення масштабованості LoRa. Автори створили симулятор LoRa, названий LoRaSim, на основі мови програмування Python. Вони створили мережу з одним шлюзом, яка погано масштабується при стандартній передачі даних, в той час як мережі, які автоматично налаштовують параметри передачі або мають кілька шлюзів, можуть масштабуватися краще. Висновок дослідження полягає в тому, що масштабованість мережі LoRa збільшується, якщо ToA також мінімізується за

допомогою оптимальних параметрів конфігурації. Однак ця модель пов'язує надмірне значення загасання у відкритому просторі для сигналів LoRa. Це потрібно оцінювати на місці, оскільки більша частина зони покриття включає звичайні з'єднання, які були визначені як з'єднання з динамічними часовими каналами. Хоча використання різних шлюзів перевершує наведені результати, ефективність ще більше підвищиться за рахунок оптичного розташування шлюзів пропорційно до спільноти додатків.

Покриття LoRa базується на сценарії розгортання вузлів LoRa і шлюзу LoRaWAN на додаток до параметрів передачі, зокрема SF, потужності передачі, пропускну здатності каналу і умов навколишнього середовища. Було проведено багато емпіричних досліджень для оцінки покриття LoRa як для зовнішніх, так і для внутрішніх з'єднань. Хоча LoRaWAN має великий радіус дії, особливо в сільській місцевості, і може добре працювати в умовах щільного розгортання з перешкодами, вона може страждати від проблем з покриттям. Крім того, існує зворотна залежність між швидкістю передачі даних і дальністю зв'язку, що призводить до неприйнятної продуктивності для багатьох промислових застосувань.

Протокол LoRaWAN адаптований для низького енергоспоживання і призначений для підтримки великих мереж з великою кількістю кінцевих пристроїв. Інноваційні функції LoRaWAN включають підтримку низького енергоспоживання, геолокації, резервування і недорогих додатків IoT. Однак питання безпеки охоплює кілька властивостей і, зокрема, криптографічні методи, що використовуються для реалізації безпеки в LoRaWAN, потребують більш ретельного вивчення. Проблема незахищеності є серйозною проблемою через обмеженість ресурсів пристроїв в LoRa і в LPWAN в цілому. Величезна кількість підключених пристроїв і переданих даних, серед інших факторів, зумовлюють дуже чутливий рівень безпеки. Автори роботи [12] дослідили механізм управління ключами в середовищах LoRaWAN і запропонували безпечну архітектуру управління ключами на основі смарт-контрактів і блокчейну дозволів для підвищення безпеки і доступності мереж LoRaWAN.

Архітектура LoRaWAN на основі блокчейну була змодельована за допомогою прототипу з використанням інструментів та обладнання з відкритим вихідним кодом для перевірки її функціональності та ефективності.

2. АНАЛІЗ ТА ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

2.1. Централізована та децентралізована система.

Почнемо розробку системи моніторингу з вибору архітектури системи, що є ключовим етапом у розробці ефективної та функціональної системи. Цей етап впливає на всі аспекти подальшого розвитку та експлуатації системи, визначаючи її продуктивність, масштабованість та здатність адаптуватися до змінних умов (рис. 2.1).

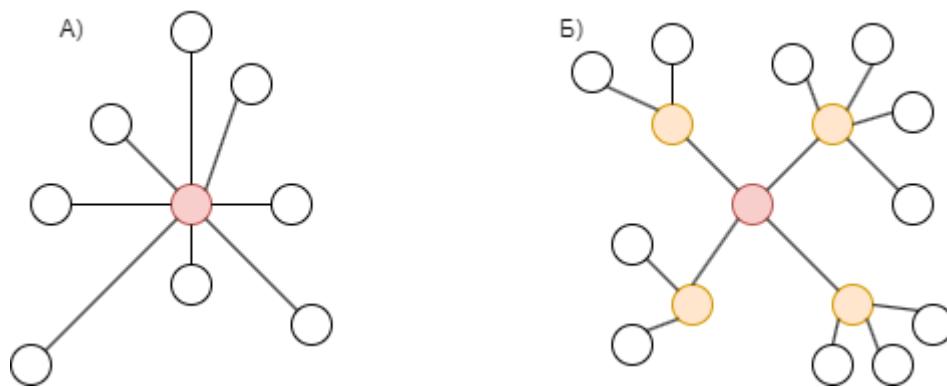


Рисунок 2.1 – А) Централізована модель. Б) Децентралізована модель.

За допомогою централізованої моделі ми можемо забезпечити ефективніше отримання та обробку даних та одне центральне місце обробки спрощує управління системою, але завдяки децентралізованій системі – отримуємо розподілену обробку, це дозволить нам масштабувати систему для обробки великих обсягів інформації шляхом додавання нових вузлів. У централізованих системах накладаються обмеження на масштабованість, при великих потоках даних. Не менш важливим є економічне питання розробки систем, так централізована модель буде більш затратною через високу потребу у ресурсах. Децентралізована система більш відмовостійка, так як мережа залишається активною, навіть після падіння одного з вузлів, а відмова центрального вузла в централізованій системі призведе до втрати зв'язку та даних.

Відштовхуючись від конкретних вимог системи моніторингу, ми можемо зробити вибір на користь однієї з моделей. У випадку простих систем з невеликим потоком даних ми надаємо перевагу централізованій моделі.

2.2 Вибір засобів для зберігання даних.

Наступним важливим етапом є вибір відповідних засобів для зберігання різних даних. Цей вибір залежить від поставленої задачі і вимог до обробки та зберігання великого обсягу даних в режимі реального часу.

На вибір маємо реляційні бази даних (РБД) та нереляційні бази даних . До реляційних БД відносяться PostgreSQL, MySQL та інші. Вони надають структуровану схему для зберігання даних, використовуючи SQL-запити для взаємодії з інформацією. До переваг РБД можемо віднести ефективність при складних операціях об'єднання та агрегації даних та зрозумілу організацію даних. Недоліками РБД будуть обмеження швидкодії при великих об'ємах даних та обов'язкова наявність структури БД до початку роботи.

