

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ інфокомунікацій _____
(повна назва)

Кафедра _____ інформаційно-мережної інженерії _____
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

Використання бездротової технології LoRa в системах передачі даних

_____ (тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,
групи ТРИМІ-21-1

Владислав Павличенко

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та
радіотехніка»

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Інформаційно-мережна
інженерія

(повна назва освітньої програми)

Керівник ст. викл. Олександр Бибка

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри _____

(підпис)

Валерій Безрук _____

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування

Студент _____ / Павличенко В.М./

Керівник _____ / Бибка О.І./

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ інфокомунікацій _____
Кафедра _____ інформаційно-мережної інженерії _____
Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____
Спеціальність _____ 172 «Телекомунікації та радіотехніка» _____
Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(код і повна назва)
Освітня програма _____ інформаційно-мережна інженерія _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)
« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Павличенку Владиславу Миколайовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Використання бездротової технології LoRa в системах передачі даних

затверджена наказом університету від 23 травня 2025 р. № 410 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 19 червня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи _____
Дослідити технологію LoRa. Провести аналіз використання технології в сучасних системах передачі даних. З'ясувати принцип впровадження технології та основні виклики під час впровадження.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
Вступ

1. Загальні відомості про технологію LoRa

2. Передумови розвитку технології LoRa

3. Розгортання технології LoRa

4. Зона покриття LoRa для Інтернету речей (IoT)

5. Вимоги до малопотужних застосувань

6. Вартість розгортання

7. Симулятори LoRa

8. Класифікація основних проблем у технології LoRa

9. Виклики технології LoRa

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____
 Слайди у форматі Power Point

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

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Розділи 1-9	ст. викл. Бибка Олександр Іванович		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.	23.05.2025	вик.
2	Підбір літератури за темою роботи	27.05-30.05.2025	вик.
3	Оформлення пояснювальної записки	31.05.-06.06.2025	вик.
4	Оформлення презентаційного матеріалу та підготовка до захисту у ЕК	07.06.-14.06.2024	вик.
5	Подання пояснювальної записки на перевірку	18.06.2024	вик.

Дата видачі завдання 23 травня 2025 р.

Здобувач _____
 (підпис)

Керівник роботи _____ ст. викл. Олександр Бибка.

(підпис)

(посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 57 с., 9 джерел, 1 додаток.

Мета роботи – дослідження технології LoRa; її використання та впровадження в сучасних мережах передачі даних, визначення основних проблем під час впровадження та їх усунення.

Починається робота із загальних відомостей про технології LoRa та огляду на основні характеристики технології. Далі розглядаються принципи впровадження технології з огляду на потреби.

Розглядається технологія LoRa при впровадженні в концепцію Інтернет речей (IoT). Також приділяється увага використанню симуляторів для впровадження LoRa в мережах передачі даних, а саме FLoRa та LoRaSIM. Наостанок, розглядаються ключові проблеми технології та виклики при її впровадженні, їх класифікація та принципи подання із мінімальними витратами.

LORA, ТЕХНОЛОГІЯ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, ІОТ, ВИКЛИКИ, СИМУЛЯТОРИ.

THE ABSTRACT

Explanatory note: 57 p., 9 sources, 1 app.

Purpose of the work – to explore LoRa technology, its application and implementation in modern data transmission networks, identify the main challenges during deployment, and propose solutions for overcoming them.

The work begins with general information about LoRa technology and an overview of its key characteristics. Next, the principles of implementation are considered in the context of specific needs.

The study examines the integration of LoRa technology within the Internet of Things (IoT) concept. Special attention is given to the use of simulators for implementing LoRa in data transmission networks, specifically FLoRa and LoRaSIM. Finally, the key challenges and issues of the technology are analyzed, including their classification and strategies for overcoming them with minimal costs.

LORA, TECHNOLOGY, INTERNET OF THINGS, IOT, CHALLENGES, SIMULATORS.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	9
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТЕХНОЛОГІЮ LORA	10
2 ПЕРЕДУМОВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ LORA	15
2.1 Параметри функціонування технології LoRa	19
2.1.1 Потужність передавання.....	19
2.1.2 Фактор розширення (SF).....	19
2.1.3 Коефіцієнт корекції помилок (Coding Rate)	20
2.1.4 Несуча частота	20
2.1.5 Ширина смуги пропускання	20
3 РОЗГОРТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LORA	21
4 ЗОНА ПОКРИТТЯ LORA ДЛЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ (IOT)	23
5 ВИМОГИ ДО МАЛОПОТУЖНИХ ЗАСТОСУВАНЬ	25
5.1 Тривалий строк автономної роботи батареї	26
5.2 Радіус дії мережі	26
5.3 Обробка трафіку.....	27
5.4 Технологічна складність пристроїв	27
5.5 Всепроникний зв'язок.....	28
5.6 Конфіденційність та безпека	28
6 ВАРТІСТЬ РОЗГОРТАННЯ	30
7 СИМУЛЯТОРИ LORA	32
7.1 FLoRa.....	34
7.2 LoRaSIM	35
8 КЛАСИФІКАЦІЯ ОСНОВНИХ ПРОБЛЕМ У ТЕХНОЛОГІЇ LORA.....	38
8.1 Розподіл мережевих ресурсів	38
8.2 Дальність комунікаційного зв'язку.....	39
8.3 Масштабування та велика кількість пристроїв	39
8.4 Енергоспоживання	40
8.5 Безпека комунікації.....	40
9 ВИКЛИКИ ТЕХНОЛОГІЇ LORA.....	42
9.1 Масштабованість.....	42
9.2. Перешкоди.....	43
9.3 Безпека.....	44
ВИСНОВКИ	45
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	46
ДОДАТОК А СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ	47

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

LoRa – Long Range – Дальній радіус дії

IoT – Internet of Things – Інтернет речей

CSS – Chirp Spread Spectrum – Чирпова спектральна модуляція.

ISM – Industrial, Scientific and Medical – Промисловий, науковий і медичний (діапазон)

SF – Spreading Factor – Фактор розширення спектра

RSSI – Received Signal Strength Indicator

ВСТУП

LoRa — це протокол зв'язку для мереж з великою зоною покриття та низьким енергоспоживанням (LPWAN), що працює в діапазоні ISM (індустріальний, науковий і медичний). Його перевагами є здатність забезпечувати зв'язок на відстані понад 20 кілометрів навіть при дуже низькій потужності передавача — менше 14 дБ. Завдяки цим особливостям технологія LoRa широко використовується як у наукових дослідженнях, так і в реальних комерційних проєктах.

Ключовими складовими платформи LoRa є LoRaWAN та LoRa PHY. Перший компонент — LoRaWAN — визначає архітектуру мережі, процеси підключення пристроїв, робочі частоти та типи сумісного обладнання. Другий — LoRa PHY — стосується фізичного рівня передавання даних, включаючи модуляцію та технічні параметри, й підлягає патентному захисту.

Попри наявність різних LoRa-рішень на ринку, впровадження повноцінних систем залишається складним завданням. Серед основних викликів — ефективне управління з'єднаннями, розподіл обмежених ресурсів, стабільність зв'язку та захист від загроз.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТЕХНОЛОГІЮ LORA

Бездротові сенсорні мережі (WSN) знаходять широке застосування у сферах бізнесу, освіти, транспорту, інфраструктури та безпеки. Вони охоплюють велику кількість географічно розподілених сенсорних пристроїв, які інтегрують функції збору даних, обробки інформації, дії виконавчих механізмів, автономного живлення, зберігання даних, а також передачі та прийому сигналів за допомогою радіозв'язку. Такі пристрої розміщуються у визначеному середовищі для здійснення моніторингу або зчитування параметрів, а зібрана інформація передається на центральний обчислювальний вузол для подальшого аналізу [1].