Прикладом нереляційних БД (NoSQL) будуть MongoDB, DynamoDB. Такі БД слугують для зберігання малоструктурованих даних. Перевагами NoSQL БД є масштабованість для обробки розподілених даних.

Реляційні бази даних найкраще підходять для систем, які зберігають дані в чітко структурованих таблицях і потребують високої продуктивності для складних аналітичних запитів. NoSQL бази даних найкраще підходять для систем, які зберігають дані в більш гнучких структурах і потребують високої масштабованості.

3. НАЛАШТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖІ

3.1 LoRa симулятори

Комп'ютерне моделювання та імітація є належним методом для збагачення дослідження продуктивності системи та оцінки тактики її функціонування в творчих або прогностичних підходах. Імітаційна модель - це дизайн, який враховує обчислювальні алгоритми, фізико-математичні терміни та інженерні формули, які узагальнюють поведінку і продуктивність системи в конкретних прикладах нематеріального світу. Імітаційне моделювання мережі LoRa є більш важливим, оскільки його можна використовувати без дорогого впровадження до фактичної реалізації фреймворку для проектування та оцінки додатків на основі LoRa.

LoRaSim і NS-3 - це два різні симулятори, які використовуються для моделювання та дослідження роботи мереж LoRa (Long-Range). Вони надають можливість аналізувати різні аспекти мереж LoRa, такі як пропускна здатність, дальність передачі, споживана енергія, імовірність передачі даних і багато інших параметрів. Ось коротка інформація про кожен із них:

LoRaSim є простим та легким у використанні симулятором для LoRa-мереж. Він розроблений спеціально для моделювання мереж LoRa, але обмежений за функціональністю порівняно з більшими симуляторами.

LoRaSim дозволяє створювати віртуальні LoRa-пристрої, налаштовувати параметри передачі та отримання даних, а також вивчати пропускну здатність та завантаження мережі в обмеженому масштабі.

LoRaSim часто використовується для швидкого та простого моделювання LoRa-мереж у невеликих проектах та дослідженнях.

NS-3 (Network Simulator 3) - це багатфункціональний симулятор мереж, який включає в себе пакети для моделювання різних видів мереж, включаючи мережі LoRa. NS-3 є більш потужним та гнучким інструментом, але вимагає більше часу та знань для налаштування та використання.

NS-3 дозволяє розробляти складні моделі мереж і досліджувати різні протоколи передачі даних та алгоритми маршрутизації для мереж LoRa. Він також надає більшу точність та контроль над параметрами моделі.

NS-3 використовується для великих досліджень і проектів, де необхідно ретельно дослідити різні аспекти мереж LoRa, включаючи продуктивність, ефективність, та споживану енергію.

Якщо нам потрібне швидке та просте моделювання, LoRaSim може підійти. Однак, якщо нам потрібна глибока аналітика та розширені можливості, NS-3 може бути кращим вибором, хоча це вимагатиме більше зусиль для налаштування та розробки моделей.

3.2 Налаштування параметрів симуляції.

Плануємо інфраструктуру мережі LoRa. Планування будемо виконувати за допомогою симуляторів мережі LoRa, це дозволить ефективно моделювати та тестувати систему моніторингу без фізичного обладнання. Використання симуляторів дозволяє провести віртуальне тестування різних сценаріїв та покращення конфігурацію мережі. Для проектування будемо використовувати потужний інструмент – NS-3. Його встановлення вимає від нас велику кількість залежностей і конфігурацій. Розробку будемо проводити на операційній системі Linux, використовуючи дистрибутив Ubuntu версії LTS 22.04. NS-3 є фреймворком, написаним на мові програмування C++, проте, ми можемо використовувати обгортку для NS-3, яка надає Python-інтерфейс для деяких функцій NS-3, і це називається PyNS3.

Налаштування параметрів симуляції важливо для правильного моделювання мережі LoRa у середовищі симуляції, наприклад, у програмі NS-3. Основні параметри, які можна налаштувати для симуляції мережі LoRa, включають такі аспекти:

1. Параметри фізичного шару (PHY Layer):

Дальність передачі (Transmission Range): Визначає максимальну відстань, на яку вузли можуть передавати дані один одному. Цей параметр важливий для встановлення зон покриття вузлів.

Швидкість передачі даних (Data Rate): Встановлює швидкість передачі даних між вузлами і шлюзом через LoRa мережу.

Пропускна здатність каналу (Channel Capacity): Визначає максимальну пропускну здатність каналу зв'язку, яка впливає на кількість даних, які можуть бути передані через мережу протягом певного часу.

Шум та інтерференція (Noise and Interference): Параметри, які впливають на якість передачі даних через мережу, враховуючи наявність шуму та можливість виникнення інтерференції.

2. Параметри мережевого рівня (Network Layer):

Тип маршрутизації (Routing Protocol): Вибір маршрутизаційного протоколу для визначення оптимального шляху передачі даних між вузлами моніторингу та шлюзом.

Керування доступом до каналу (Channel Access Control): Налаштування методу керування доступом до каналу для забезпечення ефективності передачі даних у мережі LoRa.

3. Параметри мобільності вузлів (Node Mobility):

Рух вузлів (Node Movement): Моделювання руху вузлів моніторингу у просторі (наприклад, в двокімнатній квартирі), що може впливати на якість зв'язку та характеристики мережі.

4. Інші параметри:

Характеристики пристроїв (Device Characteristics): Встановлення особливостей вузлів моніторингу та шлюзів, таких як тип антени, потужність передачі, споживання енергії тощо.

Протоколи верхніх рівнів (Higher Layer Protocols): Налаштування протоколів, що використовуються для обробки та передачі даних у мережі LoRa.

Фізичний рівень LoRa запатентований компанією Semtech і базується на Chirp Spread Spectrum (CSS), що забезпечує високу чутливість приймача. LoRaWAN - це протокол рівня MAC і дизайн архітектури системи, стандартизований LoRa Alliance. На додаток до CSS, фізичний рівень LoRa також використовує прямі коди корекції помилок для підвищення стійкості до шуму, в той час як MAC-рівень використовує техніку доступу до каналу, подібну до Aloha. В Європі LoRa працює в діапазоні частот 863 - 870 МГц. Він може працювати в двох піддіапазонах, один на частоті 868 МГц, який пропонує три канали LoRa 125 кГц, і один на частоті 867 МГц, який пропонує п'ять каналів LoRa 125 кГц. Шлюз повинен мати можливість прослуховувати всі канали одночасно, в той час як для кінцевих вузлів обов'язковою є можливість зв'язку принаймні в піддіапазоні 868 МГц. Європейські норми вимагають дотримуватися 1% робочого циклу на піддіапазон або застосовувати механізм "прослуховування перед розмовою та адаптивної частотної маневреності". Вузкосмуговий сигнал поширюється в широкосмуговий сигнал шляхом представлення кожного біта інформації кількома інформаційними чипами. Коефіцієнт рознесення пов'язаний з кількістю фішок на біт інформації. Він подається як $\log_2(N)$, де N - це кількість чипів на символ. LoRa використовує 6 різних коефіцієнтів розповсюдження від 7 до 12. Номінальна швидкість передачі даних зменшується зі збільшенням коефіцієнта рознесення, але чутливість приймача збільшується.

У таблиці 3.1 наведено дані про зв'язок між швидкістю передачі даних, коефіцієнтом рознесення і чутливістю приймача

Таблиця 3.1 – Зв'язок між швидкістю передачі даних, коефіцієнтом рознесення і чутливістю приймача

Швидкість даних	Коефіцієнт рознесення	Швидкість передачі даних, кб\с	Чутливість приймача, дБм
DR0	12	0.25	-136
DR1	11	0.44	-133
DR2	10	0.98	-132
DR3	9	1.7	-129
DR4	8	3.1	-126
DR5	7	5.4	-123

LoRa використовує фактор розповсюдження (SF) для розподілу кожного символу інформації на декілька мікросхем. Це робиться задля покращення чутливості приймача. Коефіцієнт SF можна налаштувати в діапазоні від 7 до 12, що впливає на швидкість розповсюдження сигналу, яка коливається від 26 до 212 чіпів на символ. Швидкість передачі символів (RS) розраховується за формулою:

$$R_s = \frac{R_c}{2^{SF}} = \frac{BW}{2^{SF}} \frac{\text{символ}}{с} \quad (3.1)$$

Чим вище SF тим повільніше поширюється сигнал, тим більша чутливість приймача.

R_s - це швидкість передачі символів, яка визначає, скільки символів інформації передається за секунду. Якщо SF = 10, то сигнал розбивається на 1024 мікросхеми. Швидкість розповсюдження сигналу буде 512 чіпів на символ. Швидкість передачі символів (RS) буде:

$$\frac{10}{2^{10}} = 0.0977 \frac{\text{символів}}{\text{секунду}}$$

Важливо зазначити, що SF і RS є взаємопов'язаними: Збільшення SF призводить до зменшення RS. Зменшення SF призводить до збільшення RS.

Вибір оптимального SF залежить від конкретного застосування: Якщо важлива чутливість приймача, то слід використовувати високий SF. Якщо важлива швидкість передачі даних, то слід використовувати низький SF.

Шлюзи та вузли є ключовими компонентами у мережі LoRa, особливо в контексті системи моніторингу, яка використовує LoRa технологію для збору та передачі даних.

Вузли моніторингу є джерелами даних в системі. Вони можуть бути обладнані різними типами датчиків (температура, вологість, рухові сенсори тощо), які збирають інформацію з навколишнього середовища. Після збору даних вузли використовують LoRa технологію для передачі цих даних до шлюзу. Вузли моніторингу зазвичай працюють в умовах обмеженої енергії (наприклад, в батарейно живлених пристроях). LoRa технологія має низьке споживання енергії, що дозволяє вузлам працювати на довгих відстанях без необхідності частої заміни батарей. LoRa забезпечує стабільний та надійний зв'язок на великі відстані. Вузли моніторингу можуть спокійно функціонувати навіть у важкодоступних місцях, де інші бездротові технології можуть бути неефективними.

Шлюзи є посередниками між вузлами моніторингу та іншими мережевими системами (наприклад, Інтернетом або серверами). Вони приймають дані від вузлів через LoRa мережу та передають їх на зовнішні сервери для подальшого аналізу або зберігання. Шлюзи відповідають за ефективне керування трафіком у мережі. Вони можуть визначати оптимальні шляхи для передачі даних від вузлів до цільових серверів, що дозволяє покращити пропускну здатність та енергоспоживання. Шлюзи можуть підтримувати різні стандарти зв'язку, такі як TCP/IP, що робить їх сумісними з існуючими мережевими інфраструктурами. Це дозволяє легко інтегрувати LoRa мережу з іншими системами та сервісами. Шлюзи можуть обробляти велику кількість даних від багатьох вузлів одночасно. Вони роблять можливим масштабування мережі LoRa для обробки великих обсягів даних з розподіленої системи вузлів.

У контексті системи моніторингу LoRa Indoor, вузли моніторингу забезпечують збір даних з різних датчиків в квартирі, а шлюзи допомагають передавати ці дані на центральні сервери або системи зберігання для аналізу та подальшої обробки. Ця архітектура дозволяє створювати ефективні та надійні системи моніторингу з використанням LoRa технології.