З огляду на динамічний розвиток Інтернету речей (IoT), очікується зростання інтересу до цієї галузі. Пристрої IoT розроблені для надання сервісів через технології мобільного зв'язку з великою дальністю дії. Актуальні напрямки розвитку IoT включають низькоенергетичні технології широкого покриття (LPWAN), до яких належать такі стандарти та концепції, як Sigfox, LoRa (Long Range), Narrowband Fidelity, Narrowband-IoT (NB-IoT) та Weightless, що поєднує декілька принципів малопотужного бездротового зв'язку [2].

Сучасні IoT-рішення ґрунтуються на використанні інтелектуальних сенсорів, які здатні сприймати зовнішні умови, забезпечувати взаємодію між пристроями та виконувати автономні обчислення. Для реалізації надійного зв'язку між компонентами IoT необхідні бездротові технології, що поєднують стабільність передачі, широкий радіус дії та ефективне енергоспоживання [2].

Однією з перспективних технологій у цьому напрямку є LoRa, яка застосовує унікальну форму модуляції з розширеним спектром — Chirp Spread Spectrum (CSS). Цей підхід дозволяє балансувати між пропускнуою здатністю та чутливістю каналу в межах заданої смуги пропускання. Архітектура LoRa складається з фізичного рівня (PHY), що базується на CSS-модуляції, та рівня

MAC, відповідального за управління доступом до середовища. Технологія функціонує в безліцензійному частотному діапазоні ISM нижче 1 ГГц [1]

LoRa була розроблена LoRa Alliance, міжнародним об'єднанням провідних компаній у сфері бездротових технологій, серед яких Semtech та IBM. Варто зазначити, що модуляція CSS, яку використовує LoRa, є запатентованою. Такий метод забезпечує підвищену стійкість до впливу шумів, перешкод та навмисних завад, що ускладнює виявлення або порушення сигналу. Застосування CSS-модуляції дозволяє розширювати вузькосмуговий сигнал до широкої смуги частот, що зменшує спектральну ефективність, проте підвищує стійкість до викривлень, багатопроменевих ефектів і доплерівських зсувів [3].

З метою налаштування параметрів передачі даних у LoRa використовуються шість факторів розширення (SF7–SF12), які впливають на швидкість обміну даними та радіус покриття. Крім того, передбачено механізм доповнення пакетів даних для підвищення захищеності від шумових перешкод. Зі зростанням фактору розширення зростає й затримка доставки повідомлення [3].

Як і більшість LPWAN-технологій, LoRa підтримує напівдуплексний режим, заснований на принципі «слухати та чекати». Максимальний розмір пакета даних при використанні протоколу LoRaWAN становить 243 байти [3].

Методи розширення спектра привертають значну увагу через свою високу завадостійкість. Передача вважається ефективною, якщо пропускна здатність каналу перевищує необхідний обсяг інформації завдяки використанню модуляції з розширеним спектром.

Розширення смуги частот призводить до загального підвищення ефективності роботи каналу. LoRa забезпечує швидкість передачі даних у межах від 300 біт/с до 37,5 кбіт/с. У 2015 році LoRa Alliance представив стандарт MAC-рівня — LoRaWAN [1]. Деякі технічні характеристики цієї технології наведені в Таблиці 1.

Таблиця 1.1 – Характеристики LoRa

Параметр	Значення
Частотні діапазони	433 МГц, 868 МГц (Європа), 915 МГц (США)
Максимальна дальність зв'язку	До 15 км (відкритий простір), до 5 км (міські умови)
Швидкість передачі даних	Від 0,3 до 50 Кбіт/с
Параметр	Значення
Тип модуляції	Chirp Spread Spectrum (CSS)
Ширина каналу	125, 250 або 500 кГц
Кількість пристроїв на один шлюз	До 1000+
Тип топології мережі	Зірка (через LoRa Gateway)
Потужність передачі	До 20 дБм (залежить від регіонального регулювання)
Шифрування	AES-128
Енергоспоживання	Дуже низьке (до 10 років роботи від батареї)
Протокол мережевого рівня	LoRaWAN
Підтримка адаптивної швидкості (ADR)	Так

Технологія LoRa знаходить широке застосування у промисловості та освітніх системах, демонструючи високу гнучкість для реалізації рішень у сфері Інтернету речей (IoT) . До прикладів використання LoRa в IoT-проектах належать: інтелектуальні енергомережі (smart grids), розумні лічильники, системи вуличного освітлення, інфраструктура розумного міста, моніторинг

якості води, точне сільське господарство, а також контроль температури та стану ґрунту [3].

Ключові переваги технології LoRa:

- LoRa забезпечує розширену зону покриття, яка є достатньою для охоплення великих міських територій.
- Завдяки роботі у неліцензованому радіочастотному спектрі, впровадження LoRa є економічно доцільним.
- Низьке енергоспоживання дозволяє експлуатацію пристроїв без заміни батареї протягом понад п'яти років.

LoRa — це сучасна бездротова технологія, яка функціонує в неліцензованих діапазонах частот нижче 1 ГГц для забезпечення зв'язку на великі відстані. Її модуляційна техніка базується на спектральному розширенні сигналу за допомогою хіп-кодування (CSS), що дозволяє зменшити швидкість передачі даних заради підвищення чутливості приймача. CSS, яка бере свій початок у 1940-х роках, використовувалася переважно у військових системах завдяки високій стійкості до завад та широкому покриттю. LoRa стала першою комерційно доступною та низьковартісною реалізацією CSS. Назва LoRa (Long Range) вказує на основну її перевагу — великий радіус дії, що забезпечується відповідною схемою модуляції у неліцензованому спектрі.

Інфраструктура LoRa застосовує покращені методи модуляції та багатоканальний багатомодемний приймально-передавальний блок, який розміщується у центральній мережі та здатен обробляти велику кількість інформації, що надходить із різних каналів. Крім того, використання різних факторів розширення (SF) для кожного сигналу забезпечує ортогональне розділення каналів, що дозволяє ефективно керувати швидкістю передачі даних.

У контексті технології LoRa, існує залежність між такими параметрами, як об'єм переданих даних, частота хіпсу, швидкість передачі символів і бітова швидкість. Зокрема, бітова швидкість (R_b) визначається наступним співвідношенням:

$$R_b = SF * \frac{1}{[2^{SF} / BW]} \frac{bits}{sec}, \quad (1.1)$$

де SF — фактор розширення (Spreading Factor);

BW — ширина смуги модуляції (Hz).

Як видно з рівняння (1.1), існує обернена залежність між фактором розширення SF і швидкістю передачі бітів R_b , що є важливим для проектування LoRa-пристроїв та базових станцій.

2 ПЕРЕДУМОВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ LORA

Інтернет речей (IoT) є прогресивним етапом еволюції бездротових комунікаційних технологій, де ключову роль відіграють мережі з низьким енергоспоживанням і широким радіусом дії (LPWAN). Однією з провідних запатентованих LPWAN-технологій є LoRa, розроблена компанією SemTech у 2012 році[4].

Архітектура LoRa включає два основні функціональні рівні:

- фізичний рівень (PHY), який базується на модуляції Chirp Spread Spectrum (CSS),
- рівень управління доступом до середовища (MAC), реалізований у вигляді протоколу LoRaWAN.