Для налаштування параметрів симуляції мережі нам потрібно враховувати важливі параметри, наприклад ті, що наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри для системи LoRa Indoor.

Дальність передачі	до 50 метрів
Частотний діапазон	частоти в межах 868 МГц або 915 МГц
Швидкість передачі даних	10-50 кбіт/с
Розташування вузлів та шлюзу в приміщенні	перший вузол (вузол 0) у координатах (10, 10, 0), другий вузол (вузол 1) у координатах (30, 20, 0), а шлюз (вузол 2) у координатах (20, 15, 0)
Перешкоди в приміщенні	Рис.3.1
Кількість пристроїв	3 пристрої: два вузли та один шлюз
Модель рухомості	Статичні

Встановлюючи нові шлюзи, ми маємо враховувати навколишні матеріали та їхній вплив на поширення радіосигналу.

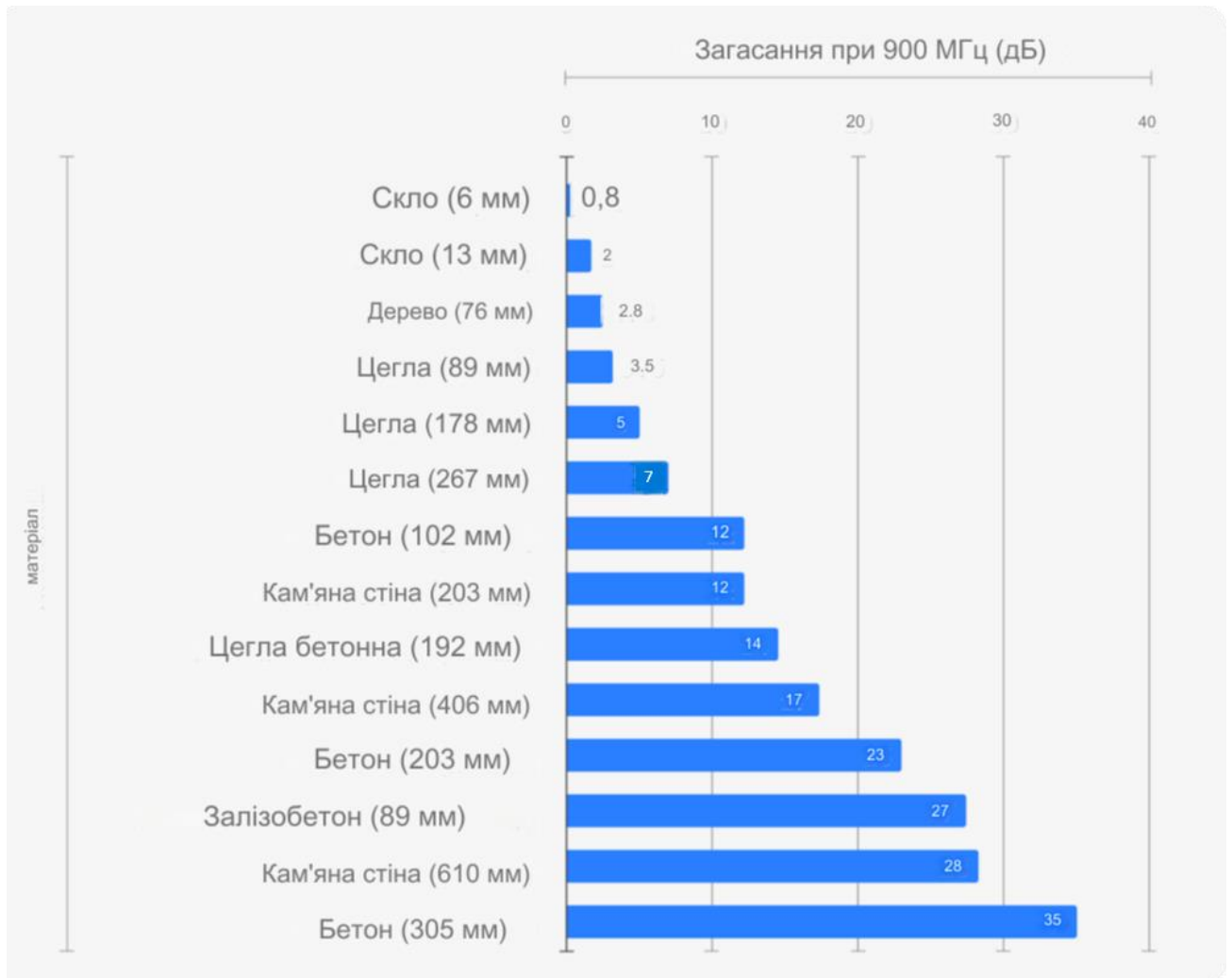


Рисунок 3.1 – Вплив матеріалів на поширення радіосигналу.

У будівництві деяких будівель зі стандартами екологічності, використовується скло з низьким коефіцієнтом випромінювання (low-E). Цей тип вікна має тонке покриття, яке мінімізує кількість енергії, що проходить крізь нього, щоб відводити ультрафіолетове світло та сонячне тепло. Це, на жаль, може призвести до ослаблення сигналу та поганого покриття в приміщенні.

3.3. Моделювання структури мережі

Для моделювання структури мережі нам важливо визначити яку топологію буде використовувати мережа топологія зірка, мешова чи інша топологія. Обрати оптимальне розташування шлюзів, для найкращого зв'язку

з вузлами та забезпечення покриття всіх приміщень. Встановлюємо параметри з'єднань між вузлами та шлюзами, це включає у себе потужність передавача, чутливість приймача, втрати на каналі та інші параметри. Також, нам не слід забувати про можливі перешкоди в приміщенні, такі як меблі, стіни та інші об'єкти. Це може впливати на розташування вузлів та шлюзів.