Модуляція CSS походить від технології Direct Sequence Spread Spectrum (DSS) і дозволяє передавати один біт на хіпп-сигнал, що вимагає ширшого спектра для передачі даних. Унаслідок цього вузькосмуговий сигнал розширюється на більшу смугу частот, що знижує спектральну ефективність, проте суттєво підвищує стійкість до завад, ефекту Доплера та багатопроменевого загасання.

Завдяки використанню ортогональних послідовностей і багатоканальної структури, технологія забезпечує високу ефективність при одночасному передаванні даних. LoRa підтримує різні значення ширини смуги пропускання — 125, 250 або 500 кГц. Частотна модуляція хіпп-сигналів змінюється з часом, хоча фаза між початковим та кінцевим символами зберігається сталою. Якщо ці зміни відбуваються поступово, значна частина енергії передається в межах одного хіппу, що дозволяє приймачу декодувати сигнал при рівні до -19,5 дБ відносно шуму [4].

Основні переваги технологій LPWAN — енергетична ефективність, широке покриття та масштабованість. Більшість таких технологій функціонують у неліцензованому діапазоні частот нижче 1 ГГц (ISM-діапазон),

який використовується пристроями короткого радіусу дії — наприклад, дзвінками, ідентифікаційними системами, радіовимірювальними приладами, RFID, мобільними рішеннями, системами сигналізації та сенсорними пристроями. У цьому ж спектрі працюють й інші технології, зокрема IEEE 802.15.4g, Z-Wave, IEEE 802.11ah та IEEE 802.15.4 [4].

Протокол LoRaWAN, розроблений LoRa Alliance, регламентує специфіку функціонування LoRa-систем [1]. Він орієнтований на енергозалежні кінцеві пристрої, які, як правило, живляться від батарей. У топології «зірка в зірці», шлюзи (які також можуть виступати у ролі колекторів або точок доступу) здійснюють комунікацію між кінцевими пристроями та головним мережевим сервером. Передача даних між кінцевими пристроями і шлюзами здійснюється за допомогою односкокового зв'язку через LoRa або FSK, тоді як обмін даними між шлюзами та мережевим сервером відбувається за допомогою стандартного IP-протоколу [4].

Кінцеві пристрої використовують різні канали та швидкості передачі, які реалізуються в межах неліцензованого спектру ISM. Якість обслуговування (QoS) залежить від правильного вибору та комбінації частотних піддіапазонів. Сучасні алгоритми динамічного керування потоками дозволяють адаптувати швидкість передачі даних та частоти до конкретних умов, тим самим підвищуючи енергоефективність та зменшуючи навантаження на смугу пропускання [4].

Кожна передача даних від кінцевого пристрою здійснюється через псевдовипадково обраний канал, що допомагає зменшити рівень радіоперешкод. Крім того, пристрої забезпечують дотримання обмежень щодо тривалості передачі сигналу та робочого циклу, що встановлені для відповідного піддіапазону згідно з регіональними нормативами [4].

LoRaWAN, як і будь-який інший стандарт, що працює в діапазоні ISM-частот, повинен дотримуватись регуляторних норм, встановлених відповідно до країни чи регіону, в якому розгорнута мережа. Окрім цього, оператор LoRa-

мережі має змогу самостійно визначати, на яких каналах пристрої можуть здійснювати обмін даними — в межах доступних піддіапазонів.

Завдяки мінімальній ортогональності між сценаріями використання LPWA і коефіцієнтами розширення (spreading factors), дозволяється одночасна передача кількох сигналів на одному каналі. LoRaWAN також вводить додаткові правила, наприклад, заборону повторного використання піддіапазону протягом часу.

Це запобігає надмірній активності вузла на одному піддіапазоні до досягнення допустимого ліміту робочого циклу. Така вимога також поширюється на шлюзи, що підсилює потребу у зменшенні обсягу трафіку в напрямку вниз (downlink) [1].

LoRaWAN підтримує три класи пристроїв:

- Клас А забезпечує найпростішу схему взаємодії;
- Клас В дозволяє складнішу взаємодію та підтримує синхронізовані прийомні вікна;
- Клас С працює подібно до Класу А, але додатково забезпечує постійний режим прийому, коли пристрій не передає дані.

Після вибору каналів і налаштувань, пристрій може підключитися до шлюзу, використовуючи просту ALOHA-подібну схему доступу до середовища. Вищий коефіцієнт розширення означає більшу кількість хіпів на символ, що, у свою чергу, призводить до збільшення енергоспоживання на пакет. Таким чином, існує обернено пропорційна залежність між дальністю до точки доступу та тривалістю роботи пристрою.

Таблиця 2.1 демонструє, скільки часу витрачається на передачу однакових пакетів за різних коефіцієнтів розширення. Проте ефективність роботи мережі LoRaWAN обмежується не лише регіональними нормативами та додатковими обмеженнями самого протоколу LoRaWAN, а й недоліками ALOHA-подібного методу доступу до середовища, який виявляється малоприсадибним у перевантажених або густонаселених мережах [5].

Таблиця 2.1 – Коефіцієнт розширення LoRa

Фактор розширення	Кількість пакетів	Тривалість передачі (мс)	Смуга пропускання (кГц)	Чірпів на символ
7	417	71,936	125	128
8	224	133,632	125	256
9	121	246,784	125	512
10	66	452,608	125	1024
11	30	987,136	125	2048
12	16	1810,432	125	4096

LoRaWAN функціонує в неліцензованому діапазоні частот, що дозволяє уникати завад та забезпечувати оптимальні спектральні характеристики. Крім того, частотний діапазон роботи відрізняється в залежності від країни.

Таблиця 2.2 демонструє частоти, на яких технологія LoRa використовується в різних регіонах світу.

Користувачі можуть перевірити відповідні частоти для своїх потреб за допомогою інструменту Radio Planner.

Таблиця 2.2 – Частотні діапазони LoRa в різних регіонах

Регіон	Діапазони частот (МГц)
Європейський Союз	433
Північна Америка	902–928
Австралія	915–928
Китай	470–510
Японія	920–925
Корея	920–925
Індія	865–867
Європа	863–870

2.1 Параметри функціонування технології LoRa

Для досягнення оптимального балансу між ефективністю передавання даних та енергоощадністю, модулі LoRa можуть бути налаштовані з урахуванням кількох ключових параметрів зв'язку, серед яких: потужність передавача, ширина смуги пропускання, несуча частота, коефіцієнт корекції помилок (Coding Rate) та фактор розширення (Spreading Factor, SF).

2.1.1 Потужність передавання

Радіомодулі LoRa підтримують регулювання вихідної потужності у діапазоні від 4 до 20 дБм з кроком 1 дБ. Проте через апаратні обмеження на практиці використовують переважно значення від 2 до 20 дБм. Потужності понад 17 дБм, згідно з фізичними обмеженнями пристрою, допускаються лише за умови обмеження робочого циклу до 1% [5].

2.1.2 Фактор розширення (SF)

Фактор розширення визначає кількість чипів на символ у сигналі. Зі збільшенням SF зростає енергетична потужність сигналу, що підвищує чутливість приймача та розширює зону покриття. Водночас збільшується тривалість передавання пакету. Кількість чипів на символ становить 2^{SF} у степені SF, наприклад, для SF=12 використовується 4096 чипів. Зростання значення SF зменшує швидкість передачі даних вдвічі та збільшує споживання енергії. SF може змінюватись від 6 до 12, причому сигнали з різними SF є взаємно ортогональними, що дозволяє їх одночасну роботу в одній мережі [5].

2.1.3 Коефіцієнт корекції помилок (Coding Rate)

Коефіцієнт корекції помилок визначає рівень захисту переданих даних від впливу перешкод. LoRa підтримує коефіцієнти 4/5, 4/6, 4/7 та 4/8, де вищі значення забезпечують більшу стійкість, але водночас збільшують час передавання. Код корекції помилок вказується у преамбулі пакета, яка, як правило, передається з коефіцієнтом 4/8. Завдяки цьому пристрої з різними кодами можуть взаємодіяти між собою.

2.1.4 Несуча частота

Несуча частота визначає основний діапазон роботи LoRa-модуля. Вона може бути налаштована з кроком 61 Гц у межах від 137 до 1020 МГц, залежно від використовуваної мікросхеми. На практиці більшість пристроїв функціонують у діапазоні від 860 до 1020 МГц [5].

2.1.5 Ширина смуги пропускання

Смуга пропускання визначає ширину каналу зв'язку. Ширша смуга забезпечує вищу швидкість передавання, але знижує чутливість приймача. Натомість вузла смуга покращує чутливість, однак обмежує пропускну здатність. При зменшенні ширини смуги зростають вимоги до точності генератора частоти. Швидкість чипів визначається смугою каналу — наприклад, 500 кГц відповідає швидкості 500 кбіт/с. Підтримувані значення — від 7.8 до 500 кГц, при цьому типово застосовуються 125, 250 та 500 кГц [5].

3 РОЗГОРТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LORA

Сьогодні технологія LoRa демонструє стрімке зростання популярності у сфері бездротових комунікацій завдяки своїм унікальним властивостям, серед яких вирізняються велика дальність передачі сигналу, низьке енергоспоживання, економічна доцільність реалізації та підтримка роботи в неліцензованих діапазонах частот. Широка доступність апаратного забезпечення, а також відкритість архітектури протоколів LoRa/LoRaWAN забезпечили швидкий розвиток експериментальних прототипів і дослідних зразків, що дозволяє прискорити впровадження нових розробок у практику.

Використання LoRa охоплює широкий спектр прикладних сфер, включаючи інтелектуальні сільськогосподарські рішення, системи обліку ресурсів, екологічний моніторинг, побутову автоматизацію та багато інших напрямів. У сільському господарстві технологія забезпечує ефективне віддалене спостереження за великими територіями, збирання даних про стан ґрунту, температуру, вологість та інші параметри, що мають ключове значення для агрономічного аналізу та прийняття рішень. Впровадження таких систем дозволяє оптимізувати витрати ресурсів, підвищити врожайність та знизити людські трудовитрати.[5]

У сфері енергетики LoRa дає змогу створювати розумні системи обліку споживання електроенергії, газу чи води з мінімальним енергоспоживанням. Такі системи можуть функціонувати автономно протягом тривалого часу, забезпечуючи періодичну передачу даних без необхідності постійного обслуговування. Це значно зменшує експлуатаційні витрати та дозволяє створити масштабовані енергетичні рішення.[5]

У системах екологічного моніторингу LoRa використовується для спостереження за якістю повітря, температурними змінами, рівнем шуму, викидами шкідливих речовин та іншими факторами довкілля. Надійність передачі даних навіть за умов слабого сигналу дозволяє розміщувати датчики

у важкодоступних або віддалених районах, де інші типи бездротового зв'язку можуть бути неефективними.[5]

Автоматизація побутових процесів, зокрема керування електроприладами, освітленням, системами безпеки або клімат-контролю, також активно інтегрує LoRa-рішення. Передавання даних між пристроями в межах будинку чи кварталу здійснюється стабільно, з низькою затримкою та незначним споживанням енергії.[5]

Окрім того, технологія знайшла застосування у водному господарстві, зокрема у створенні систем автоматизованого поливу. Завдяки здатності передавати дані на значні відстані при низькому енергоспоживанні, LoRa є надзвичайно корисною для моніторингу та керування зрошувальними системами у віддалених сільських районах.[5]

Усі вищезгадані приклади демонструють високу гнучкість, адаптивність і масштабованість LoRa, що робить її ефективним рішенням для побудови сучасних систем Інтернету речей у найрізноманітніших сферах людської діяльності.

4 ЗОНА ПОКРИТТЯ LORA ДЛЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ (ІОТ)

Ефективність зони покриття технології LoRa можна оцінювати за допомогою низки технічних показників, серед яких основними є рівень потужності переданого сигналу, співвідношення сигналу до шуму (SNR), а також швидкість успішної передачі пакетів даних. Співвідношення сигнал/шум є надзвичайно важливою характеристикою, оскільки дозволяє визначити якість бездротового з'єднання з урахуванням впливу зовнішніх атмосферних факторів та середовища розповсюдження сигналу [6].

Зона дії мережі, побудованої на базі LoRa, залежить від декількох ключових параметрів, включаючи тип використовуваної архітектури (наприклад, пряме з'єднання між пристроями або взаємодія через базову станцію або шлюз), відстань між пристроями, розташування антен, особливості топографії місцевості, а також від загального планування мережевої інфраструктури. У контексті розумного міста (Smart City) пристрої, які функціонують у складі IoT-систем, повинні обслуговувати зони з різною площею покриття залежно від поставлених завдань. Ці вимоги тісно пов'язані з особливостями розробки та проектування платформи.

Наприклад, у системах охорони здоров'я, що забезпечують дистанційний моніторинг стану пацієнтів, передбачається наявність постійного зв'язку між пристроєм контролю (наприклад, носимим сенсором) і центральним вузлом, розміщеним у лікарні чи центрі обробки даних. Це вимагає стабільного та безперебійного з'єднання. Водночас інші сценарії, як-от відстеження стану пацієнта під час переміщення, потребують підтримки високої якості сигналу протягом усієї траєкторії руху пристрою [6].

У транспортних і муніципальних системах — таких як керування вуличним освітленням або контроль мобільності в міських умовах — пристрої зазвичай встановлюються на фіксованій відстані один від одного. Наприклад, оптимальна дистанція між вуличними ліхтарями становить приблизно 35 метрів

[6], що диктує потребу в гарантованому стабільному зв'язку між точками в межах цієї зони. У розумних паркувальних системах індикатор потужності сигналу RSSI може використовуватись для оцінки розташування транспортного засобу. Якщо рівень RSSI є високим, це вказує на те, що автомобіль знаходиться в безпосередній близькості до доступного паркомісця [6].

У технології LoRa існує взаємозв'язок між трьома основними параметрами передачі даних — це пропускна здатність каналу, обсяг переданого корисного навантаження (payload) та фактор розширення (Spreading Factor, SF). На основі моделювання й практичних вимірювань, встановлено, що при збільшенні SF спостерігається зменшення пропускної здатності та обсягу пакета, що передається, оскільки більше часу витрачається на передачу одного символу. Наприклад, при встановленому значенні $SF = 7$ і ширині каналу 125 кГц на частоті 868 МГц, пропускна здатність становить приблизно 5470 біт/с, а розмір передаваного пакета — 230 байт. Якщо ж SF збільшується до 12, то швидкість передачі різко знижується до близько 250 біт/с, а обсяг пакета — до 59 байт.

Таким чином, хоча підвищення фактору розширення дозволяє досягти більшої дальності зв'язку та підвищеної стійкості до шумів, це супроводжується зменшенням швидкості передачі та ефективності використання каналу. Вибір параметрів залежить від конкретних вимог застосування — чи то максимальна дальність, чи мінімальна затримка в передачі.