У цьому прикладі (рис 3.2) створюємо клас LoRaNode, який представляє вузол моніторингу. Кожен вузол має унікальний ідентифікатор, параметри LoRa (частоту та потужність передачі) і може відправляти дані до шлюзу через метод `send_data`.

```
import time
from lora import LoRa, MODES

class LoRaNode:
    def __init__(self, node_id, gateway_id, frequency, tx_power):
        self.node_id = node_id
        self.gateway_id = gateway_id
        self.frequency = frequency
        self.tx_power = tx_power
        self.lora = LoRa(mode=MODES.TRANSMIT)

    def send_data(self, data):
        message = f"Node {self.node_id}: {data}"
        self.lora.begin_packet(self.gateway_id, self.frequency, self.tx_power)
        self.lora.send_data(message)
        self.lora.end_packet()
        print(f"Node {self.node_id}: Data sent - {data}")

# Параметри вузлів моніторингу
node1 = LoRaNode(node_id=1, gateway_id=101, frequency=868E6, tx_power=14)
node2 = LoRaNode(node_id=2, gateway_id=101, frequency=868E6, tx_power=14)

# Відправлення даних від вузлів до шлюзу
node1.send_data("Temperature: 25°C")
node2.send_data("Humidity: 60%")
```

Рисунок 3.2 – Створення вузлів моніторингу

Для нашого випадку, використаємо можливість визначити, як вузли розташовані один відносно одного. Не забуваючи враховувати наявні перешкоди.

На рисунку 3.3 показано код для визначення топології мережі для симуляції, задаючи позиції вузлів у просторі.

```
def define_network_topology(nodes, channel):  
    positions = [(10, 10, 0), (30, 20, 0), (20, 15, 0)]  
  
    for i in range(nodes.GetN()):  
        mobility_helper.SetPosition(nodes.Get(i), ns.mobility.Vector(positions[i][0], positions[i][1], positions[i][2]))
```

Рисунок 3.3 – Моделюємо реалістичні позиції вузлів, враховуючи стіни та інші перешкоди.

У цьому прикладі (рис 3.4) створюємо клас LoRaGateway, який представляє шлюз. Шлюз має унікальний ідентифікатор і частоту прийому LoRa. Метод receive_data відслідковує наявність нових даних в мережі і виводить їх на консоль.

```

from lora import LoRa, MODES

class LoRaGateway:
    def __init__(self, gateway_id, frequency):
        self.gateway_id = gateway_id
        self.frequency = frequency
        self.lora = LoRa(mode=MODES.RECEIVE)

    def receive_data(self):
        while True:
            if self.lora.available():
                message = self.lora.receive()
                if message:
                    print(f"Gateway {self.gateway_id}: Received data - {message}")
            time.sleep(1)

# Параметри шлюзу
gateway = LoRaGateway(gateway_id=101, frequency=868E6)

# Прийом даних від вузлів
gateway.receive_data()

```

Рисунок 3.4 – Розробка шлюзу

Моделюємо реалістичне розташування шлюзів (рис. 3.5), яке може бути централізованим або децентралізованим залежно від типу приміщення.

```

def place_gateways(nodes):
    gateway_positions = [(15, 15, 0)] # Розташовуємо шлюз в центрі мережі

    for i in range(len(gateway_positions)):
        mobility_helper.SetPosition(nodes.Get(nodes.GetN() + i), ns.mobility.Vector(gateway_positions[i][0],
                                                                                       gateway_positions[i][1],
                                                                                       gateway_positions[i][2]))

```

Рисунок 3.5 – Моделюємо розташування шлюзів, наприклад, в центрі мережі або на кожному поверсі

Встановлюємо реалістичні параметри з'єднань (рис. 3.6), такі як вплив відстані, стін та інших перешкод на сигнал LoRa.

```
def install_lora_devices(nodes, channel):
    lora_phy_helper = ns.lora.LoraPhyHelper()
    lora_net_device_helper = ns.lora.LoraNetDeviceHelper()
    lora_net_device_helper.SetPhyHelper(lora_phy_helper)
    lora_net_device_helper.SetChannel(channel)

    # Встановлюємо реалістичні параметри з'єднань, такі як вплив відстані та стін
    lora_net_device_helper.SetDistanceModel("ns3::RandomPropagationLossModel",
                                           "Variable::Mean[140.0]|Variable::Variance[20.0]")
```

Рисунок 3.6 – Параметри з'єднань

Ці параметри дозволяють налаштувати симуляцію LoRa мережі з урахуванням різних аспектів, таких як фізичні характеристики передачі даних, мережеві протоколи, рух вузлів та інші аспекти, що впливають на характеристики мережі під час моделювання.

3.4 Тестування структури мережі LoRa Indoor

Тестування є надзвичайно важливою частиною розробки системи моніторингу на основі LoRa мережі. Тестування дозволяє перевірити, чи працює система вірно та відповідає вимогам. Воно дозволяє впевнитися, що вузли моніторингу можуть взаємодіяти зі шлюзом через LoRa мережу, передаючи дані ефективно та надійно.

Тестування допомагає визначити пропускну здатність мережі, швидкість передачі даних та інші параметри продуктивності. Це важливо для забезпечення оптимального функціонування системи під час реальної експлуатації.

Тестування системи моніторингу на основі LoRa мережі включає в себе використання різних методів і технік для оцінки різних аспектів її функціонування. Детальний огляд методів тестування, які можна використовувати:

1. Тестування функціональності:

Одиничні тести: Це тести, які перевіряють правильність окремих частин програми. Наприклад, тести для вузлів моніторингу, що перевіряють їх здатність передавати дані через LoRa мережу.

Інтеграційні тести: Тести, які перевіряють взаємодію між різними компонентами системи, наприклад, між вузлами моніторингу та шлюзом.

Системні тести: Тести, які оцінюють систему в цілому згідно зі специфікаціями та вимогами.