5 ВИМОГИ ДО МАЛОПОТУЖНИХ ЗАСТОСУВАНЬ

Сучасні рішення у сфері бездротових мереж із низьким енергоспоживанням охоплюють широкий спектр різноманітних сценаріїв використання, що зумовлює істотну варіативність у технічних вимогах та характеристиках пристроїв. Такі пристрої можуть працювати на різних відстанях — від дуже коротких (кілька метрів) до досить великих (десятки кілометрів), бути встановленими стаціонарно або пересуватися, отримувати живлення від батарей або підключатися до електромережі, а також функціонувати в різних середовищах — як у сприятливих, так і в екстремальних умовах [7].

У певних ситуаціях, наприклад, при стаціонарному встановленні всередині будівель, охоплення може бути обмеженим лише невеликою площею. Однак у випадках, коли йдеться про переміщення об'єктів — таких як транспортні засоби або обладнання на відкритих просторах, — потрібне безперервне та стабільне покриття всієї зони, де працюють пристрої [10]. У порівнянні з критично важливими IoT-сервісами, які вимагають мінімальної затримки сигналу та дуже високого рівня надійності, більшість широкомасштабних IoT-рішень не потребують таких жорстких вимог. Вони, як правило, передають короткі повідомлення, можуть працювати із затримкою, не потребують високої пропускної здатності каналу та мають невеликі вимоги до енергоспоживання та вартості [7].

Усі ці характеристики можуть бути сформульовані як перелік базових вимог для побудови ефективної малопотужної бездротової інфраструктури. Серед таких вимог — здатність обробляти трафік між машинами (M2M), забезпечення високої масштабованості системи, ефективне енергозбереження, малопотужна робота пристроїв, розширене покриття території, збереження конфіденційності даних, а також забезпечення взаємодії між різними технологіями [7].

5.1 Тривалий строк автономної роботи батареї

Пристрої Інтернету речей повинні функціонувати протягом тривалого часу без потреби в частій заміні або заряджанні батарей, навіть за відсутності регулярної взаємодії з користувачем. Для досягнення цього в деяких проєктах застосовувались мережеві архітектури типу "mesh" — особливо в обмежених середовищах. Проте така модель вимагає більших витрат на реалізацію, а також створює ризики швидкого розряду батарей у пристроях, які беруть на себе навантаження з повторної передачі даних [7].

Альтернативним підходом є використання "зіркоподібної" топології мережі, яка передбачає прямий зв'язок кінцевого пристрою з центральним вузлом (наприклад, шлюзом). Це дозволяє суттєво зменшити енергоспоживання і забезпечити покриття на великих відстанях із мінімальними витратами енергії, що є особливо важливим для пристроїв із живленням від батарей [90]. Тому для малопотужних бездротових мереж доцільно використовувати зіркоподібну топологію.

5.2 Радіус дії мережі

Технології LPWAN повинні забезпечувати стійкий бездротовий зв'язок на великих відстанях. Зокрема, у сільській місцевості очікується покриття в діапазоні 10–40 км, тоді як в умовах міста — від 1 до 5 км. Це вимагає вищого рівня потужності сигналу — приблизно на 20 децибелів більше, ніж у звичайних мобільних мережах [6].

Крім того, деякі сценарії передбачають передачу даних у складнодоступних місцях — наприклад, у тунелях, підземних сховищах або щільно забудованих зонах. Мережа повинна також підтримувати адаптивне регулювання швидкості зв'язку та контролювати рівень помилок у переданих даних. Частоти нижчого діапазону, зокрема субгігагерцові, краще проникають крізь перешкоди та забезпечують стабільніше з'єднання з меншими витратами

енергії. Це робить їх придатними для створення масштабної національної інфраструктури. Важливо також, щоб пристрої легко інтегрувалися в мережу й були сумісні з іншими системами [6].

5.3 Обробка трафіку

Звичайні сценарії використання малопотужних бездротових мереж передбачають обробку даних, що генеруються розподіленими пристроями. Ці дані значно відрізняються за обсягом, частотою передачі та вимогами до надійності в порівнянні з мобільними телефонами чи комп'ютерами. Наприклад, для деяких застосувань прийнятною є затримка у передачі даних, у той час як інші — як-от виявлення пожеж, витоків газу чи системи охорони житла — потребують миттєвої доставки критично важливої інформації [7].

5.4 Технологічна складність пристроїв

Одним із пріоритетів у розробці сучасних IoT-пристроїв є зменшення їхньої технічної складності та фізичних розмірів. Це необхідно для забезпечення масштабованості, простого технічного обслуговування та розгортання мережі на великих територіях. Простіша конструкція пристроїв дозволяє також знизити споживання енергії, що є критично важливим для автономних пристроїв з живленням від батарей. Проте зменшення складності може знижувати продуктивність і функціональність [7].

Пристрої повинні мати обмежену обчислювальну потужність, підтримувати прості протоколи зв'язку та бути програмно адаптивними, щоб забезпечити гнучкість у використанні для різних цілей [7].

5.5 Всепроникний зв'язок

Однією з основних характеристик IoT є здатність забезпечувати безперервний доступ до даних і пристроїв у будь-який момент і в будь-якому місці. Враховуючи, що кількість IoT-пристроїв у світі вже перевищила кількість мобільних абонентів, здатність мереж обробляти надзвичайно велику кількість підключень є критично важливою.

Оскільки концентрація пристроїв у мережі може змінюватися в залежності від часу і місця, система повинна вміти масштабуватися для підтримки великого числа з'єднань одночасно. Крім того, пристрої мають бути сумісні з іншими технологіями та мережами, що використовують ті ж самі частотні діапазони, щоб уникнути конфліктів і зниження ефективності сервісу. Це означає, що система має підтримувати взаємодію між різними типами пристроїв і забезпечувати стабільну роботу в умовах перешкод. Для досягнення цього потрібна міжмережева інтеграція та підтримка стандартів взаємодії.

5.6 Конфіденційність та безпека

Малопотужні бездротові мережі, що складаються з великої кількості пристроїв, які можуть бути вразливими до зовнішніх впливів, потребують високого рівня захисту. Необхідно реалізувати механізми автентифікації, верифікації, контролю доступу, забезпечення цілісності та конфіденційності даних, а також захисту від фальсифікації.

Система безпеки повинна ефективно боротися з такими загрозами, як віруси, хакерські атаки, перехоплення трафіку, злом даних і атаки типу «відмова в обслуговуванні». Також важливо захистити ідентичність і місцезнаходження пристроїв від несанкціонованого доступу. Захист має бути реалізований як для переданих, так і для отриманих даних. Таким чином, інфраструктура повинна враховувати як вимоги до конфіденційності, так і до

безпеки, щоб забезпечити надійне середовище для роботи різних IoT-застосувань [7].

Загальний захист має бути гарантований на рівні LPWAN-мережі, тоді як додаткові функції шифрування або автентифікації можуть впроваджуватись на прикладному рівні [7].

6 ВАРТІСТЬ РОЗГОРТАННЯ

Підходи до бездротового зв'язку з низьким енергоспоживанням здебільшого базуються на досягненні балансу між трьома ключовими факторами: загальною вартістю системи, доступною шириною пропускну каналу зв'язку та витратами, пов'язаними з монтажем і впровадженням інфраструктури. Часто саме обмеження фінансових ресурсів називають однією з головних причин, що гальмують масове впровадження новітніх технологічних рішень. У зв'язку з цим необхідно прагнути до мінімізації витрат на закупівлю обладнання та розгортання мереж, а також зменшення вартості самого пристрою. Зокрема, бажано уникати потреби у використанні GSM-чипів, які можуть значно підвищити вартість кінцевого продукту.