2. Тестування продуктивності:

Тести на пропускну здатність: Вимірювання кількості даних, які можуть бути передані через мережу за певний період часу. Наприклад, вимірювання пропускну здатності LoRa мережі за допомогою відправлення пакетів і вимірювання часу передачі.

Тести на витрату енергії: Вимірювання споживання енергії вузлами моніторингу під час роботи в різних режимах. Це важливо для оцінки тривалості роботи вузлів на батареях.

3. Тестування надійності:

Тести на втрату пакетів: Вимірювання частки втрачених пакетів при передачі через мережу. Це допомагає оцінити стабільність з'єднання та ефективність передачі даних.

Тести на стійкість до перешкод: Вимірювання продуктивності мережі в умовах перешкод або змінюючого середовища (наприклад, між кімнатами в квартирі).

4. Тестування безпеки:

Тести на захист від зламу: Перевірка вразливостей системи на доступ до даних чи втручання.

5. Тестування масштабованості:

Тести на масштабованість: Оцінка продуктивності мережі при збільшенні обсягу даних або кількості вузлів.

6. Тестування відмовостійкості:

Тести на відновлення: Вимірювання часу відновлення системи після відмови вузла чи шлюза.

7. Тестування використання ресурсів:

Тести на оптимізацію: Вимірювання використання ресурсів (процесора, пам'яті) під час роботи системи.

Методи тестування:

Модульне тестування: Тестування окремих модулів програми.

Імітаційне тестування: Використання імітацій для тестування взаємодії між компонентами мережі.

Тестування в реальному середовищі: Використання реальних пристроїв та середовища для тестування реального функціонування системи.

Тестування на навантаження: Створення навантаження для оцінки реакції системи при максимальному навантаженні.

Загальна мета тестування - забезпечити високу якість, надійність та ефективність системи моніторингу на основі LoRa мережі, що є критичним для успішної реалізації та експлуатації такої системи.

Тестування дозволяє виявити потенційні проблеми, помилки програмного забезпечення або вразливості мережі ще до введення системи в експлуатацію. Це дозволяє виправити проблеми на етапі розробки і підвищити надійність системи. Тестування допомагає перевірити правильність налаштування мережі, визначити оптимальні параметри та забезпечити правильну інтеграцію між вузлами моніторингу та шлюзами. Тестування дозволяє визначити споживання енергії вузлами моніторингу під час передачі даних через LoRa мережу. Це дозволяє оцінити тривалість роботи вузлів на одній батареї та визначити необхідність оптимізації. Тестування допомагає підготувати систему до масштабування, оцінити її працездатність при збільшенні обсягів даних або кількості вузлів моніторингу. Результати тестування дають змогу визначити області для вдосконалення та оптимізації системи, а також впровадити необхідні зміни перед запуском в експлуатацію.

Механізм тестування здійснюється шляхом перевірки пропускної здатності та втрати пакетів системи. Пропускна здатність - це ефективна швидкість передачі даних. Вона може бути отримана за допомогою формули (3.1),

$$T = \frac{Dt}{t} \quad (3.2)$$

де T - пропускна здатність у бітах в секунду;

Dt - кількість пакетів, що надійшли;

t - час спостереження.

Втрата пакетів - це параметр, що показує кількість пакетів, втрачених в процесі передачі. Він може бути отриманим за допомогою формули (2):

$$PL = \frac{(Dk - Dt)}{Dk} \times 100\% \quad (3.3)$$

де PL - втрата пакетів;

Dk - кількість відправлених пакетів;

Dt - кількість отриманих пакетів.

Тестування пропускної здатності проводимо шляхом ділення кількості успішно відправлених пакетів на спостережуваний час. Робимо кілька ітерацій під час проведення тестування пропускної здатності.

Таблиця 3.3 – Результати тестування пропускної здатності

Номер ітерації	Розмір пакета, кбіт	Середній час відпрацювання, мс	Пропускна здатність, кбіт\с
1	24.57	975	25.2
2	22.3	985	22.64
3	52.9	3368	15.72
4	17.88	2444	18.07
Середня пропускна здатність системи			20.4

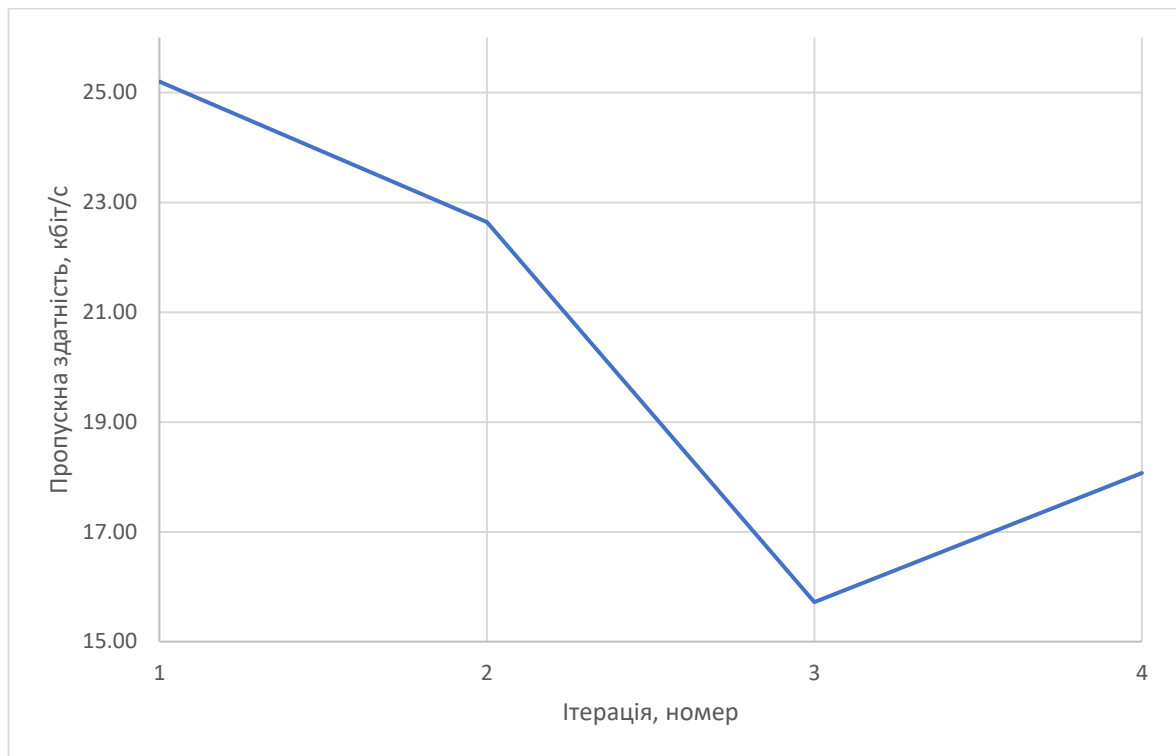


Рисунок 3.7 – Результати тестування пропускної здатності

Результати тестування пропускної здатності структури мережі LoRa Indoor визначили оптимальні параметри передачі даних (рис 3.7). Симуляції в NS-3 показали, що середня швидкість передачі даних між вузлами та шлюзами становить приблизно 466.85 біт/с.

Пропускна здатність у цій системі має стабільний результат, але меншу величину. Це відбувається тому, що ця система має процес введення даних до бази даних. В системі шлюзу LoRa взагалі. Інша перешкода виникає у вигляді втрати пакетів під час процесу передачі даних. Тестування втрати пакетів виконується шляхом поділу даних, що надходять на на шлюз із запитом даних від шлюзу. Результати тестування:

В ідеальних умовах, при мінімальних втратах сигналу та оптимальних параметрах передачі даних, втрати пакетів становили менше 1% (таблиця 3.4). При сценаріях перевантаження втрати пакетів підвищувалися, але залишалися на прийнятному рівні (до 5%). Середня втрата пакетів становить 2.25%. Система виявилася стійкою до певного рівня перевантаження.

Таблиця 3.4 – Результати тестування втрати пакетів.

Номер ітерації	Кількість відправлених пакетів	Кількість отриманих пакетів	Втрата пакетів
1	496	496	<1%
2	502	502	<1%
3	1562	1488	5%
4	1009	990	2%
Середня втрата пакетів			2.25%

Побудуємо графік, на якому показано кількість пакетів, які були відправлені та отримані за кожну з ітерацій. Графічно це можна побачити на рис. 3.8.

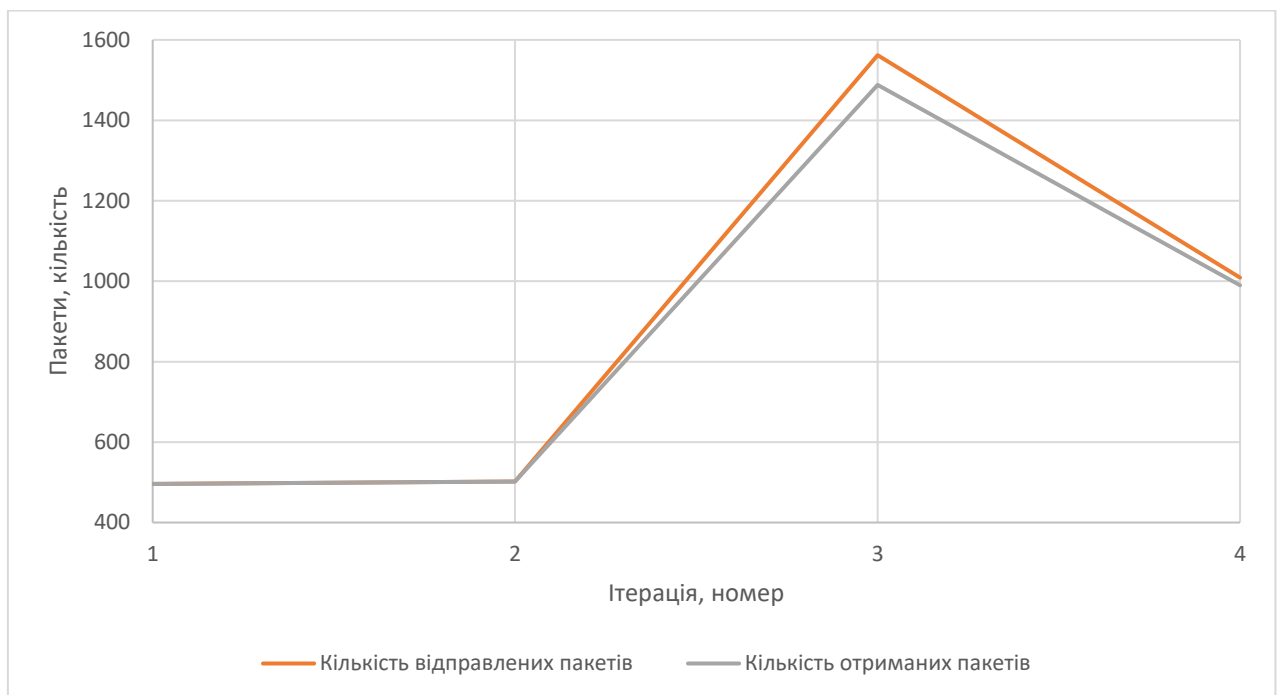


Рисунок 3.8 – Графічне відображення кількості відправлених і втрачених пакетів.

Після покращення параметрів та використання стратегій відновлення, втрати пакетів були мінімізовані навіть у змішаних умовах, що дозволяло системі швидко адаптуватися до змін в навантаженні.