Крім того, інфраструктура, яка підтримує функціонування таких систем, повинна бути максимально спрощеною, легкою в управлінні й обслуговуванні. Будь-яке ускладнення технічної або програмної складової автоматично призводить до збільшення витрат на її розгортання та подальшу експлуатацію. Саме тому як апаратна частина, так і програмне забезпечення «інтелектуальних» пристроїв мають бути простими, ефективними й недорогими [8].

У контексті бездротових технологій із низьким енергоспоживанням важливу роль відіграють не лише витрати на створення самої системи, але й постійні експлуатаційні витрати. Масовий характер використання подібних пристроїв передбачає встановлення величезної кількості окремих гаджетів, що, у свою чергу, висуває жорсткі вимоги до зниження як первинної вартості обладнання, так і регулярних витрат на його підтримку. Також надзвичайно важливо забезпечити низький рівень енергоспоживання для продовження терміну служби пристроїв.

Однією з ключових функціональних характеристик таких рішень має бути можливість віддаленого оновлення програмного забезпечення без

необхідності фізичної заміни пристроїв або втручання у їх роботу. Окрім цього, сучасні системи повинні забезпечувати високий рівень гнучкості, бути легкими у впровадженні, обслуговуванні та масштабуванні, що дозволить зменшити технічну складність та сукупну вартість володіння [8].

7 СИМУЛЯТОРИ LORA

Проектування мережевої архітектури з урахуванням конкретних технічних характеристик — це складний та багатоетапний процес. Він вимагає врахування того, що визначені параметри мають бути не винятковими чи надлишковими, а цілком відповідати конкретним умовам застосування чи обраній сфері використання. Це означає, що вони мають бути достатніми для ефективної роботи в обраному сценарії, але не повинні бути надмірно спеціалізованими або ускладненими. З огляду на ці виклики, надзвичайно важливим є використання симуляторів, які дозволяють моделювати поведінку мережі ще до її фактичного впровадження.

Комп'ютерне моделювання та створення прототипів є потужними інструментами, які дають змогу краще зрозуміти, як працює система в різних умовах, а також дозволяють експериментувати з різними варіантами її конфігурації. Завдяки симуляціям можна не лише аналізувати поточну ефективність системи, а й передбачати її поведінку у майбутньому, вивчати нестандартні або критичні сценарії, не наражаючи реальну інфраструктуру на ризик.

Підхід до моделювання зазвичай базується на використанні обчислювальних методів, що включають елементи фізики, математики, а також інженерні формули, які разом допомагають описати і передбачити поведінку системи. Це дозволяє створювати умовні, але наближені до реальності сценарії, у яких можна досліджувати характеристики системи, не витрачаючи ресурси на фізичні експерименти.

Щоб симулятор був справді ефективним і корисним, його розробник повинен надати користувачам гнучкі налаштування. Зокрема, має бути можливість обирати тип мережевої архітектури, встановлювати основні параметри для кожної мережевої станції або пристрою, визначати зв'язки між

ними, задавати потенційні моделі передавання даних (трафіку) та вибирати способи маршрутизації інформації в мережі.

У випадку з технологією LoRa (Long Range), симулятори мають ще більшу цінність. Вони дозволяють розробляти, аналізувати й оптимізувати LoRa-застосунки до того, як буде прийнято рішення про фактичне розгортання фізичної інфраструктури. Таким чином, можна уникнути зайвих витрат на дорогі установки на ранніх етапах проєкту.

Сфера LoRa-технологій сьогодні пропонує широкий вибір симуляторів з відкритим вихідним кодом, які є потужними інструментами для моделювання. Багато з цих програмних рішень були створені спеціально для чисельного моделювання, тобто для математичного аналізу та вивчення різноманітних сценаріїв використання мереж LoRa. Вони активно використовуються для тестування, порівняння продуктивності та налаштування параметрів мереж у найрізноманітніших умовах.

Для того щоб точно сформулювати вимоги до системи та врахувати всі особливості середовища, в якому вона функціонуватиме, користувачам насамперед необхідно чітко й докладно описати задачу або проблему, яку потрібно вирішити. Це початкове формулювання має бути достатньо повним, щоб створити основу для подальшого моделювання.

Після цього логічним наступним кроком є створення симуляційної моделі всієї системи. На цьому етапі моделювання допомагає визначити основні параметри, ключові впливові чинники та здійснити тонке налаштування системи відповідно до попередньо визначених вимог. Це дозволяє дослідити, як система поводитиметься в різних умовах, і оптимізувати її ще до фактичного впровадження.

Після завершення етапу моделювання відбувається запуск експерименту — симуляції, яка імітує роботу системи. У процесі спостереження за результатами моделювання користувачі отримують важливі дані щодо ефективності та поведінки системи у віртуальному середовищі.

На завершальному етапі, коли результати експерименту вже доступні, користувачі мають кілька варіантів дій. Вони можуть повторити увесь цикл спочатку, внівши корективи відповідно до рекомендацій або висновків, які надає симуляційна програма. Іншим варіантом є зупинити процес моделювання й перейти до глибокого аналізу вже отриманих результатів для формування остаточних висновків щодо поведінки системи.

На сьогодні відома ціла низка спеціалізованих симуляторів, які дозволяють ефективно виконувати моделювання в рамках технології LoRa. Серед найбільш відомих і широко використовуваних симуляційних платформ варто відзначити PhySimulator, FLoRa та LoRaSim. Усі ці інструменти надають можливість глибокого аналізу різних сценаріїв, що стосуються роботи LoRa-мереж.

7.1 FLoRa

FLoRa є спеціалізованим симулятором, створеним для моделювання мереж LoRa, який базується на платформі OMNeT++ — одному з найпоширеніших інструментів для імітації дискретно-подійних систем. Цей інструмент активно використовується в академічному середовищі завдяки відкритому коду та безкоштовній ліцензії для дослідницьких та некомерційних цілей відповідно до умов Creative Commons. У своїй структурі FLoRa також використовує компоненти з INET Framework — відкритої бібліотеки, яка значно розширює можливості OMNeT++ у моделюванні мережевих протоколів різного типу.

Програмний код FLoRa реалізований мовою програмування C++, що забезпечує високу гнучкість і розширюваність. Цей симулятор дозволяє створювати повноцінні віртуальні моделі мереж LoRa, де реалізовано підтримку таких важливих функцій, як адаптивне регулювання швидкості передачі даних (ADR). Завдяки використанню ADR можливо оптимізувати енергоспоживання кінцевих пристроїв і водночас підвищити коефіцієнт

успішної доставки пакетів (PDR), що є критично важливим для стабільності роботи мережі.

Архітектура FLoRa складається з ряду функціональних модулів, зокрема: кінцевих пристроїв, шлюзів, серверної частини мережі та блоків, що реалізують прикладну логіку. Модулі мережі підтримують гнучке налаштування конфігурацій у динаміці, враховуючи такі параметри, як колізії в каналі, параметри ADR та характеристики середовища передачі сигналів. Симулятор також дозволяє точно змодельовати взаємодію між шлюзами та центральним сервером (так звану backhaul-мережу), а також підтримує одночасну роботу декількох шлюзів у межах одного експерименту. Після завершення симуляції користувач може отримати деталізовані дані про рівень енергоспоживання як окремих елементів мережі, так і системи загалом.

Разом із симулятором постачається типовий експериментальний сценарій, що зберігається в папці FLoRa experiment.

Перед запуском моделювання користувач повинен визначити низку параметрів, зокрема: тривалість симуляції, тривалість прогріву, значення параметра розширення спектра (SF — spreading factor), рівень потужності сигналу кожного пристрою, структуру та характеристики мережі backhaul, а також типи з'єднань у системі.

Після завершення моделювання FLoRa автоматично створює файли зі зведеними метриками та трасуванням подій, які можна візуалізувати за допомогою зручного графічного інтерфейсу OMNeT++. Це дозволяє переглядати динаміку передачі пакетів, рівень колізій, графіки використання енергії та інші ключові параметри мережі.

7.2 LoRaSIM

LoRaSIM — це спеціалізований дискретно-подійний симулятор, реалізований за допомогою бібліотеки SimPy. Бібліотека SimPy створена на мові програмування Python і дозволяє описувати процеси у вигляді генераторів,

які можуть моделювати активні компоненти системи, такі як користувачі, транспортні засоби, агенти тощо. Крім того, SimPy містить низку засобів для моделювання спільно використовуваних ресурсів — наприклад, перевантажених зон із обмеженою пропускнуою здатністю, таких як сервери, каси або тунелі.

Окрім цього, LoRaSIM підтримує двовимірне розміщення вузлів LoRa на сітці. Сам симулятор написаний на Python версії 2.7 і використовує додаткові бібліотеки: SimPy (для симуляції), NumPy (для математичних операцій) та Matplotlib (для побудови графіків). У складі програми передбачено чотири різні варіанти симуляцій, кожен з яких фокусується на певних аспектах мережі або характеристиках вузлів. Симулятор дозволяє проводити моделювання як для одного базового шлюзу, так і для сценаріїв із кількома (до чотирьох) шлюзами.

Також у симуляторі передбачено можливість моделювання терміналів із різними типами антен, зокрема з направленими антенами — для цього використовуються окремі конфігураційні файли. Користувач має змогу змінювати широкий перелік параметрів: кількість вузлів, кількість базових станцій, тип колізійної моделі (детальна чи спрощена), кількість мереж, які потрібно перевірити, тривалість симуляції, а також відстань між базовими станціями.

Після запуску симуляції, якщо параметр візуалізації (visuals) встановлено в значення 1, програма виводить певні графіки. Однак основний обсяг результатів представлений у текстовому вигляді в командному рядку, а також експортується у файл із розширенням .dat (наприклад, expX.dat). Графічний інтерфейс у LoRaSIM відсутній, за винятком побудови графіків — усі дії виконуються через командний рядок.

Оскільки початкові версії LoRaSIM підтримували лише симуляцію висхідної лінії зв'язку (uplink), з часом були запропоновані покращення, які дозволили розширити його функціональність і додати підтримку низхідної передачі (downlink). Завдяки цьому симулятор може використовуватись для оцінювання таких показників ефективності, як споживання електроенергії або

здатність мережі до масштабування. Результати виводяться на екран командного рядка та зберігаються у файлах типу Name.dat, які можна згодом обробити за допомогою різноманітних програм для графічного аналізу.

8 КЛАСИФІКАЦІЯ ОСНОВНИХ ПРОБЛЕМ У ТЕХНОЛОГІЇ LORA

Сучасні дослідження в галузі бездротових технологій виявляють цілу низку технічних та практичних труднощів, пов'язаних із застосуванням LoRa (Long Range) – перспективної технології для створення енергоефективних мереж з великим радіусом дії. Зокрема, дослідники зосереджуються на аналізі ключових проблем, що виникають під час впровадження LoRa-інфраструктури, а також оцінюють, яким чином ці обмеження впливають на загальну ефективність та стабільність мережі.

8.1 Розподіл мережевих ресурсів

Однією з центральних технічних задач у роботі LoRa-мереж є грамотне управління наявними мережевими ресурсами, а саме — узгодження часу активності приймальних вікон точок доступу з періодами передавання сигналів кінцевими пристроями. Особливість полягає в тому, що вікна прийому на базових станціях не можуть бути відкритими постійно, оскільки вони вмикаються лише у визначені моменти для фіксації надходження даних [9].

Крім цього, кінцеві пристрої, що працюють на обмежених джерелах живлення (наприклад, батарейках), також не можуть перебувати у стані постійного передавання чи прослуховування каналу через потребу в економії енергії. Відтак виникає певний розрив у часі, який необхідно оптимізувати. Така невідповідність створює додаткове навантаження на мережу, особливо в умовах великої кількості підключених пристроїв.

Для вирішення цієї проблеми застосовуються адаптивні методи управління логічними та частотними каналами, які дозволяють організувати одночасну роботу численних пристроїв без збоїв.

8.2 Дальність комунікаційного зв'язку

Одна з головних переваг архітектури LoRa полягає в її здатності передавати сигнали на великі відстані, навіть у складних умовах. Ця здатність забезпечується завдяки використанню технології частотних чирпів (chirp spread spectrum), яка дозволяє зменшити вплив шумів і перешкод. LoRa може ефективно функціонувати в багатьох типах середовищ: від житлових приміщень і лікарень до природних ландшафтів, таких як ліси чи сільськогосподарські угіддя.

Проте варто враховувати, що кінцеві пристрої можуть розміщуватися в різних умовах — від відкритого простору до будівель із товстими стінами з цегли або металу, які значно екранують радіосигнал. У таких ситуаціях виникають проблеми, пов'язані із загасанням сигналу, втратою під час передавання та багатопроблемним розсіюванням.

Для покращення проникності сигналу та підвищення доступності LoRa-мережі необхідно враховувати умови встановлення обладнання і впроваджувати адаптивні технічні рішення. Додатково було виявлено, що деякі шлюзи здатні фіксувати сигнали, однак не в змозі їх коректно розпізнати через низький рівень сигналу. Відповідно, постає задача розробки технологій дешифрування слабких сигналів для подовження ефективного діапазону передавання. Поряд із цим, досить складною є точна оцінка покриття мережі у реальних умовах експлуатації[9].

8.3 Масштабування та велика кількість пристроїв

У зв'язку з тим, що технологія LoRa активно використовується для підключення великої кількості розумних пристроїв (сенсорів, трекерів, контролерів), постає питання про ефективне масштабування мережі. Зокрема, в умовах густонаселених міських районів, де десятки тисяч пристроїв можуть намагатися одночасно обмінюватися даними, необхідно застосовувати

додаткові рішення для підвищення щільності мережі та пропускнуої здатності [9].

Ідеї, що вже були перевірені в мобільному зв'язку (наприклад, щільне розміщення базових станцій), можуть бути адаптовані й для LoRa. Завдяки використанню більшої кількості точок доступу у поєднанні з ефективними алгоритмами доступу до середовища передавання даних, можна значно покращити здатність LoRa-мережі обробляти велику кількість підключень одночасно.

8.4 Енергоспоживання

Технологія LoRaWAN була спеціально створена з урахуванням потреби в енергоефективності, однак навіть у такій системі енергоспоживання залишається одним із найважливіших факторів, які впливають на тривалість служби кінцевих пристроїв. Передбачається, що пристрої, які працюють на базі LoRa, мають функціонувати в автономному режимі впродовж 5–10 років без потреби у частому технічному обслуговуванні [9].

З метою збереження енергії в LoRa застосовуються дві основні стратегії: безпосереднє використання смуги пропускання для передачі чирп-сигналів, що знижує час активності та уникнення застосування складних протоколів управління доступом (MAC), що спрощує планування передач. Проте, незважаючи на ці заходи, фактичне споживання енергії може перевищувати очікуване через нештатні ситуації — наприклад, повторну передачу пакетів, що викликана поганою якістю каналу.

8.5 Безпека комунікації

Безпека передачі даних завжди була критично важливою складовою будь-яких цифрових систем, і LoRa не є винятком. LoRa-системи можуть бути вразливими до різноманітних типів атак, включаючи несанкціоноване

прослуховування (snooping), підміну або клонування пристроїв, а також передачу зловмисних повідомлень [9].