ВИСНОВКИ

У цій роботі отримано результати покриття і розгортання LoRa Indoor мережі. Розгорнуто мережу LoRaWAN з одним шлюзом та двома вузлами. Централізована архітектура обрана як оптимальний варіант для системи моніторингу Lora Indoor. Це забезпечує ефективний збір та обробку даних, а також зручний доступ до інформації. Реляційна база даних обрана для забезпечення структурованого та ефективного зберігання даних. Це дозволяє використовувати SQL-запити для отримання необхідної інформації. Моделювання структури мережі дозволило покращити швидкість передачі даних та забезпечити стійкість до різних умов. При покращенні параметрів та використанні стратегій відновлення, втрати пакетів мінімізовані навіть у вимогливих умовах.

Система може реєструвати та запитувати дані в автоматичному режимі.. Доступ до системи не може бути доступ до системи ззовні локального шлюзу. На основі QoS-тестування, середня пропускна здатність становить 20.4 кбіт/с, а середня втрата пакетів становить 2.25% для 1-метрового діапазону зв'язку. У порівнянні з використанням LoRaWan, пропускна здатність в цій системі має стабільний результат, але менше значення. Це відбувається тому, що ця система має процес введення даних в базу даних, які відсутні в шлюзовій системі LoRa в цілому. Для подальших досліджень краще додати механізм комунікації механізм зв'язку в шлюзах але додавання централізованої мережі може виправити цю проблему. Шифрування та дешифрування також може бути реалізоване щоб покращити безпеку.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. F. Van den Abeele, J. Naehbeqiri, I. Moerman, and J. Hoebeke, “Scalability analysis of large-scale lorawan networks in ns-3,” *IEEE Internet of Things J.*, vol. 4, no. 6, pp. 2186–2198, 2017.
2. Wu Mengdi. *Wireless communication technologies in Internet of Things (IOT) - University of Vaasa*, 2016
3. Мавдрик А. А Дослідження сенсорної мережі з використанням технології LoRa, URL: https://ames.kpi.ua/wp-content/uploads/2021/01/MavdrykAA_magistr.pdf (Дата звернення: 12.03.2024)
4. . Sanchez-Iborra R, Cano M-D. State of the Art in LP-WAN Solutions for Industrial IoT Services. *Sensors*. 2016; 16(5):708.
5. T. M. Workgroup, “What is it ? A technical overview of LoRa and LoRaWan,” no. November, 2015.
6. Jabbar, W.A.; Shang, H.K.; Hamid, S.N.; Almohammed, A.A.; Ramli, R.M.; Ali, M.A. IoT-BBMS: Internet of Things-Based Baby Monitoring System for Smart Cradle. *IEEE Access* 2019, 7, 93791–93805.
7. Jabbar, W.A.; Bin Yuzaidi, M.A.; Yan, K.Q.; Bustaman, U.S.B.M.; Hashim, Y.; AlAriqi, H.T. Smart and green street lighting system based on arduino and RF wireless module. In *Proceedings of the 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)*, Piscataway, NJ, USA, 15–17 April 2019; pp. 1–6
8. Jabbar, W.A.; Wei, C.W.; Azmi, N.A.A.M.; Haironnazli, N.A. An IoT Raspberry Pi-based parking management system for smart campus. *Internet Things* 2021, 14, 100387.
9. Adelantado, F.; Vilajosana, X.; Tuset-Peiro, P.; Martinez, B.; Melià-Seguí, J.; Watteyne, T. Understanding the limits of LoRaWAN. *IEEE Commun. Mag.* 2017, 55, 34–40.
10. Abdelfadeel, K.; Farrell, T.; Pesch, D. How to Make Firmware Updates over LoRaWAN Possible. In *Proceedings of the 2020 IEEE 21st International*

Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), Cork, Ireland, 31 August–3 September 2020; pp. 16–25.

11. Sundaram, J.P.S.; Du, W.; Zhao, Z. A Survey on LoRa Networking: Research Problems, Current Solutions, and Open Issues. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2019, 22, 371–388.

12. Wu, Y.T.; He, Y.G.; Shi, L.Q. Energy-saving measurement in LoRaWAN-based wireless sensor networks by using compressed sensing. *IEEE Access* 2020, 8, 49477–49486.

13. Bor, M.C.; Roedig, U.; Voigt, T.; Alonso, J.M. Do LoRa low-power wide-area networks scale? In *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, Malta, Malta, 13–17 November 2016; pp. 59–67.

14. El Rachkidy, N.; Guitton, A.; Kaneko, M. Collision resolution protocol for delay and energy efficient LoRa networks. *IEEE Trans. Green Commun. Netw.* 2019, 3, 535–551.

15. Wu Mengdi. *Wireless communication technologies in Internet of Things (IOT)* - University of Vaasa, 2016

16. Boano, C.A.; Zúñiga, M.A.; Brown, J.; Roedig, U.; Keppitiyagama, C.; Römer, K. TempLab: A Testbed Infrastructure to Study the Impact of Temperature on Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 13th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, Berlin, Germany, 15–17 April 2014; pp. 95–106.

17. Bor, M.; Vidler, J.; Roedig, U. LoRa for the Internet of Things. In *Proceedings of the 1st International Workshop on New Wireless Communication Paradigms for the Internet of Things (MadCom)*, Graz, Austria, 15–17 February 2016; pp. 361–366.

18. Xiang Feng, Fang Yan, Xiaoyu Liu *Study of Wireless Communication Technologies on Internet of Things for Precision Agriculture*

19. Mukarram A. M. Almuahaya ,Waheb A. Jabbar ,ORCID,Noorazliza Sulaiman andSuliman Abdulmalek A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions

20. LoRa Alliance. LoRa: Wide Area Networks for IoT, 2017 <http://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology>

21. Petajarvi, J.; Mikhaylov, K.; Roivainen, A.; Hanninen, T.; Pettissalo, M. On the coverage of LPWANs: Range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology. In Proceedings of the 2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Copenhagen, Denmark, 2–4 December 2015; pp. 55–59