Центральним об'єктом усіх атак є криптографічні ключі, що використовуються для шифрування даних. Якщо зловмисник отримає доступ до ключа, це може призвести до серйозного порушення безпеки всієї системи. На сьогодні LoRa використовує симетричне шифрування за алгоритмом AES-128. Проте в поточному апаратному забезпеченні LoRa немає підтримки оновлення ключів після першого створення, що створює серйозну загрозу безпеці.

Крім того, коли постачальник мережі і платформи — різні організації, виникає потреба у незалежному механізмі автентифікації та контролю доступу. Це критично важливо для багатьох програм, де необхідне дотримання конфіденційності, захисту персональних даних і дотримання прав користувачів [9].

9 ВИКЛИКИ ТЕХНОЛОГІЇ LoRa

Хоча технологія LoRa має багато переваг, зокрема низьке енергоспоживання, велику дальність передачі сигналу та здатність до роботи в складних умовах, вона також стикається з низкою істотних обмежень. Ці недоліки можуть значно ускладнити її ефективне використання, особливо в умовах великомасштабних розгортань або критично важливих застосувань, де стабільність, безперервність зв'язку та надійність передачі даних мають вирішальне значення.

До основних технічних труднощів, які супроводжують впровадження LoRa-мереж, належать проблеми з масштабованістю, що обмежують кількість пристроїв, які можуть працювати одночасно без зниження продуктивності; ризику виникнення радіоперешкод у середовищі з високою щільністю пристроїв, які можуть призводити до втрати пакетів даних; а також питання кібербезпеки, пов'язані із захистом переданої інформації та забезпеченням конфіденційності користувачів. Врахування цих викликів є необхідною умовою при розробці, плануванні та експлуатації інфраструктури на основі LoRa, оскільки від них залежить ефективність, стабільність і тривалість функціонування всієї системи в цілому.

9.1 Масштабованість

Системи, побудовані на основі технології LoRa, орієнтовані на забезпечення зв'язку між великою кількістю кінцевих пристроїв, які переважно виконують функції збирання, передачі та обробки даних з навколишнього середовища. Це можуть бути датчики, контролери, вимірювальні прилади та інші елементи Інтернету речей. Однією з головних умов успішного функціонування таких мереж є здатність ефективно масштабуватись — тобто працювати стабільно навіть за умов суттєвого збільшення кількості підключених пристроїв. Щоб оцінити реальні можливості LoRa у цьому

напрямі, необхідно здійснювати технічний аналіз її пропускну́ї здатності, поведінки сигналу при зростанні трафіку та покриття в різних умовах — від окремих ізольованих точок до великих міських агломерацій.

Зокрема, відстань поширення сигналу та швидкість передачі даних мають визначальний вплив на ефективність LoRa-мереж у густонаселених районах. Досвід показує, що в умовах міста доцільніше використовувати максимальні можливі швидкості передавання даних, оскільки зниження швидкості не дозволяє обслуговувати більшу кількість пристроїв на одиницю площі через обмеження мережевого навантаження. Отже, оптимальний вибір параметрів передачі є критичним чинником при розгортанні масштабних мереж.

9.2. Перешкоди

Технологія передачі даних у мережах LoRa базується на принципі, схожому на класичний протокол ALOHA, який не передбачає централізованого або динамічного керування доступом до радіочастотного середовища. Такий підхід дозволяє пристроям надсилати інформаційні пакети у будь-який момент часу, як тільки в них з'явиться така потреба. При цьому не виконується жодної попередньої перевірки щодо того, чи є радіоканал вільним. Цей «сліпий» метод передачі хоч і простий у реалізації, але має серйозні недоліки в умовах великої кількості активних передавачів[9].

Зокрема, в системах типу ALOHA тривалість вразливого періоду, у межах якого можлива колізія сигналів і, відповідно, знищення переданих даних, вдвічі перевищує тривалість самої передачі. Це означає, що навіть якщо інший пристрій почне передачу трохи раніше або пізніше вже активного сигналу, це може повністю зруйнувати передавання обох пакетів. У середовищах із високою щільністю пристроїв та інтенсивним радіообміном це суттєво знижує загальну ефективність мережі та викликає значні втрати даних.

9.3 Безпека

У сучасному цифровому середовищі, де обмін даними відбувається на постійній основі та обсяг переданої інформації зростає експоненційно, питання безпеки та захисту конфіденційних даних стають дедалі актуальнішими. У випадку з технологією LoRa ці проблеми ускладнюються ще й тим, що пристрої, які використовуються в мережі, мають обмежені обчислювальні ресурси та працюють в умовах жорстких обмежень енергоспоживання. Це обмежує можливість впровадження складних криптографічних алгоритмів та багатоетапних механізмів автентифікації[9].

Хоча LoRa підтримує базовий рівень шифрування, зокрема використання симетричного AES-128 шифрування, існують структурні вразливості, пов'язані з тим, що ключі шифрування часто не оновлюються після генерації, а також відсутній механізм динамічного керування ключами. Також існують ризики, пов'язані з фізичним рівнем передачі сигналу, де новітні типи атак можуть бути складно виявлені й заблоковані. У поєднанні з обмеженнями на масову автентифікацію та передачу ключів між кількома пристроями ці фактори створюють загрозу для захисту як особистих, так і технічних даних у мережах LoRa[9].

ВИСНОВКИ

LoRa — це технологія бездротового зв'язку з низьким енергоспоживанням, яка протягом останніх років привернула значну увагу, спричинивши активні дослідження у цій галузі.

У кваліфікаційній роботі було детально проаналізовано архітектуру мереж LoRa та коротко описано технічні характеристики самої технології. Було розглянуто етапи розгортання LoRa-мереж, труднощі, які виникають під час налаштування, а також методи їхнього подолання. Окрему увагу приділено інструментам симуляції мереж LoRa, які дозволяють моделювати їхню поведінку без фактичного встановлення обладнання. Наприкінці було виділено основні нерозв'язані проблеми, що залишаються актуальними у сфері LoRa-комунікацій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Enabling technologies and sustainable smart cities / M. A. Ahad та ін. *Scimedirect*. 01.06.2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102301>.
2. Cui F. Deployment and integration of smart sensors with IoT devices detecting fire disasters in huge forest environment. *Scimedirect*. 10.12.2019. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.11.051>.
3. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment / K. Mekki та ін. *Scimedirect*. 08.03.2019. URL: <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>.
4. *A survey on low-power wide area networks for IoT applications* / M. Bembe та ін. 2019. С. 249–274.
5. Lee I., Lee K. The internet of things (IoT): applications, investments, and challenges for enterprises. *Scimedirect*. 28.04.2015. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.008>,.
6. Chaudhari B. S., Zennaro M., Borkar S. LPWAN technologies: emerging application characteristics, requirements, and design considerations. *MDPI*. 06.03.2020. URL: <https://doi.org/10.3390/fi12030046>.
7. Thomas A., Eldhose N. V. Performance Evaluation of Chirp Spread Spectrum as used in LoRa Physical Layer. International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN). 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/ICSCAN.2019.8878698>. Вступ. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://php.org.ua/manual/uk/security.intro.md>
8. Improving Quality-Of-Service in LoRa Low-Power Wide-Area Networks through Optimized Radio Resource Management / E. Sallum та ін. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2020. URL: <https://doi.org/10.3390/jsan9010010>.
9. Qadir Q. M., Rashid T. A., Al-Salihi N. K. Low power wide area networks: a survey of enabling technologies, applications and interoperability needs. *IEEE Access*. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2883151>.